

**Aus dem Institut für Multimediale und Interaktive Systeme  
der Universität zu Lübeck  
Direktor: Prof. Dr. Michael Herczeg**

**Aufbau und Kongruenz  
mentaler und technischer Modelle  
für intelligente ambiente Computersysteme**

Inauguraldissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde  
der Universität zu Lübeck

aus der Sektion Informatik / Technik

vorgelegt von  
Felix Schmitt  
aus Frankfurt am Main

Lübeck, 2015



Der Text dieses Werks steht unter der Creative-Commons-Lizenz „Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International“. Um eine Kopie dieser Lizenz zu sehen, besuchen Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>. Die Lizenz erstreckt sich nicht auf die Abbildungen sowie auf Zitate aus anderen Werken.

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Michael Herczeg
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Thomas Roth-Berghofer

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Oktober 2015  
zum Druck genehmigt: Lübeck, 22. Oktober 2015

## DANKSAGUNG

---

‘Begin at the beginning,’ the King said  
gravely, ‘and go on till you come to the  
end: then stop.’

*Lewis Carroll, Alice in Wonderland*

Am Prozess des Entstehens und am letztlichen Gelingen der vorliegenden Dissertation waren zahlreiche Personen beteiligt, denen ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte.

Den Kolleginnen und Kollegen am Institut für Multimediale und Interaktive Systeme der Universität zu Lübeck danke ich für zahllose Stunden der akademischen Diskussion ebenso wie für ihre freundschaftliche Unterstützung. Insbesondere meine Mentoren Dr. Jörg Cassens und Prof. Dr. Martin Christof Kindsmüller haben mich und meine Arbeit in all den Jahren entscheidend beeinflusst. Dem Betreuer meiner Arbeit, Prof. Dr. Michael Herczeg, danke ich für seine hilfreichen Kommentare sowie für sein Wohlwollen und seine Beharrlichkeit in besonders schwierigen Phasen der Promotion.

Meiner Familie danke ich für ihre Geduld und Unterstützung auf dem nicht immer geradlinigen Weg zum Abschluss dieses Projekts. Ganz besonders meiner Mutter, Brigitte Keßeler, gilt für ihr unermüdliches Engagement in allen Phasen des Promotionsprozesses meine Dankbarkeit. Nicht zuletzt danke ich Dr. Sarah Weber, die über viele Jahre eine wichtige Rolle auch für den Entschluss zur Promotion und das Festhalten daran eingenommen hat.

Mannheim im Dezember 2015

Felix Schmitt



## INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>Danksagung</b>	<b>iii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Die Veränderung der Welt</b>	<b>9</b>
2.1 Das Verschwinden der Computer . . . . .	9
2.2 Der Begriff des Systems . . . . .	12
2.3 Räume . . . . .	14
2.3.1 Physischer und physikalischer Raum . . . . .	15
2.3.2 Interaktionsraum . . . . .	17
2.3.3 Ambienter Raum . . . . .	18
2.4 Fazit . . . . .	23
<b>3 Ambiente Systeme</b>	<b>25</b>
3.1 Ubiquitous Computing und Pervasive Computing . . . . .	27
3.2 Begriffsklärung „intelligentes ambientes System“ . . . . .	29
3.2.1 Ambienz . . . . .	30
3.2.2 Intelligenz . . . . .	33
3.2.3 System . . . . .	36
3.2.4 Arbeitsdefinition . . . . .	39
3.3 Funktionsebenen intelligenter ambienter Systeme . . . . .	40
3.3.1 Ambientes System . . . . .	42

## Inhaltsverzeichnis

3.3.2	Kommunikativer Assistent . . . . .	42
3.3.3	Werkzeug-Extension . . . . .	44
3.4	Fazit . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Mentale Modelle</b>	<b>47</b>
4.1	Eigenschaften mentaler Modelle . . . . .	49
4.2	Aufbau mentaler Modelle . . . . .	53
4.3	Zwei Stufen, zwei Ansätze . . . . .	54
4.3.1	Kognitive Psychologie . . . . .	54
4.3.2	Ingenieurpsychologie . . . . .	56
4.4	Entwicklung einer Arbeitsdefinition . . . . .	59
4.5	Unterschiedliche Benutzer – unterschiedliche Modelle . . . . .	61
4.6	Adäquatheit und Äquivalenz mentaler Modelle . . . . .	63
4.7	Besonderheiten mentaler Modelle ambienter Systeme . . . . .	64
4.8	Umgang mit diesen Besonderheiten . . . . .	67
4.9	Fazit . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Kontext, Situation und Awareness</b>	<b>71</b>
5.1	Kontext und Situation . . . . .	72
5.2	Awareness . . . . .	75
5.3	Context-Awareness in menschlichen Akteuren . . . . .	80
5.4	Context-Awareness in ambienten Systemen . . . . .	81
5.5	Fazit . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Die Konstruktion von Interaktion</b>	<b>85</b>
6.1	Unterschiedliche Ebenen in der Interaktion Mensch – System	87
6.1.1	Herczeps 6-Ebenen-Modell . . . . .	88
6.1.2	Drei bzw. fünf Ebenen bei Rasmussen . . . . .	89
6.1.3	Norman: Sieben Schritte auf vier Ebenen . . . . .	92
6.1.4	Gemeinsamkeiten der drei Modelle . . . . .	94
6.2	Notwendigkeit unterschiedlicher Modelle auf Benutzerseite . . . . .	95
6.3	Notwendigkeit unterschiedlicher Modelle auf Systemseite . . . . .	97
6.4	Ambiente Systeme und ihre Benutzer als hybride Aktanten . . . . .	100
6.4.1	Grundbegriffe der Akteur-Netzwerk-Theorie . . . . .	101

6.4.2	Erfolgreiche Hybridisierung als Korrespondenz der Abstraktionsebenen auf Benutzer- und Systemseite . . .	102
6.5	Sicherstellen der Korrespondenz der Ebenen . . . . .	105
6.6	Fazit . . . . .	107
<b>7</b>	<b>Systementwicklung</b>	<b>111</b>
7.1	Anforderungen an eine AmI-Architektur . . . . .	112
7.2	Ideen, Konzepte und Entwicklungsschritte . . . . .	115
7.3	Das CAKE-Framework . . . . .	120
7.3.1	Verteilte Architektur . . . . .	122
7.3.2	Plugin-Modul . . . . .	123
7.3.3	Logik-Modul . . . . .	125
7.3.4	Kommunikationsmodul . . . . .	127
7.3.5	Grafische Benutzungsschnittstelle . . . . .	127
7.4	CASi . . . . .	128
7.5	Fazit . . . . .	131
<b>8</b>	<b>Resümee und Ausblick</b>	<b>133</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

2.1	Der Mensch, seine Werkzeugerweiterungen, ambierter Raum und Welt . . . . .	22
4.1	Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell . . . . .	55
4.2	Die Subsysteme des Langzeitgedächtnisses . . . . .	56
5.1	Endsleys Situation-Awareness-Modell . . . . .	79
6.1	Herczogs 6-Ebenen-Modell für menschliche Handlungen . . .	90
6.2	Rasmussens drei Ebenen menschlichen Verhaltens . . . . .	91
6.3	Normans sieben Schritte auf vier Ebenen . . . . .	93
6.4	Die drei Funktionsmodi von Systemen . . . . .	100
7.1	MATe- und MACK-Projektlogos . . . . .	116
7.2	Architektur des MATe-Systems . . . . .	118
7.3	Peripheriegeräte für MATe: Cubus und Doorplate . . . . .	121
7.4	Architektur einer CAKE-Umgebung . . . . .	124
7.5	CAKEs Logikschicht und ihre Anbindung an dessen übrige Architektur . . . . .	125
7.6	Steuerung der Zugriffsrechte auf ein CAKE-Plugin in der web-basierten grafischen Benutzungsoberfläche . . . . .	128
7.7	Architektur des Context-Awareness-Simulators CASi . . . . .	130
7.8	Die SimpleGUI des Context-Awareness-Simulators CASi . . .	131



## ZUSAMMENFASSUNG

---

Ambiente Computersysteme sind in andere Artefakte eingebettet und dadurch nicht mehr als Computer oder sogar nicht einmal als computerisiert erkennbar. Durch diese Einbettung in andere Dinge und Räume verschwindet nicht nur das Artefakt Computer als solches. Es ist die Schnittstelle des den Computer umhüllenden, vom eingebauten Computer angereicherten Artefakts, mit der wir interagieren und auf deren Affordanzen wir unsere Handlungen abstimmen. Diese Art der impliziten Interaktion ist es, die ambiente Computersysteme auszeichnet.

Thema der Arbeit sind die mentalen Modelle, die Benutzer ambienter Computersysteme über die Funktionen und Funktionszusammenhänge dieser Systeme aufbauen, und deren Kongruenz mit den technischen Modellen, die diesen Systemen eingeschrieben sind.

Weil die Charakteristika dieser Domäne vormals eindeutige Begrifflichkeiten aufweichen und dadurch Abgrenzungen unscharf werden, ist es unerlässlich, zunächst ein konsistentes Begriffssystem für die Beschäftigung mit intelligenten ambienten Systemen zu entwickeln.

Zur Eingrenzung des Gegenstandsbereichs werden einige grundlegende Begriffe wie der des Systems bestimmt und ein Konzept des ambienten Raums als Verschränkung des physischen Raums mit dem Interaktionsraum des Computersystems entwickelt. Darüber hinaus werden ambiente Systeme von Begriffen wie Ubiquitous und Pervasive Computing abgegrenzt.

Um zu bestimmen, was ein intelligentes ambientes System ist, werden die drei Bestandteile des Begriffs erst einzeln definiert, um daraus anschließend eine Arbeitsdefinition für den Gesamtbegriff abzuleiten. Es zeigt sich,

## *Zusammenfassung*

dass sinnvollerweise von ambienten Aspekten unserer Systeme zu sprechen ist, insoweit ihre Interaktion mit ihren Benutzern innerhalb bestimmter Anwendungskontexte implizit stattfindet. Die Intelligenz kann sich darauf beschränken, den Benutzern ein rein phänomenologisch intelligent erscheinendes Interaktionserlebnis zu vermitteln. Als Gegensatz zu intelligenten ambienten Systemen werden klassische Werkzeugsysteme und als Zwischenebene kommunikative Assistentensysteme angeführt.

Zur Entwicklung eines interdisziplinär akzeptablen Begriffs mentaler Modelle werden die Definitionen der kognitiven und der Ingenieurpsychologie nicht als Gegensätze, sondern als aufeinander aufbauende Stufen in einem induktiven Entwicklungsprozess aufgefasst. Der idiosynkratische Charakter mentaler Modelle und die implizite, stark kontextabhängige Interaktion mit ambienten Systemen erweisen sich als starke Argumente dafür, die Passung zwischen mentalen und technische Modellen möglichst dem System zu überantworten.

Auf der Grundlage des bisher Erarbeiteten werden die Bedingungen der Möglichkeit erfolgreicher Interaktion zwischen intelligenten ambienten Systemen und ihren Benutzern abgeleitet. Insbesondere müssen die Ebenen, auf denen eine Interaktion modelliert wird, seitens beider Beteiligten miteinander korrespondieren. Daraus ergeben sich bestimmte Anforderungen an solche Systeme, etwa die Fähigkeit, ihren Benutzern möglichst abstrakt spezifizierte Interaktion anzubieten und nur bei Bedarf als kommunikativer Assistent Affordanzen dynamisch zu erzeugen oder sich gar als passives Werkzeugsystem zu zeigen.

Abschließend wird eine Softwareplattform vorgestellt, deren Architektur es erlaubt, diese Fähigkeiten in einem konkreten ambienten System zu implementieren. Insbesondere ihre flexible Plugin-Architektur und ihr Blackboard-basiertes Reasoning-Modul zur bedarfsgerechten Nutzung unterschiedlicher KI-Paradigmen prädestinieren die Plattform sowohl für Forschungszwecke als auch zum Bau von Anwendungssystemen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den mentalen Modellen, die Benutzer ambienter Computersysteme über die Funktionen und Funktionszusammenhänge dieser Systeme aufbauen, und deren Kongruenz mit den technischen Modellen, die diesen Systemen eingeschrieben sind. Das Thema dieser Arbeit entwickelte sich aus der explorativen Auseinandersetzung mit und iterativen Entwicklung von intelligenten ambienten Systemen am Institut für Multimediale und Interaktive Systeme (IMIS) der Universität zu Lübeck.

Ambiente Computersysteme durchdringen mehr und mehr unseren Alltag, indem nicht nur neuartige, zusammenhängende Systeme konstruiert werden (z. B. sogenannte Smart Homes), sondern auch vorhandene Klassen von Systemen zunehmend frei programmierbar und mit Netzwerkanbindungen versehen werden. Aus einzelnen, lokal genutzten Computern entstehen Verbundsysteme, die durch den gegenseitigen Zugriff auf Ein- und Ausgabegeräte, Sensoren, Rechenleistung und Algorithmen nicht nur räumlich verteilt sind, sondern deren Interaktionen mit ihren Benutzern sich auch über einen längeren Zeitraum erstrecken können. Mensch-Computer-Interaktion findet nicht mehr nur, wie in der Ära der Personal Computer, zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort statt, sondern durchdringt die Lebenswelt des Benutzers. Diese Tatsache allein ist aber nicht ausreichend, um von ambienten Systemen zu sprechen. Der Begriff impliziert auch eine Veränderung in Bezug auf die Schnittstellen zwischen Mensch und Computer. Die Interaktion löst sich von expliziten Ein- und Ausgabegeräten wie Tastatur, Maus und Bildschirm und wird in Arte-

## 1 Einleitung

fakte eingeschrieben, die der Benutzer handhabt und die die Ausgaben des Systems widerspiegeln.

Auch bei klassischen Computersystemen, bei denen die Möglichkeiten der Interaktion durch Affordanzen angezeigt werden, muss der Benutzer eine Vorstellung davon haben, *welche* Funktion des Systems durch eine spezifische Interaktion ausgelöst wird und welche Zustandsänderung dadurch eintreten wird. Mit anderen Worten: Der Benutzer benötigt ein *mentales Modell* der Funktionsweise des Systems. Mentale Modelle ermöglichen es dem Benutzer, Erwartungen und Vorhersagen zu formulieren, welche Interaktionen mit dem System möglich sind und wie diese sich auf den Systemzustand auswirken werden.

Eine wichtige Eigenschaft mentaler Modelle ist, dass sie in ihren Formen und Inhalten ausgesprochen individuell sind. Dennoch wird man zwischen den mentalen Modellen innerhalb gewisser Benutzergruppen Ähnlichkeiten feststellen können. Die mentalen Modelle der unterschiedlichen Benutzergruppen, die mit einem gegebenen System zu tun haben, lassen sich charakterisieren als *unterschiedlich abstrakte Modelle* der Funktionsweise des Systems, und die vom System angebotenen Interaktionsmöglichkeiten müssen zum Abstraktionsgrad des Modells seitens des Benutzers passen, damit die Interaktion gelingen kann. Nun sind aber die mentalen Modelle nicht nur zwischen Benutzergruppen von unterschiedlichem Abstraktionsgrad, sondern auch ein einzelner Benutzer kann durchaus für verschiedene Anwendungskontexte mehrere mentale Modelle unterschiedlichen Abstraktionsgrads haben oder, anders ausgedrückt, kontextabhängig unterschiedlichen Benutzergruppen angehören. Dies gilt auch für *ambient* Computersysteme, bei denen aber die bereits erwähnte Unsichtbarkeit als zusätzliche Schwierigkeit hinzukommt. Nicht nur sind seine Bestandteile wie Ein- und Ausgabegeräte (Sensoren und Aktuatoren) unsichtbar, es ist auch keinerlei explizite Interaktion notwendig, weil alles, was das System leisten soll, einfach passend (*just right*) ist. Es ist also in gewisser Weise im doppelten Sinne unsichtbar.

Durch die Einbettung in andere, nicht als Computer und sogar nicht einmal als computerisiert erkennbare Dinge verschwindet auch die Interakti-

on mit dem Computer. Es ist nicht mehr die Benutzungsschnittstelle eines Computers, der wir uns gegenüber sehen und die in ihrer spezifischen Gestaltung zu bestimmten Formen und Inhalten der Interaktion anregt, sondern es ist die Schnittstelle des den Computer umhüllenden, vom eingebauten Computer angereicherten Artefakts, mit der wir interagieren und auf deren Affordanzen wir unsere Handlungen abstimmen. Wie intentional oder unbewusst, explizit oder implizit diese Interaktionen sind, ändert nichts daran, dass die Interaktion mit dem verschwundenen Computer implizit, nämlich über das angereicherte Artefakt vermittelt, stattfindet und damit auf gewisse Weise ebenfalls verschwindet. Diese Art der impliziten Interaktion ist es, die die neue Art räumlich verteilter, in Artefakte eingebetteter Computersysteme auszeichnet.

Obschon in den letzten Jahren viel Forschung auf diesem Gebiet stattfindet, lässt diese bei genauerer Betrachtung einige wesentliche Aspekte vermissen. Arbeiten zu diesem Themenkomplex legen ihren Schwerpunkt häufig eher auf technische Aspekte. Ähnlich wie in den Anfangsjahren der Informatik die Aufgabe der Forscher hauptsächlich darin bestand, technische Probleme *überhaupt* in den Griff zu bekommen, konzentrieren sich diejenigen, die heutzutage an ambienten Systemen arbeiten, ebenfalls vor allem auf die technische Realisierbarkeit solcher Systeme. Wie damals wird die Einbeziehung der anderen Seite der Gleichung, nämlich des Benutzers, eher stiefmütterlich bedacht. Diese Vernachlässigung der Benutzerseite in der Forschung muss überwunden werden, um ambiente Computersysteme für die breite Masse der technisch nicht interessierten Laien- oder Gelegenheitsbenutzer attraktiv zu machen.

Die vorliegende Arbeit macht den Benutzer und grundlegende Mechanismen seines Umgangs mit ambienten Computersystemen in den genannten Forschungskontexten stärker sichtbar. Insbesondere bei Systemen, deren wesentliche Eigenschaft ihre *Unsichtbarkeit* ist, muss die Frage der Usability, die lange Zeit eine Frage der *Sichtbarkeit* von Interaktionsmöglichkeiten, eine Frage der Affordanzen war, neu gestellt werden. Zu fragen ist also: Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit die Mensch-Maschine-Interaktion bei intelligenten ambienten Systemen gelingt? Anders gefragt:

## 1 Einleitung

In welcher Art müssen sich welche Erscheinungsformen solcher Systeme dem Benutzer darbieten, damit dessen mentale Modelle mit den Interaktionsmöglichkeiten und Affordanzen des Systems auf den verschiedenen Abstraktionsebenen korrelieren können? Wie müssen intelligente ambiante Systeme konstruiert werden, damit die ihnen eingeschriebenen Modelle und die mentalen Modelle ihrer verschiedenen Benutzer so korrespondieren, dass erfolgreiche Interaktion möglich ist?

In der vorliegenden Arbeit werden zur Beantwortung der oben skizzierten Fragen die theoretischen Grundlagen des Verhältnisses von intelligenten ambienten Systemen und den mentalen Modellen ihrer Benutzer aufgearbeitet. Eine wesentliche Leistung besteht in der begrifflichen Erschließung des Forschungsfeldes, zeigte sich doch in der Auseinandersetzung mit einschlägiger Literatur eine große Heterogenität in der Benutzung wesentlicher Begrifflichkeiten.

Im Zusammenhang mit der Beschäftigung mit dieser neuen Art von Computersystemen ist die Klärung einiger zentraler Begriffe besonders wichtig, weil die oben beschriebenen Charakteristika dieser Domäne vormals eindeutige Begrifflichkeiten aufweichen und dadurch Abgrenzungen unscharf werden. In der Auseinandersetzung mit der Thematik wird schnell deutlich, dass unterschiedliche Disziplinen und Forschungstraditionen viele der hier relevanten Begriffe unterschiedlich definieren und verwenden. Für eine fruchtbare Auseinandersetzung in der wissenschaftlichen Community ist es daher unerlässlich, ein gemeinsames Begriffssystem für die Erforschung, Entwicklung und Implementierung intelligenter ambienter Systeme zu erarbeiten.

Dies gelingt durch einen interdisziplinären Zugang zum Thema, durch die Hinzuziehung kognitionspsychologischer und soziologischer Erkenntnisse. Damit komplementiert diese Arbeit die ingenieurwissenschaftlich-empirische Sicht auf das Forschungsfeld. Erst nachdem die theoretischen Grundlagen und Begrifflichkeiten geklärt sind, um das Verhältnis intelligenter ambienter Systeme und ihrer Benutzer zu erfassen und zu beschreiben, lassen sich intelligente ambiante Systeme entwickeln, die den besonderen Anforderungen an den Aufbau und die Anpassung der mentalen

Modelle ihrer Benutzer Rechnung tragen.

Nach einer kurzen Charakterisierung der Veränderungen, die sich durch die Allgegenwart neuer Formen von Informations- und Kommunikationstechniken ergeben, werden in Kapitel 2 die davon beeinflussten Konzepte von System und Raum begrifflich bestimmt und in ihrer Bedeutung für das Thema dieser Arbeit umrissen. Um den Gegenstandsbereich, der mit „intelligenten ambienten Systemen“ oder vergleichbaren Formulierungen gemeint ist, überhaupt eingrenzen zu können, bedarf zuerst der Begriff des Systems einer näheren Bestimmung. Die Frage, was Raum ist, gehört ebenfalls zu den klärungsbedürftigen Aspekten. Über den Begriff der Grenze ist der Systembegriff unmittelbar mit dem Raumbegriff verknüpft. Raum ist einerseits physischer Raum, d. h. sinnlich erfahrbarer Teil des physikalischen Raums, aber auch der Interaktionsraum eines Computersystems, innerhalb dessen die Interaktionen zwischen Benutzern und System beschreibbar sind. In der Verschränkung des physischen Raums mit dem Interaktionsraum entsteht der ambiente Raum im Sinne des Themas dieser Arbeit.

In Kapitel 3 wird der Frage nachgegangen, was intelligente ambiente Systeme im Kern ausmacht und wie sie sich im Verhältnis zu Systemen anderer Funktionsweisen charakterisieren lassen. Pervasive Computing und Ubiquitous Computing stehen in enger Verbindung zum Thema ambiente Systeme und Ambient Intelligence. Um zu definieren, was ein intelligentes ambientes System ist, werden zunächst die drei Bestandteile des Begriffs einzeln definiert, um daraus anschließend eine Arbeitsdefinition für den Gesamtbegriff abzuleiten. Es wird sich zeigen, dass es sinnvoll ist, von ambienten Aspekten unserer Systeme zu sprechen, insoweit ihre Interaktion mit ihren Benutzern innerhalb bestimmter Anwendungskontexte implizit stattfindet. Bezüglich des Intelligenzbegriffs im Zusammenhang mit dem Thema dieser Arbeit geht es vor allem um Verhaltensmuster eines ambienten Systems, die dieses in den Augen seiner Benutzer als intelligent erscheinen lassen. Für diese rein phänomenologische, scheinbare Intelligenz wird der Begriff Smartness vorgeschlagen. Der letzte Begriffsbestandteil, der des Systems, in seinen Grundzügen bereits in Kapitel 2 umrissen, wird

## 1 Einleitung

dann in Relation zu den vorgenannten Begriffen definiert. Aus dieser Arbeit an den Begriffen soll schließlich eine Arbeitsdefinition für intelligente ambiente Computersysteme hervorgehen, die es ermöglicht, die verschiedenen Funktionsebenen solcher Systeme zu beschreiben. Von der ambienten Funktionalität dieser Systeme werden die klassischen Werkzeugsysteme und als Zwischenstufe der Funktionsmodus eines kommunikativen Assistenten abgegrenzt.

In Kapitel 4 wird der für die Arbeit zentrale Begriff des mentalen Modells untersucht. Mentale Modelle sind eine Form der Wissensrepräsentation, die Menschen verwenden, um komplexe Sachverhalte zu Erklärungs- und Vorhersagezwecken abzubilden. Der Begriff wird in unterschiedlichen Forschungstraditionen unterschiedlich verwendet, aber für den wissenschaftlichen Dialog ist es nötig, ein einheitliches Verständnis zu finden. Aus Konzepten der Kognitionspsychologie und der Ingenieurpsychologie wird ein zweistufiges Schema des Aufbaus mentaler Modelle entwickelt und daraus eine Arbeitsdefinition für den weiteren Verlauf dieser Arbeit abgeleitet. Es werden mögliche Unterschiede und Gemeinsamkeiten der mentalen Modelle unterschiedlicher Benutzer und Benutzergruppen mit Bezug zu einem ambienten System erörtert. Anschließend werden die Besonderheiten ambienter Systeme im Zusammenhang mit den mentalen Modellen ihrer Benutzer behandelt und mögliche Strategien zum Umgang mit diesen Herausforderungen vorgeschlagen.

Kapitel 5 beschäftigt sich damit, dass Interaktionen zwischen einem System und seinem Benutzer stets innerhalb einer bestimmten Konfiguration von Gegebenheiten der äußeren Welt und von inneren Zuständen der beteiligten Akteure stattfinden. Die Identifikation der relevanten Gegebenheiten der gerade herrschenden Situation ist Voraussetzung für deren Zuordnung zu einem Kontext, und diese gegenseitige Awareness ist wiederum eine Bedingung für erfolgreiche Interaktion.

Auf der Grundlage des zuvor Erarbeiteten wird in Kapitel 6 elaboriert, wie die Modelle des Benutzers vom System und des Systems von seinen Benutzern jeweils strukturiert sein müssen, damit erfolgreiche Interaktion möglich ist. Dazu werden zwei Arten von Abstraktion unterschieden,

einerseits die verschiedenen Ebenen der Beschreibung einzelner Interaktionshandlungen und andererseits die Beschreibung des gesamten Interaktionskontexts und des zu lösenden Problems. Zum Beleg wird Interaktion als Hybridisierungsprozess im Sinne der Akteur-Netzwerk-Theorie (ANT) modelliert. Es werden Möglichkeiten erörtert, wie zu gewährleisten ist, dass die Modelle der Interaktionsteilnehmer hinsichtlich dieser beiden Aspekte korrespondieren.

Abschließend wird in Kapitel 7 das Software-Framework CAKE vorgestellt. Es wird dargestellt, aufgrund welcher Eigenschaften CAKE in der Lage ist, die im theoretischen Teil dieser Arbeit herausgearbeiteten Anforderungen zu erfüllen und sich daher sowohl zum Bau intelligenter, ambienter, kontextsensitiver Anwendungssysteme eignet als auch die Grundlage für Forschungssysteme zur weiteren Untersuchung des Themenkomplexes bilden kann.



Mit der Entwicklung neuer Informations- und Kommunikationstechnologien verändert sich die Welt, in der wir leben, rasant. An immer mehr Orten und in immer mehr Lebenssituationen sind wir von Computersystemen umgeben, die unsere Handlungsmöglichkeiten verändern und erweitern (Sadri, 2011). In der Auseinandersetzung mit diesen nicht nur technischen, sondern auch gesellschaftlichen Veränderungen stehen zwei Begriffe im Zentrum, in denen sich die Veränderung der Welt manifestiert, der Begriff des Systems und der Begriff des Raumes.

Im Folgenden wird nach einer kursorischen Beschreibung der Veränderungen unserer Lebenswelt eine erste Bestimmung dieser beiden Begriffe vorgenommen als Fundament für die Reflexion in den folgenden Kapiteln.

### 2.1 DAS VERSCHWINDEN DER COMPUTER

Mit der zunehmenden Durchdringung unserer Lebenswelt von der Interaktion mit Computersystemen ist nicht nur gemeint, dass wir in der Schule, auf der Arbeit und selbst in unserer Freizeit häufig mit PC-Systemen umgehen und vor Bildschirm und Tastatur lesen, schreiben, kommunizieren und konsumieren. Längst haben andere Formen von Computern alle Bereiche unserer westlich-industriellen Lebenswelt durchdrungen. Smartphones, Tablets und öffentliche Anzeigetafeln sind darunter die offensichtlicheren. Auch kleine und kleinste Artefakte des täglichen Umgangs enthalten zunehmend sowohl Prozessoren als auch vielfältige Schnittstellen zu Netzwerken anderer Systeme und Software, um mit diesen zu kommunizieren.

## 2 Die Veränderung der Welt

Tatsächlich gehen Analysten schon seit einiger Zeit davon aus, dass der Computer als graue Box unter oder auf dem Schreibtisch ein Auslaufmodell ist, und selbst der neuere, mobilere, dynamischere Umgang mit Smartphones und Tablets macht nur einen Bruchteil unserer Interaktion mit Computersystemen aus. Der übrige Teil entfällt auf Computer, die nicht einmal als solche erkennbar sind und deren Präsenz, selbst wenn man um sie weiß, nur allzu schnell vergessen wird. Der Grund dafür ist, dass diese Computersysteme in andere Artefakte eingebettet sind und hinter der Oberfläche dieser Artefakte und sogar ganzer Räume regelrecht verschwinden (Fischermann, 2012). Es sind jedoch nicht nur die Computer als Kisten mit Kabeln daran, die verschwinden.

Durch die Einbettung in andere, nicht als Computer und sogar nicht einmal als computerisiert erkennbare Dinge verschwindet auch die Interaktion mit ihnen. Es ist nicht mehr die Benutzungsschnittstelle eines Computers, der wir uns gegenüber sehen und die in ihrer spezifischen Gestaltung zu bestimmten Formen und Inhalten der Interaktion anregt, sondern es ist die Schnittstelle des den Computer „umhüllenden“, vom eingebauten Computer angereicherten Artefakts, mit der wir interagieren und auf deren Anforderungen wir unsere Handlungen abstimmen (Kameas u. a., 2005). Wie intentional oder unbewusst, explizit oder implizit diese Interaktionen sind, ändert nichts daran, dass die Interaktion mit dem verschwundenen Computer implizit, nämlich über das angereicherte Artefakt vermittelt, stattfindet und damit auf gewisse Weise ebenfalls verschwindet. Diese Art der impliziten Interaktion ist es, die die neue Art räumlich verteilter, in Artefakte eingebetteter Computersysteme auszeichnet.

Häufig werden ambiente Systeme mit einem Verschwinden oder Unsichtbarwerden des Computers gleichgesetzt (vgl. etwa Norman, 1999). In diesem Zusammenhang muss zunächst geklärt werden, wie die Begriffe „Verschwinden“ und „Unsichtbarkeit“ gemeint sind bzw. auf welche Eigenschaft oder Dimension des Systems sie sich beziehen. Ein System, das aus im Raum verteilten Sensoren und kleinsten Knotenrechnern besteht, kann im Hinblick auf die Hardware, aus der es besteht, sicherlich unauffällig bis zur Unsichtbarkeit installiert sein. In dieser Hinsicht lässt sich auch

ohne Weiteres vom Verschwinden des Computers als der großen grauen Kiste unter dem Schreibtisch sprechen.

Die Frage nach Verschwinden und Unsichtbarkeit stellt sich aber noch auf einer anderen Ebene, nämlich auf der der Interaktion zwischen dem System und seinen Benutzern. Auch diese Interaktion kann sichtbar oder unsichtbar, d. h. explizit oder implizit, sein. Von einem Verschwinden ließe sich ebenfalls sprechen, sofern man damit eine Verlagerung von expliziter hin zu impliziter Interaktion meint.

Grundsätzlich ist bei der Untersuchung von Mensch-Computer-Interaktion zu beachten, dass solche Interaktionen stets zwei Seiten aufweisen, nämlich aus einer initialen<sup>1</sup> *Aktion* und einer nachfolgend darauf bezogenen *Reaktion* bestehen. *Explizite Interaktionen* sind solche, die aus einer eindeutigen, wissentlichen und willentlichen Handlung des Benutzers resultieren. *Implizite Interaktionen* sind solche, bei denen der Benutzer zwar auf das System einwirkt, d. h. eine Eingabe verursacht, ohne dass dies jedoch willentlich oder wissentlich geschieht (Schmitt u. a., 2010). Auch die Reaktionen des Systems lassen sich analog klassifizieren. Eine implizite Reaktion auf eine explizite Aktion des Benutzers sollte jedoch nie eintreten, da der Benutzer über den Erfolg seiner Aktion im Unklaren gelassen würde. Sofern ein System mithilfe seiner Sensorik Daten über einen Benutzer sammelt, sie logisch auswertet und daraufhin seine Aktuatoren zu einer Reaktion veranlasst, darf diese Reaktion allerdings durchaus implizit sein, da die „Eingabe“ hier ebenfalls implizit ist und der Benutzer deshalb nicht zwangsläufig eine Rückmeldung erwartet, wie dies bei einer expliziten Eingabe der Fall wäre.

Das Verhältnis zwischen dem ambienten Charakter von Computersystemen und den expliziten und impliziten Interaktionen, die sie anbieten, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch detailliert zu klären sein. Es ist jedoch hier bereits festzuhalten, dass ambiente Systeme die bestehenden Arten von Computersystemen und Interaktionsmöglichkeiten nicht abschaffen und ersetzen werden. Vielmehr werden sie sie um neue Funktio-

---

<sup>1</sup>*initial* meint hier nur, dass eine konkrete Interaktion mit dieser Aktion beginnt, nicht, dass die gesamte Nutzungsbeziehung zwischen Benutzer und System damit beginnt.

## 2 Die Veränderung der Welt

nalität und neue Arten von Mensch-Maschine-Schnittstellen ergänzen und anreichern. Ein Beispiel sind *location-based services* (Rao und Minakakis, 2003), Dienste, die abhängig vom Aufenthaltsort des Benutzers Informationen oder Kommunikationsgelegenheiten anbieten, wenn sich beispielsweise Geschäfte mit interessanten Produkten in der Nähe befinden oder ein Freund, der ebenfalls zu Mittag essen möchte. Diese Art von Diensten stützt sich etwa auf das Smartphone des Benutzers, auf mobile Datenfunk-Infrastruktur und soziale Netzwerke, in denen Benutzer ihre Interessen und Aktivitäten miteinander teilen. Durch die ortsabhängige Auswahl und Darbietung der Informationen entsteht aber eine neue Art Dienst, der mehr ist als die einzelnen bekannten Dienste, auf denen er basiert.

### 2.2 DER BEGRIFF DES SYSTEMS

Bei der Verwendung des Begriffs *System* drängt sich der Bezug zur Systemtheorie auf, wie sie aufgrund ihrer universellen Systematik und ausgehend von der Soziologie weite Verbreitung gefunden hat. Zur Einführung in die Systemtheorie vgl. etwa Reese-Schäfer (1999) und Luhmann (1973). Bei der Beschäftigung mit technischen Systemen stellt man schnell fest, dass einige Eigenschaften sozialer Systeme sich übertragen lassen, andere jedoch außer acht gelassen werden müssen. So sind Computersysteme beispielsweise nicht *autopoietisch*, d. h. sie sind nicht in der Lage, sich aus sich selbst heraus zu erschaffen und zu reproduzieren.

Systeme, und dies gilt auch für Computersysteme, zeichnen sich dadurch aus, dass sie von einer Umwelt unterschieden sind, die nicht zum System gehört, und mithin auch eine Grenze besitzen (Koschorke, 1999). Einige Dinge gehören zum System, und andere Dinge gehören nicht dazu. Für jedes Ding ist für einen gegebenen Zeitpunkt angebbar, ob es zum System gehört oder nicht. In Zeiten weltweiter „Always On“-Vernetzung und automatischer Service Discovery einerseits, aber auch Sicherheits-Policys und Deep Packet Inspection Firewalls andererseits verwischt die Systemgrenze jedoch zusehends. Natürlich lässt sich nach wie vor zu einem beliebigen Zeitpunkt feststellen, ob ein Gerät zu diesem Zeitpunkt Teil eines enger

gefassten Systems wie z. B. einer Smart-Home-Konfiguration ist. Da das in dieser Arbeit betrachtete Phänomen mentaler Modelle aber keines ist, das sich an einem bestimmten *Zeitpunkt* entfaltet, sondern über längere *Zeiträume* entsteht und sich auswirkt, beziehen sich diese mentalen Modelle auch nicht auf einen momentanen Zustand eines ambienten intelligenten Systems, welcher Art und wie inklusiv oder exklusiv man es auch definieren mag. Daraus folgt, dass wir es im Rahmen des hier diskutierten Themas zwangsläufig mit einem gewissen Maß an Unschärfe zu tun haben, mit der wir umgehen und die wir in unsere Überlegungen einbeziehen müssen.

Ambiente Systeme, mit denen wir es in Kapitel 3 detaillierter zu tun bekommen werden, setzen sich in den meisten Fällen aus einer Vielzahl einzelner Geräte zusammen, die möglicherweise jeweils für sich genommen bestimmte Funktionen zur Verfügung stellen können, aber nur in ihrem Zusammenwirken als ambientes System in Erscheinung treten. Diese Zusammengesetztheit ambienter Systeme führt dazu, dass es immer geschehen kann, dass Geräte zum System hinzukommen oder aus dem Verbund austreten, beispielsweise wenn der Besitzer eines Mobiltelefons die Reichweite des häuslichen Drahtlosnetzwerks betritt oder verlässt. Die Fluktuation der Geräte, die zu einem Zeitpunkt zum System gehören oder nicht, ist ein Faktor, der die Grenzziehung dieses Systems unscharf werden lässt.

Ein weiteres Beispiel für Unschärfe in der Abgrenzung eines ambienten Systems von seiner Umwelt liegt in der Tatsache begründet, dass die einzelnen Geräte, Sensoren und Aktuatoren, aber auch zentrale Komponenten z. B. der Künstlichen Intelligenz, die die Interaktion zwischen Benutzern und System maßgeblich mitbestimmen, von Zeit zu Zeit Softwareaktualisierungen erhalten können. Solche Updates können z. B. dafür sorgen, dass ein Sensor durch einen weiterentwickelten Algorithmus verschiedene Schallquellen besser separieren und somit unterschiedliche Sprecher in einem Konferenzraum besser voneinander unterscheiden kann oder dass die KI neue logische Schlussverfahren „lernt“, mit denen sie Zusammenhänge zwischen Daten unterschiedlicher Sensoren erkennen kann, die ihr vorher verborgen blieben. Dieses Beispiel illustriert, dass die Unschärfe nicht unbedingt in der Abgrenzung der technischen Infrastruktur eines Systems

## 2 Die Veränderung der Welt

von der seiner Umwelt bestehen muss, sondern auch in der Bestimmung des aus Sicht seiner Benutzer von ihm erwartbaren Interaktionsverhaltens liegen kann.

Eine weitere, äußerst pragmatische Abgrenzung orientiert sich am Designer (Gestalter) eines solchen Systems. Aus dessen Sicht endet ein System dort, wo seine Verantwortung für die Gestaltung und ggf. für das Funktionieren des Systems endet. Diese Grenze kann mit den oben genannten Grenzziehungen zusammenfallen, also z. B. mit einer Schnittstelle zu dem System eines anderen Herstellers, sie kann aber auch losgelöst von diesen bestehen, wo z. B. eine bestimmte Systemfunktion in den Verantwortungsbereich eines Arbeitskollegen fällt. Über den Verantwortungsbereich des Gestalters für die Funktionalität des Gesamtsystems wird später im Zusammenhang mit mentalen Modellen zu sprechen sein.

### 2.3 RÄUME

Wenn wir uns mit ambienten Computersystemen und insbesondere den von ihnen aufgespannten *ambienten Räumen* befassen, bedarf es auch der grundsätzlichen Klärung des Raumbegriffs in diesem Zusammenhang. Die beiden zunächst höchst abstrakten Begriffe System und Raum teilen sich weitere grundlegende Eigenschaften wie z. B., dass beide notwendigerweise eine Grenze besitzen, die jeweils ein Innen und ein Außen konstituiert und etwas Dazugehöriges vom nicht Dazugehörigen trennt.

Der alltagssprachliche Raumbegriff scheint zunächst sehr einfach. Jeder hat eine Vorstellung davon, was damit gemeint ist und wie Raum beschaffen ist. Bei genauerer Betrachtung wird jedoch schnell klar, dass es weiterer Differenzierungen bedarf, um dieses Abstraktum greifbar zu machen und seine unterschiedlichen Bedeutungsvariationen im hier betrachteten Kontext zu erschließen. Noch am ehesten unserer spontanen Vorstellung von Raum entspricht der physikalische Raum in seiner Erstreckung bzw. dessen sinnlich erfahrbare Teilmenge, der physische Raum. Insbesondere im Zusammenhang mit Computersystemen ergibt sich der abstraktere Begriff des *Interaktionsraums*. Gemeint ist hier nicht computervermittelte interper-

sonale Kommunikation (vgl. etwa Helmers u. a., 1998), sondern die Menge der möglichen Interaktionen mit der Funktionalität eines solchen Systems. Aus diesen beiden Vorstellungen konstituiert sich schließlich ein Konzept des *ambienten Raums* als eine Art Überlagerung des physischen und des Interaktionsraums.

Nicht zuletzt unterscheiden sich die Begriffe von Raum, die unterschiedliche Beteiligte, z. B. Designer, Entwickler, Techniker oder Endbenutzer, im Umfeld eines ambienten Systems sich von den verschiedenen Arten von Räumen machen, die ebenfalls mit dem System in Zusammenhang stehen. In ihren unterschiedlichen mentalen Modellen, die sie im Zusammenhang mit ihrer spezifischen Rolle in Bezug auf das System ausbilden, sind physischer Raum, Interaktionsraum und letztlich auch ambienter Raum unterschiedlich repräsentiert. In Kapitel 4 wird auf diese Unterschiede noch detaillierter eingegangen.

### 2.3.1 *Physischer und physikalischer Raum*

Der Raumbegriff der Physik hat sich über die Jahrhunderte stark gewandelt (vgl. Caruso und Xavier, 1996) und entspricht spätestens seit Einsteins Relativitätstheorie nicht mehr unserer unmittelbar zugänglichen Vorstellung von Raum (Einstein, 1926). An dieser Stelle begnügen wir uns jedoch mit einem einfachen, wenn auch veralteten physikalischen Raumbegriff, der sich durch wenige Eigenschaften umreißen lässt. Dieser Raum wird zunächst als *a priori existent* gedacht, als absolutes Konzept unabhängig von den Dingen, die sich in ihm befinden können. Er kann folglich auch leer sein. Außerdem ist dieser Raum *euklidisch* und entspricht dem Vektorraum, der durch ein *dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem* aufgespannt wird.

Der physische Raum ist dagegen jene Teilmenge besagten physikalischen Raums, der uns Menschen sinnlich zugänglich ist. Obgleich auch die Elektronenwolke um einen Atomkern zweifelsfrei physikalisch eine räumliche Erstreckung (im Sinne ihrer quantenmechanischen Wahrscheinlichkeit) besitzt und das Weltall endlich gedacht wird, sind diese physikalischen Räume nicht sinnlich erfassbar (vgl. Flusser, 1991). Physischer Raum ist als

## 2 Die Veränderung der Welt

Begrenztes mit den Augen sichtbar und die Erstreckung von Dingen in der Welt ist mit den Händen spürbar.

### *Raum und Räumlichkeit*

Beim Lesen der vorliegenden Arbeit ist es wichtig, den Unterschied zwischen Raum im Sinne von *space* und Zimmer (*room*) stets im Hinterkopf zu behalten. Nicht jeder *space*, in dem z. B. Interaktion mit Computersystemen oder soziale Interaktion stattfindet, muss nämlich gleichzeitig ein *room*, also umbauter Raum sein. Man denke nur an einen Marktplatz, auf dem Menschen sich treffen, um Informationen und Waren auszutauschen. Dieser Platz ist ganz offensichtlich ein Interaktionsraum, aber ebenso offensichtlich ist er kein Zimmer. Um aber die große Bandbreite der Räume zu erfassen, die sich aus ihrer Umgrenzung durch Wände, Decken und Böden ergeben, also auch Hallen, Flure etc. zu erfassen, lassen sich diese als *Räumlichkeiten* zusammenfassen. Dem gegenüber steht der Begriff des *Raums* als Abstraktum, das zwar ebenso von etwas anderem, nicht zu ihm Gehörendem abgegrenzt ist (vgl. S. 14), dessen Grenzen aber nicht notwendigerweise materiell manifestiert sind wie bei einer Räumlichkeit.

Das Konzept von Raum ist, wie das des Systems (vgl. Abschnitt 2.2), untrennbar verbunden mit, sogar determiniert von dem Konzept der Grenze. Räume, seien es soziale, politische, architektonische oder ambient-technische, ent- und bestehen durch und aus ihrer Abgrenzung von einem Anderen. Das bedeutet jedoch keineswegs, dass Räume von ihrem Anderen hermetisch abgeriegelt sein müssen. Tatsächlich ist dies bei den wenigsten Räumen der Fall, wie eigene Überlegungen leicht zeigen. Vielmehr besitzen die meisten Räume Schnittstellen vielfältiger Art, durch die sie mit dem Anderen in Verbindung stehen und häufig sogar in Wechselwirkung treten. Diese Wechselwirkung, sofern man sie diagnostizieren kann, muss nicht notwendigerweise bidirektional funktionieren. Illustrativ seien hier die Einwegspiegel genannt, die zur Abgrenzung von Vernehmungs- und Beobachtungsräumen aus Kriminalfilmen bekannt sind. Auf den selektiven Charakter, den solche Schnittstellen besitzen können, verweist Baudrillard

(2007, S. 55f.) in seinen Ausführungen über die Gestaltung des menschlichen Wohnraums:

„Ob nun Verpackung, Fenster oder Wand: das Glas erweist sich als eine Transparenz ohne Übergang: Man blickt hindurch, ohne fassen zu können. Die Zusammenhänge werden transparent und abstrakt. [...] Das Glas bietet zwar Möglichkeiten der rascheren Kommunikation zwischen Innen und Außen, aber zugleich zieht es eine unsichtbare Wand auf, die verhindert, daß diese Verbindung eine wirkliche Öffnung zur Welt wird. [...] Die ganze Welt wird wie ein Bühnenbild an das häusliche Universum angeschlossen.“

Flusser (1992, S. 68) verweist hinsichtlich des Artefakthaften von Wänden auf deren doppelten Charakter als gleichzeitig Gemachtes und Gegebenes: „Obwohl unsere Wände von Menschen gemacht wurden [...], sind sie doch jenen, die zwischen ihnen wohnen, gegeben.“ Diese Differenzierung wird im Zusammenhang mit mentalen Modellen bedeutsam sein.

### 2.3.2 Interaktionsraum

Es wurde oben bereits darauf hingewiesen, dass die Einschränkung des Raumbegriffs auf Räume physikalischer Erstreckung der Vielfalt unterschiedlicher Räume nicht gerecht wird. Insbesondere in der Beschäftigung mit Mensch-Maschine-Interaktion ergibt sich die Notwendigkeit eines weiteren Raumbegriffs, nämlich des Interaktionsraums. Gemeint ist damit nicht die räumliche Erstreckung der Interaktionsmechanismen zwischen Mensch und Computer, also z. B. die Armlänge beim Drücken von Tasten auf einer Tastatur oder beim Bedienen eines Zeigegeräts. Der Interaktionsraum eines Systems wird erzeugt durch die Funktionen und Interaktionsmöglichkeiten, die es seinem Benutzer anbietet, und er wird beschränkt durch Funktionen, die in einem wie auch immer reichhaltigen Funktionsvorrat nicht enthalten sind.

Auch ein Interaktionsraum besitzt Dimensionen, wie sie oben als grundlegende Eigenschaft von Räumen jeglicher Art dargestellt wurden. Diese

## 2 Die Veränderung der Welt

Dimensionen haben aber eben keine physikalische Erstreckung, sondern ergeben sich ebenfalls aus den unterschiedlichen Funktionen. Abhängigkeiten und Bedingungen vor, zwischen und nach unterschiedlichen Funktionen, etwa die Notwendigkeit, mehrere Funktionen in einer bestimmten Reihenfolge anzuwenden oder eine Funktion, deren Gebrauch den einer anderen Funktion verunmöglicht, schränken die Dimensionalität des Interaktionsraums ein.

Um den Interaktionsraum, der durch ein System aufgespannt wird, zu gliedern, bietet Herczeg (2006b, S. 132ff.) sein 6-Ebenen-Modell der Handlungsregulation als Weiterentwicklung der aktivitätstheoretischen Ansätze von Leont'ev (1978) und dem Modell der Ausführungs- und Auswertungsklüfte von Norman (1986) an. Interaktionen zwischen Benutzer und System finden nach Herczogs Modell auf sechs Ebenen statt, die unterschiedliche Komplexitäts- und Abstraktionsstufen der Interaktion beschreiben. Diese sechs Abstraktionsebenen zwischen abstrakten, komplexen *Intentionen* und konkreten, atomaren *Signalen*, also der sensomotorischen Ebene, werden wir in Kapitel 4 im Detail betrachten.

### 2.3.3 Ambienter Raum

Ambiente Räume erscheinen uns zunächst als Räumlichkeiten, die durch technische Mittel mit zusätzlicher Funktionalität angereichert sind. Als ambiente Räume existieren sie nur unter der Gegebenheit dieser Technik und ihrer Wirkungen im zugrunde liegenden Raum. In Anlehnung an Baudrillard (1994) lässt sich also sagen, dass ambienter Raum *simulierter Raum* ist, der den „echten“ Raum überlagert, gleichgültig, ob es sich dabei schwerpunktmäßig um einen physikalischen Raum, einen Interaktionsraum oder verschiedene teilige Zusammensetzungen daraus handelt.

Der ambiente Raum überdeckt die ihm zugrunde liegenden Räume jedoch nicht, und erst recht ersetzt er sie nicht. Er bildet vielmehr eine Art *Meta-Raum*, der die ihm zugrunde liegenden Räume transparent durchdringt. Interaktionen bleiben auch in der Simulation des ambienten Raums echte Interaktionen.

*Kollaps von Raum und Zeit*

Ubiquitous Computing und Pervasive Computing ermöglichen ein früher ungekanntes Maß an „Sofortness“ (Glaser, 2007; Lobo, 2011), d. h. an allgegenwärtiger und unmittelbarer Verfügbarkeit von Information und Interaktion. Diese lässt räumliche und zeitliche Strukturen, anhand derer wir uns in der Welt orientieren, kollabieren. Räumliche und zeitliche Distanzen dienen uns seit frühester Kindheit dazu, unsere Erschließung der uns umgebenden Welt zu strukturieren und uns darin zu orientieren. Wenn Kommunikation einerseits ohne Zeitverzögerung geschehen kann, andererseits aber beliebig aufzubewahren und zurückzuspulen ist, und dies unabhängig von räumlicher Distanz, dann haben Ereignisse keine Reihenfolge mehr, alles ist jetzt und hier, und die erwähnten Orientierungsrahmen hören auf zu existieren. Virilio (1995) spricht in diesem Zusammenhang von „Nullzeit“, und der Begriff „Nullraum“ bietet sich gleichermaßen an. Die neue Situation ist nicht gleich, aber vergleichbar mit der Verbreitung der Erkenntnis, dass die Erde keine Scheibe ist, wie man jahrhundertlang annahm. Statt der Vorstellung, statt des mentalen Modells einer Erdscheibe erhielten die Menschen jedoch ein Ersatzmodell, nämlich das der Erdkugel<sup>2</sup>. Im Falle der Nullzeit und des Nullraums bietet uns jedoch niemand ein alternatives Modell an, an dem wir uns stattdessen orientieren und anhand dessen wir unsere Erschließung der Welt strukturieren könnten.

Wie also kann es gelingen, diese „Technolyse“ von Raum und Zeit aufzuhalten oder zumindest selektiv zu umgehen? Eine Möglichkeit könnte in einer Art freiwilliger Selbstbeschränkung der Designer und Entwickler ambienter Systeme bestehen. Wenn diese darauf achten, dass die Grenzen ihrer Systeme (vgl. Abschnitt 2.2) möglichst mit erkennbaren Grenzen von Räumen (oft werden das Räumlichkeiten sein) zusammenfallen, können sie den Systemen damit künstlich eine physische Grenze verleihen, die den

---

<sup>2</sup>Das Modell der Erdkugel illustriert ganz beiläufig eine der wesentlichen Eigenschaften mentaler Modelle, den *Verkürzungsaspekt*. In Wirklichkeit ist die Erde nämlich keine Kugel, sondern an den Polen leicht abgeflacht. Für die meisten Tätigkeiten der meisten Menschen ist diese Tatsache jedoch ohne Belang, weshalb die wesentlich einfachere und kognitiv *sparsamere* Vorstellung einer Kugel ausreichend ist.

## 2 Die Veränderung der Welt

Benutzer bei der Erzeugung seines mentalen Modells unterstützt. Zum Beispiel hat ein Benutzer möglicherweise eine diffuse Vorstellung davon, dass sein intelligentes Eigenheim sein Leben mittels verschiedener Sensoren erfasst, um ihm komfortable Dienstleistungen erbringen zu können. Da er das System aber wahrscheinlich nicht selbst installiert und erst recht nicht selbst gestaltet hat, vergisst er nach einiger Zeit, welche Sensoren genau wo genau welche Daten erheben. In seinem mentalen Modell seines Hauses verschwimmen die Systemgrenzen, weil er sich nicht mehr sicher sein kann, ob das System noch erfassen kann, ob er sich in der Bäckerei zwei Häuser weiter oder an der Tankstelle an der Ecke aufhält. Ein viel stabileres mentales Modell könnte er aufbauen, wenn er sich lediglich merken müsste, dass die Reichweite seines Smart-Home-Systems an seiner Grundstücksgrenze endet und jenseits dieser Grenze, sofern gewünscht, zusätzliche mobile Sensoren oder Schnittstellen zu anderen, externen Systemen erforderlich sind. In Bezug auf sein Haus(-system) existiert der gewohnte Bezugsrahmen von Raum und Zeit also nach wie vor, denn der Benutzer ist sich stets dessen gewahr, ob sein System ihn erfassen kann oder nicht, und wenn er auf dem Weg zur Bäckerei ist, dauert es eine gewisse Zeit vom Verlassen bis zum Wiederbetreten des Erfassungsbereichs.

Die Gesellschaft für Informatik räumt dem planvollen Umgang mit diesen und anderen Herausforderungen, die sich aus der Allgegenwart von Mensch-Computer-Interaktion ergeben, einen hohen Stellenwert ein und identifiziert sie als eine der „Grand Challenges“ der Informatik:

„Die Dienste und ihre Verknüpfungen untereinander sind heute oft nicht verständlich. Eine benutzergerechte Gestaltung der Mensch-Computer-Interaktion bezieht daher auch die genutzten Dienste ein und integriert sie in ein transparentes und verständliches Gesamtkonzept. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Absehbarkeit von Folgen. [...] Idealerweise schaffen Interaktionssysteme während der Nutzung ein Bewusstsein für die Folgen der Interaktion sowie für die Verantwortung des Nutzers für sich und andere.“ (GI, 2014)

*Sind ambiente Räume virtuelle Räume?*

Sind ambiente Räume automatisch *virtuelle Räume*, weil sie aus der digitalen Überlagerung des physikalischen Raums entstehen? Unter virtuellen Räumen verstehen wir alltagssprachlich vollständig künstliche Pseudo-Räume, die nur innerhalb eines Computers existieren und über seine Ein- und Ausgabegeräte zugänglich sind, beispielsweise als Teil eines Computerspiels. Der Begriff des ambienten Raums, soweit unsere bisherigen Definitionsansätze reichen, stellt also keinen virtuellen Raum in diesem Sinne dar, denn er bezieht sich auf ganz reale, physikalisch beschreibbare, meist sogar geografisch oder architektonisch definierte Räume. Turoff (1997) definiert Virtualität „as the potential for a virtual system to become part of the real world.“ In diesem Sinne weisen ambiente Räume Aspekte von Virtualität auf. Zwar sind sie außerhalb eines Computers erfahrbar, und das meist sogar ohne weitere technische Hilfsmittel wie Virtual-Reality-Brillen (sic), aber ihre Eigenschaften als ambienter Raum werden technisch erzeugt. Die auf S. 18 beschriebene Überlagerung des „echten“ Raums mit dem „simulierten“ Raum der Interaktion mit dem System rechtfertigt die Bezeichnung „virtuell“ zur Beschreibung des gesamten ambienten Gebildes.

Andererseits werden Räume schon seit Menschengedenken mithilfe technischer Artefakte (und nichts anderes sind ambiente Computersysteme, wenn auch auf vielen Betrachtungsebenen besonders komplexe Vertreter) aufgespannt. Ein einfaches Beispiel ist die primitive Wand, die eine frühgeschichtliche Wohnhütte einfriedet. Man möchte glauben, dass diese Wand Raum lediglich einschränkt, indem sie definiert, was nicht mehr draußen ist. Gleichzeitig jedoch erzeugt sie ein Innen, das vorher nicht existiert hat und das ohne die Wand nicht denkbar ist. Ein an gleicher Stelle errichteter Zaun würde ein anderes Innen erzeugen als eine Wand. Ein weiteres augenfälliges Beispiel ist die Erfindung des Schneeschuhs. Auch er, unzweifelhaft ein technisches Artefakt, spannt Räume auf, nämlich einen winters fußläufig erreichbaren Raum, der vorher nicht oder wenigstens nicht in der nunmehr gegebenen Ausdehnung existiert hatte.

Muss man nun auch diese Räume (und damit letztlich jeden umbauten

## 2 Die Veränderung der Welt

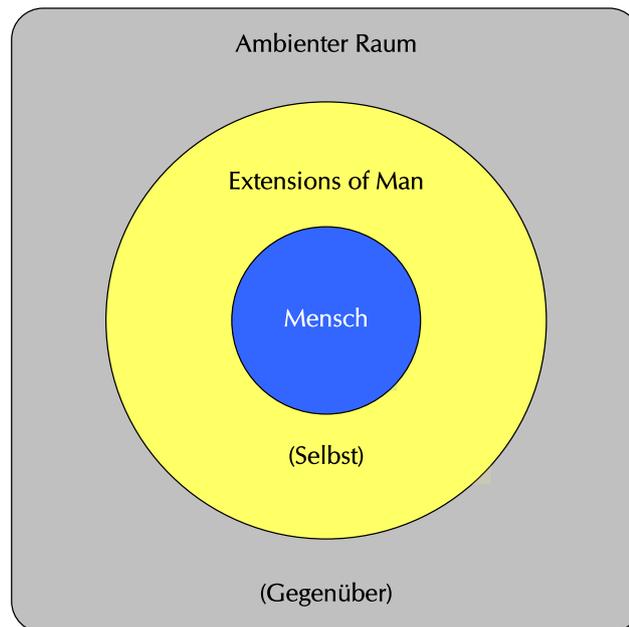


Abbildung 2.1: Der Mensch, seine Werkzeugerweiterungen, ambienter Raum und Welt. Die „Extensions“ gehören zum Selbst, ambienter Raum und Welt bilden ein Gegenüber.

und jeden mit Transportmitteln erschlossenen Raum, also alles) als *virtuell* bezeichnen? Wo liegt dann noch die Abgrenzung, was unterscheidet virtuelle von nicht-virtuellen Räumen? Als ein mögliches Kriterium bietet sich der *ambiente Charakter* eines Raums an. Wie im folgenden Kapitel deutlich werden wird, entsteht ein ambientes System nicht einfach aus der Zusammenwirkung einzelner, in einem Raum verteilter technischer Artefakte. Wesentlicher Bestandteil vieler solcher Systeme sind Komponenten der Künstlichen Intelligenz, und gerade die Emergenz von Eigenschaften, Funktionen und „Verhaltensweisen“ des mit ihrer Hilfe erzeugten ambienten Raums rechtfertigen die Verwendung eines Begriffs von Virtualität in diesem Zusammenhang.

### *Extension vs. Ambienz*

Zum Verhältnis des Menschen zu Erweiterungen seiner Fähigkeiten und zum ihn umgebenden Raum vgl. Abb. 2.1. Klassisches UI-Design und HCI-Forschung beschränken sich auf die „Extensions of Man“ (McLuhan, 1994), die noch zum Eigenen, zum Selbst des Menschen zählen. Raum und Welt bilden das Andere, sie sind dem Menschen ein Gegenüber. Diese Wirkung wird für passive Räume bereits recht gut verstanden. Mit passiven Räumen sind hier nicht nur *statische* Räume gemeint, also solche, die keinerlei Interaktion und Einflussnahme ihres Benutzers zulassen. Auch Räume, die mit klassischen interaktiven Gerätschaften und Infrastruktur ausgestattet sind, z. B. mit Lichtschaltern, Fenstern und Türgriffen, sind passiv in dem Sinne, dass auf sie explizit eingewirkt werden muss, um eine Reaktion des Raums hervorzurufen. Was ist mit aktiven, ambient-digital angereicherten Räumen? Ambiente Räume zeichnen sich in Abgrenzung zu passiven Räumen dadurch aus, dass zumindest die Möglichkeit besteht (aber nicht unbedingt die Notwendigkeit), implizit mit ihnen zu interagieren und somit Reaktionen des Raums zu erhalten, wo gar keine explizite oder sogar keine willentliche oder wissentliche Handlung des Benutzers gegeben ist. Eine nochmalige Steigerung des „Aktivitätspotenzials“ eines Raums ergibt sich, wenn das ambiente Computersystem intelligent oder zumindest smart ist, indem es Methoden der Künstlichen Intelligenz verwendet. Für eine nähere Auseinandersetzung mit diesen Fragen vgl. Kapitel 3.

### 2.4 FAZIT

In diesem Kapitel wurden zwei wichtige Konzepte von *Raum* eingeführt, das des physischen Raums, der die noch genauer zu bestimmenden Benutzer ambienter Systeme umgibt und von ihnen sinnlich erfahrbar ist, und das des Interaktionsraums, den diese Computersysteme jenen Benutzern anbieten. Die Verschränkung beider Räume bildet den *ambienten Raum*, den wir als Bühne für alles, was zwischen menschlichen Benutzern und ambienten Computersystemen vonstatten geht, auffassen können. Nach-

## *2 Die Veränderung der Welt*

dem wir nun eine Vorstellung haben, wo sich unser Stück abspielt, ist es Zeit, uns den Schauspielern auf dieser Bühne zu widmen, nämlich den ambienten Computersystemen und ihren Benutzern. Im folgenden Kapitel werden ambiente Computersysteme näher bestimmt und ihre wesentlichen Eigenschaften dargelegt und abgegrenzt. Den Menschen und ihren mentalen Modellen wenden wir uns anschließend in Kapitel 4 zu, um schließlich zu untersuchen, wie die Interaktion der beiden beschaffen sein muss, damit sie gelingen kann.

Im vorigen Kapitel wurde ein Konzept des ambienten Raums hergeleitet, der sich aus der Verschränkung des physischen Raums, definiert durch seine Zugänglichkeit für menschliche Akteure, mit dem Interaktionsraum ambienter Computersysteme ergibt. Das folgende Kapitel widmet sich der Charakterisierung dieser zweiten, technischen Art von Akteuren, während die menschlichen Akteure in Kapitel 4 wieder fokussiert werden.

Rationalisierungseffekte in der Großserienproduktion lassen die Preise für EDV-Komponenten gemessen an ihrer Leistungsfähigkeit fortlaufend sinken, die Strukturgrößen bei der Herstellung integrierter Schaltungen schrumpfen beständig und Techniken zur kabellosen Datenübertragung werden immer zuverlässiger und energieeffizienter. Diese Entwicklung ermöglicht es, den Einsatz von Computern völlig neu zu denken. Eine Vielfalt sowohl expliziter Ein- und Ausgabegeräte als auch impliziter Sensorik ermöglicht es ambienten Systemen, mit Verfahren der Künstlichen Intelligenz Situationen zu erfassen, zu interpretieren und darauf abgestimmte Operationen auszuführen. Diese intelligenten oder smarten Systeme eröffnen neue Einsatzbereiche der Computertechnik beispielsweise zur Unterstützung alter Menschen in ihrem Wohnumfeld (Salces u. a., 2006), zur Überwachung der Vitalfunktionen Kranker (Choi u. a., 2008) o. ä. Auch im Zusammenhang mit der zunehmenden Computerisierung von Transportmitteln wie Autos (Coelingh u. a., 2010) oder Flugzeugen (Stengel, 1993) gewinnt der Begriff des ambienten Systems an Bedeutung. Die dort eingesetzten Systeme sind nicht immer von vornherein als Computersysteme erkennbar, sondern augmentieren vorhandene Funktionalitäten der Artefakte und

fügen ihnen eine Eigenintelligenz hinzu, die dem Bediener kommuniziert und derer er gewahr gemacht werden muss.

Die in den letzten Jahren rapide gewachsene wissenschaftliche und technische Auseinandersetzung mit dem Themenkomplex „ambiente Systeme“ brachte eine Vielzahl von Begrifflichkeiten hervor, die zum Teil nur sehr unscharf definiert sind und deren semantischer Gehalt sich häufig überlappt. Die Entwicklung exakter, eindeutiger Begriffe und Definitionen tut daher not. Der zentrale Begriff, den wir für unsere weitere Auseinandersetzung mit der Thematik klären müssen, ist der des *ambienten Systems* selbst, genauer: des intelligenten ambienten Computersystems. Um als solches zu gelten, muss ein System bestimmte Kriterien erfüllen.

Bevor die einzelnen Komponenten des Begriffs „intelligentes ambientes System“ diskutiert werden können, um daraus eine Arbeitsdefinition für das Gebiet der vorliegenden Arbeit abzuleiten, muss eine Abgrenzung zu den verwandten Begriffen *Pervasive Computing* und *Ubiquitous Computing* vorgenommen werden, um Missverständnisse in den folgenden Kapiteln zu vermeiden. Danach widmen wir uns dem Begriff Intelligenz, wobei hier die Frage lautet, welchen Begriff wir zur Betrachtung unseres Themas als geeignet auffassen und warum. Schließlich bleibt noch der Begriff des Systems (vgl. Abschnitt 2.2) übrig, der insbesondere unter dem Blickwinkel der hier gegebenen Unschärfe der Grenzziehung zwischen System und Umwelt aufgrund der dynamischen Inklusion und Exklusion, das heißt in Bezug auf die Frage, wann ein (ambientes) System aus welchen Komponenten beschaffen ist, erörtert wird.

Im Anschluss an die Klärung des Begriffs intelligentes ambientes System folgt die Darstellung des Konzepts der drei Ebenen abnehmender Ambienz. Dieses Modell geht von Abstufungen zwischen dem perfekt ambienten und dem rein mechanistisch-werkzeughaften Charakter eines Systems aus, die helfen, flexibel auf unterschiedliche Randbedingungen der Interaktion zwischen Mensch und System zu reagieren.

#### 3.1 UBIQUITOUS COMPUTING UND PERVASIVE COMPUTING

Bevor *ambiente Systeme* und *Ambient Intelligence* als Phänomen des beginnenden 21. Jahrhunderts in Erscheinung traten, waren Ubiquitous und Pervasive Computing in aller Munde. Alle diese Begriffe stehen in einem gewissen Zusammenhang, der im Folgenden kurz dargestellt wird.

Alle drei werden häufig im wissenschaftlichen Diskurs verwendet, dies aber oftmals deutlich weniger trennscharf (vgl. etwa Lafuente-Rojo u. a., 2007, S. 8), als es wünschenswert wäre. Der Zweck der vorliegenden Arbeit liegt allerdings nicht darin, mit dieser begrifflichen Unklarheit endgültig aufzuräumen, sondern ist darauf beschränkt, Begriffe herauszuarbeiten, deren Verwendungsweise hinsichtlich der hier diskutierten Thematik am tragfähigsten ist.

Die im fachlichen, aber zunehmend auch im alltagssprachlichen Diskurs anzutreffenden Begriffe *Ubiquitous Computing* und *Pervasive Computing* haben bei aller Nähe durchaus unterschiedliche Konnotationen. Der Begriff Pervasive Computing wird vor allem im Sinne technischer Durchgängigkeit zwischen unterschiedlichen computerbasierten Anwendungen und Gadgets verwendet, d. h. in Bezug auf die Verfügbarkeit unproblematischer Schnittstellen zwischen diesen Systemen (Saha und Mukherjee, 2003). Bei Pervasive Computing geht es also vor allem um die *technische Basis*. Ubiquitous Computing hingegen bezieht sich auf die Durchdringung etlicher Bereiche der Lebenswelten vieler Menschen mit der Nutzung computerbasierter Systeme und Dienste (Weiser, 1991). Der Fokus liegt dabei vornehmlich auf der Sichtbarkeit dieser Systeme und Dienste sowie den Möglichkeiten, die sie ihren Benutzern bieten, während die Verfügbarkeit geeigneter Schnittstellen häufig vorausgesetzt wird. Es geht also primär um *Anwendungen*. Der Begriff *Internet of Things* (IoT) vereinigt diese beiden Sichten und umfasst sowohl die Allgegenwart digitaler Artefakte und Dienste als auch die Existenz von Netzwerk(en) und Schnittstellen, durch die diese „Things“ miteinander verbunden sind (Atzori u. a., 2010).

Als Computer noch millionenteure, tonnenschwere Großrechner mit dem Elektrizitätsbedarf einer Kleinstadt waren, bekamen einzelne Benutzer bes-

tenfalls Bildschirm und Tastatur als Terminal zur Verfügung, falls sie ihre Anwendungen nicht sogar als Batch-Jobs formulieren und von Administratoren nicht-interaktiv zeitversetzt ausführen lassen mussten. Es folgte das Zeitalter der Personal-Computer, mit denen die Berechnungen nicht nur interaktiv, sondern direkt am Schreibtisch des Benutzers ausgeführt werden konnten. Diese Verkleinerung und bezahlbare Preise ermöglichten erstmals auch das Vordringen der Computertechnik in Privathaushalte und ihre Nutzung zu Unterhaltungs- und privaten Kommunikationszwecken. Der Terminus *Pervasive Computing* bezieht sich nicht nur auf die Tatsache, dass aufgrund immer kleinerer Fertigungsstrukturen und höherer Integrationsdichte von Computerkomponenten diese immer preiswerter und dadurch in großen Mengen für einzelne Teilanwendungen nutzbar werden. Vielmehr ergibt sich darüber hinaus durch die Entwicklung digitaler Funktechniken der dritten und vierten Generation wie UMTS und LTE ein „Überall-Internet“ und damit zumindest die Möglichkeit der umfassenden Vernetzung der einzelnen Rechnerknoten, die durch die Standardisierung von Kommunikationsprotokollen und Beschreibungssprachen zusätzlich unterstützt wird.

Ubiquitous Computing bezeichnet die zunehmende Durchdringung des alltäglichen Lebens mit Datenverarbeitung und computerisierten Schnittstellen zu technischen und sozialen Systemen. Im Gegensatz zu *Pervasive Computing* ist hier also nicht die Allgegenwart der Rechner und ihrer Schnittstellen und Kommunikationsnetze gemeint, sondern die Durchdringung der Lebenswelt des Einzelnen mit der Nutzung computerbasierter Anwendungen und der Integration derselben in selbstverständliche, alltägliche Szenarien. Ubiquitous Computing bedeutet aber nicht vorrangig, dass klassische PCs außer in Arbeitskontexten auch immer häufiger in privaten Räumen und Verwendungskontexten anzutreffen sind. Obgleich der Markt für herkömmliche Desktop- und Laptop-Rechner nach wie vor wächst, geht der Trend doch eindeutig in eine andere Richtung, nämlich hin zu mobilen Endgeräten, die durch den Verzicht auf maus- und tastaturbasierte Eingabe und die Entwicklung neuer Eingabeparadigmen wie Multitouch- und Gestensteuerung sowohl für heimische wie auch für mobile Benutzung ge-

### 3.2 Begriffsklärung „intelligentes ambientes System“

eignet sind. Die äußerst preiswerte Verfügbarkeit von Smartphones nebst entsprechenden Datentarifen ist sicherlich der hervorstechendste Indikator für die Allgegenwart von Computernutzung in den westlichen Gesellschaften des 21. Jahrhundert.

„This then is Phase I of ubiquitous computing: to construct, deploy, and learn from a computing environment consisting of tabs, pads, and boards. This is only Phase I, because it is unlikely to achieve optimal invisibility. (Later phases are yet to be determined.)“ (Weiser, 1993, S. 76f.)

In den beiden Jahrzehnten seit Weisers Diagnose hat sich nicht nur gezeigt, dass die tatsächliche Durchsetzung dieser „Phase I“ wesentlich länger dauerte als angenommen, sondern dass der Eintritt in eine zweite Phase „unsichtbarer“ Computer teilweise parallel zur Entfaltung der Phase I verlief. Ein augenfälliges Beispiel dafür ist die Präsenz computergestützter, interaktiver Assistenzsysteme in Automobil-Cockpits, ohne dass deren „Computerhaftigkeit“ unmittelbar erkennbar wäre.

Die drei Begriffe Ubiquitous Computing, Pervasive Computing und Internet of Things bezeichnen also keineswegs die gleichen Phänomene, sondern setzen durchaus unterschiedliche Schwerpunkte. Der Begriff der *ambienten Systeme* ist mit den vorgenannten Begriffen ebenfalls eng verwandt, bezieht sich aber auf eine andere Betrachtungsebene. Im Fokus stehen hier nicht technische Plattformen oder Anwendungsszenarien, sondern die *Art der Nutzung* solcher Systeme. Genauer gesagt unterscheiden sich ambiente Systeme von herkömmlichen Computersystemen durch eine neue Art *impliziter Interaktion*.

### 3.2 BEGRIFFSKLÄRUNG „INTELLIGENTES AMBIENTES SYSTEM“

Im Folgenden wird der Begriff des intelligenten ambienten Computersystems genauer untersucht, um daraus eine Arbeitsdefinition zu entwickeln. Der Begriff setzt sich aus drei Elementen zusammen, nämlich Ambienz, Intelligenz und System, die zunächst getrennt betrachtet werden.

### 3 *Ambiente Systeme*

#### 3.2.1 *Ambienz*

Bezeichnet man ein Computersystem als *ambient*, so ist damit üblicherweise gemeint, dass es nicht in Form eines klassischen PCs oder Terminals als abgeschlossene Einheit an einem klar bestimmbar Ort wie einem Schreibtisch existiert. Vielmehr besitzen ambiente Systeme eine gewisse räumliche Ausdehnung und umfassen beispielsweise einen einzelnen Raum, eine Wohnung, ein ganzes Gebäude oder den urbanen Raum einer Stadt. Diese grundlegende Eigenschaft ambienter Systeme erschließt sich auch aus der Etymologie des Begriffs (von lat. *ambire* – umgeben, um etwas herum reichen). Merriam-Webster Online<sup>1</sup> definiert das Adjektiv „ambient“ als „existing or present on all sides, encompassing“. Obwohl ein ambientes System grundsätzlich auch aus einem einzelnen „großen“ Rechner klassischer Bauart bestehen kann, an den räumlich verteilte Sensoren und Aktuatoren direkt angeschlossen sind, setzen sich solche Systeme häufig aus einer Vielzahl kleiner, funktionspezifischer Rechnerknoten zusammen, die in einem Netzwerk untereinander kommunizieren können und erst in ihrer Gesamtheit das ambiente System bilden.

Was unter ambientem Raum zu verstehen ist, wie er entsteht und sich zusammensetzt, wurde im vorigen Kapitel bereits ausgeführt. Nun ist aber nicht jedes System, das sich in einem Raum erstreckt und damit ambienten Raum erzeugt, ein ambientes Computersystem im Sinne dieser Untersuchung. Vielmehr können Computersysteme auf viele Arten ambient sein oder ambienten Charakter haben. Pousman und Stasko (2006) bezeichnen als „ambient information systems“ solche Systeme, die

- bedeutsame, aber unkritische Informationen anzeigen,
- von der Peripherie der Wahrnehmung in deren Fokus und wieder zurück rücken können,
- dinghafte Repräsentationen in der Umgebung besitzen,
- neue Informationen durch subtile Veränderungen anzeigen und

---

<sup>1</sup><http://www.merriam-webster.com/dictionary/ambient>

### 3.2 Begriffsklärung „intelligentes ambientes System“

- ästhetisch und ihrer Umgebung angemessen sind.

Wie wir sehen werden, ist ein System keineswegs entweder vollständig ambient oder überhaupt nicht. Systeme können kontextabhängig in Teilen ihre ambiente Funktionsweise aufgeben, um den unterschiedlich beschaffenen mentalen Modellen ihrer Benutzer (vgl. Kapitel 4) gerecht zu werden. Wie diese Anpassungen konzeptuell zu fassen sind und ob wir in der Praxis statt von ambienten Systemen nicht besser von ambienten Aspekten unserer Systeme sprechen sollten, ist Gegenstand des Abschnitts 3.3.

Die Entwicklung ambienter Systeme äußert sich nicht nur in der Anreicherung des Raumes mit neuen, speziell entwickelten Sensoren, Aktuatoren und Rechnerknoten. Auch vormals analoge, nicht computerisierte Artefakte werden mit neuer, digitaler Funktionalität versehen und bilden so die *dinghafte Repräsentation* des Systems, die Pousman und Stasko (2006) beschreiben. Welche Formen dieser digitalen Vereinnahmung ehemals analoger Artefakte lassen sich differenzieren und wie unterscheiden sie sich aus Sicht des Benutzers? Bestehende Artefakte können mit digitaler Funktionalität entweder *augmentiert* oder *überladen* werden. Unter *Augmentierung* soll eine Anreicherung oder Ergänzung der ursprünglichen Funktionalität verstanden werden, deren Ergebnis ein analog-digitaler Hybrid ist. *Überladung* hingegen meint den Ersatz der bisherigen Funktionalität, so dass das Ergebnis dieses Prozesses zwar oberflächlich einem bereits bekannten Artefakt ähnelt, aber ausschließlich die neue, digitale Funktionalität umsetzt.

In beiden Fällen, bei der *Augmentierung* ebenso wie bei der *Überladung*, lassen sich wiederum zwei Ausprägungen der digitalen Funktionalität differenzieren. Gemeint ist damit, ob die neue Funktionalität gewissermaßen ein digitales Äquivalent der früheren analogen Funktionalität darstellt (z. B. ein Thermometer, das seine Messwerte drahtlos an das System überträgt) oder ob sich analoge und digitale Funktionalität wesentlich unterscheiden und sich nur im selben „Gehäuse“ befinden (z. B. eine Kaffeetasse, die Körpertemperatur und Pulsfrequenz des Benutzers an das System meldet).

Insbesondere letzterem Fall stellt sich die Frage, inwieweit und wodurch der Nutzer die Existenz und das Wesen der neuen, digitalen Funktionalität

erkennen kann. Diese Frage nach den Affordanzen, die dem Nutzer zur Verfügung gestellt werden, wird in Kapitel 6 aufgegriffen und ausführlicher erörtert. An dieser Stelle liegt der Schwerpunkt der Betrachtung auf der *Art der Interaktion*.

Wirkte der Benutzer bisher mit einer willentlichen und wissentlichen Handlung explizit auf ein Computersystem ein und konnte im Gegenzug eine ebenso explizite Ausgabe des Systems erwarten, verschwindet die Interaktion mit einem ambienten System hinter der (möglicherweise expliziten) Interaktion mit den Artefakten, in denen die verteilten Systemknoten, Sensoren und Aktuatoren eingebettet sind.

Die Interaktion mit einem ambienten System erstreckt sich damit nicht nur räumlich durch die Verteiltheit der einzelnen Systemknoten, sondern auch zeitlich aufgrund der Zusammensetzung einer impliziten Systemeingabe aus möglicherweise zahlreichen einzelnen Handlungen, die von Benutzerseite überhaupt nicht als Systemeingabe gedacht sind, oder der länger andauernden stillschweigenden Beobachtung des Benutzers durch die Sensoren des Systems. „‘Implicit interactions’ – those that occur without the explicit behest or awareness of the user – will become increasingly important as human-computer interactions extend beyond the desktop computer into new arenas“ (Ju und Leifer, 2008). Vgl. dazu auch Kapitel 6.

In Anbetracht der vielfältigen Einflussfaktoren, die sich auf den ambienten Charakter eines Systems auswirken, stellt sich die Frage, ob wir überhaupt von *der* Ambienz als ganzheitlicher Eigenschaft ausgehen sollten. Gewisse Aspekte, I/O-Kanäle, (Einzel-)Funktionen können ambient sein, andere sind es möglicherweise nicht. Sollten wir daher nicht eher von ambienten Aspekten unserer Systeme sprechen? Zu den zahlreichen anderen Faktoren, die sich auf die Interaktion zwischen Benutzern und unseren Systemen auswirken, gehören unscharfe Randbereiche dessen, was noch zum System gerechnet wird, dessen *teilweise* Unsichtbarkeit und besonders die impliziten Interaktionen. Dennoch bilden fehlende oder schwache Affordanzen eines der Hauptprobleme im Umgang mit ambienten Systemen. Bevor wir diese Aspekte genauer betrachten, widmen wir uns zunächst dem Begriff der Intelligenz.

### 3.2 Begriffsklärung „intelligentes ambientes System“

#### 3.2.2 Intelligenz

Auch eine Beschreibung dessen, was wir mit dem Wort „Intelligenz“ meinen, ist notwendige Voraussetzung für die Charakterisierung unseres Gegenstandes. Dazu sei vorab bemerkt, dass dies keine Arbeit über Künstliche Intelligenz (KI) oder Robotik ist. Selbstverständlich reden wir im Zusammenhang mit intelligenten ambienten Systemen von Künstlicher Intelligenz, gleichwohl geht es dabei weniger um die Entwicklung neuer Algorithmen und Schlussverfahren als vielmehr um die Frage, welche Verhaltensmuster ein ambientes System in den Augen seiner Benutzer als intelligent erscheinen lassen und wie dieser Eindruck zu erzielen ist.

Nicht nur unterscheidet man die Künstlichen Intelligenzbegriffe in *starke und schwache KI*, sondern außer von intelligenten ist auch immer häufiger die Rede von „smarten“ Produkten, Umgebungen oder einfachen Systemen. Wie verhalten sich diese Intelligenzbegriffe und Smartness zueinander? Brauchen wir für die implizite Interaktion mit ambienten Systemen das eine oder genügt uns das andere? Diesen Fragen widmen wir uns im Folgenden.

#### *Starke vs. schwache KI*

Eine wesentliche Unterteilung des Gebiets der Künstlichen Intelligenz ist die zwischen *starker und schwacher KI*. Ziel der starken KI ist die Modellierung *menschlicher Strategien* der Problemlösung und die Entwicklung von Systemen, die „echte“ Intelligenz besitzen, wie sie in Menschen zu finden ist. Solche Systeme müssten entsprechend ihren Vorbildern dann auch Bewusstsein und Emotionen aufweisen. Die Vorstellung, dass dies möglich sei, hat ihre Wurzeln im Bild des Menschen als Maschine, das im Zeitalter der Aufklärung entstand (vgl. etwa de la Mettrie, 2009). Heute entspricht dem das Bild, dass der menschliche Geist eine Art Software sei, die auf der Hardware des menschlichen Gehirns laufe.

Die schwache KI konzentriert sich hingegen auf die Lösung konkreter Anwendungsprobleme. Die Schaffung echter Intelligenz ist dafür nicht vonnöten, die Systeme müssen nur in der Lage sein, für die Lösung der ih-

nen gestellten Aufgaben so zu handeln, „als ob“ sie intelligent wären. Diese Einschränkung hinsichtlich der Intelligenz bedeutet allerdings nicht notwendigerweise eine Einschränkung der Problemgröße: Auch auf dem Gebiet der schwachen KI wurden durchaus Versuche unternommen, „universelle Problemlöser“ (ein Klassiker etwa Newell u. a., 1959) zu entwickeln. Für eine ausführliche Diskussion unterschiedlicher Schulen der Künstlichen Intelligenz vgl. Russell und Norvig (2002).

#### *Emergenz*

Mit der Vorstellung von Intelligenz eng verknüpft ist der Begriff der Emergenz (von lat. *emergere* – auftauchen, emporsteigen). Er bezeichnet das Entstehen von Phänomenen, die sich nicht aus dem vorherigen Zustand eines Systems und den Zusammenhängen seiner Bestandteile erklären lassen. Eine populäre Formulierung ist: „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“. Man spricht demgemäß auch von *Übersummativität*. Die Entstehung von Bewusstsein und Emotionen im menschlichen Gehirn, einem System aus einer genügenden Anzahl relativ primitiver Neuronen und synaptischer Verknüpfungen zwischen ihnen, lässt sich als emergentes Phänomen begreifen. Die Vorstellungen von starker und schwacher Künstlicher Intelligenz korrelieren mit entsprechenden starken und schwachen Begriffen von Emergenz.

Damit ist gemeint, dass ein emergentes Phänomen entweder tatsächlich unmöglich aus seinen Voraussetzungen erklärt werden kann oder aber dass dies nur mangels hinreichend genauer Kenntnis der Voraussetzungen und Zusammenhänge praktisch nicht möglich ist. Das klassische Beispiel für Emergenz ist gleichzeitig eines für schwache Emergenz schlechthin: der Laplacesche Dämon. Der Mathematiker Laplace (1932) formulierte 1814 die Vorstellung einer Intelligenz (besagten „Dämons“), die umfassend genug sei, die Position aller Teilchen im Universum sowie alle Naturgesetze, die auf sie einwirken, zu kennen, und diese Bedingungen außerdem noch zu begreifen. Dieser Dämon wäre in der Lage, alle vorherigen und nachfolgenden Zustände des Universums und aller Phänomene darin zu erklären.

### 3.2 Begriffsklärung „intelligentes ambientes System“

Echte, d. h. starke Emergenz ist in dieser Vorstellung unmöglich und die Existenz scheinbar unerklärbarer Phänomene nur der Tatsache geschuldet, dass im konkreten Fall keine hinreichenden Kenntnisse über Bedingungen und Zusammenhänge gegeben sind. Verschiedene mathematisch-physikalische Einwände gegen Laplaces Gedankenexperiment sind lediglich praktischer Natur, während verbreitete Deutungen der Quantentheorie (Faye, 2014) von der Existenz echten Zufalls auf Quantenebene ausgehen und damit auch echte, starke Emergenz möglich erscheinen lassen.

Im Zusammenhang mit der Konstruktion ambienter Systeme geht es um die Lösung konkreter Anwendungsprobleme. Deshalb ist es letztlich unerheblich, ob die KI-Komponenten eines intelligenten ambienten Systems echte, starke Emergenz und damit Intelligenz schaffen können oder nicht.

#### *Intelligenz vs. Smartness*

Bei einer benutzerzentrierten Sichtweise kommt es darauf an, dass sich das Verhalten des Systems aus Benutzersicht nicht trivialerweise aus den Eingaben ergibt (im Sinne einer schwachen Emergenz). Solange das Systemverhalten in dieser Weise „neu“ und gewissermaßen unvorhersehbar ist, kann das System für unsere Zwecke als intelligent bezeichnet werden.

Interessanterweise ergibt sich eine gewisse Emergenz des Systemverhaltens bereits aus der Tatsache, dass bei ambienten Systemen zumindest ein Teil der Mensch-Computer-Interaktion implizit abläuft (vgl. Abschnitt 3.2.1), sodass der Benutzer sich z. B. im Fall eines sehr unauffälligen automatischen Sensors potenziell nicht bewusst ist, dass überhaupt eine Eingabe erfolgt ist. Im einfachsten Fall scheinbar emergenten Systemverhaltens sind also nicht einmal Methoden der schwachen KI wie maschinelles Lernen, Case-based Reasoning oder wenigstens ein einfaches, fixes Produktionsregelsystem nötig. Wichtig für den subjektiven Eindruck von Intelligenz ist vielmehr, dass einfache Ursache-Wirkung-Zusammenhänge als Erklärungsmuster versagen und eine gewisse „Magie“ im Systemverhalten zu liegen scheint. Für solche Fälle bietet sich der Begriff der *Smartness* an: Der Benutzer gewinnt den subjektiven Eindruck eines intelligenten Systems,

### 3 *Ambiente Systeme*

ohne dass dieses objektiv irgendwelche Eigenschaften besitzen muss, die typischerweise als (künstliche) Intelligenz bezeichnet werden. Vgl. dazu auch Herczeg (2010).

Solange alles funktioniert, erscheinen „smarte“ Systeme aus Benutzerperspektive ebenso schnell intelligent, wie sie bei Versagen dumm erscheinen. Im Gegensatz zur „echten“ Künstlichen Intelligenz handelt es sich bei Smartness um ein rein phänomenologisches Konzept, sodass solche Systeme im Fehlerfall nicht notwendigerweise dem Prinzip der *graceful degradation* folgen müssen. Damit ist gemeint, dass ein teilweises Versagen des Systems die Funktionalität des übrigen Systems möglichst wenig beeinträchtigt. Auch hier zeigt sich eine Parallele zur Magie: Sobald dem menschlichen Magier während eines Zaubertricks eine seiner Spielkarten aus dem Ärmel fällt, ist es um dessen Magie ebenso geschehen. Ein frühes Beispiel für ein smartes System in diesem Sinne ist ELIZA (Weizenbaum, 1966), die oberflächliche Simulation eines Psychotherapeuten, der natürlichsprachlich mit seinem menschlichen Gegenüber interagiert. Die dahinter liegenden Mechanismen lassen sich bei einfachen Implementierungen jedoch in thematische Schleifen locken, wodurch die Magie der Interaktion augenblicklich zusammenbricht. Magie und Smartness bedeuten also für den Zuschauer bzw. Benutzer, bereit zu sein, sich auf die Oberflächlichkeit funktionierender Lösungen einzulassen. Manchmal gibt es keine Alternative, weil die Benutzer die wahren Mechanismen im Hintergrund gar nicht verstehen *können*, manchmal *wollen* sie dies aber einfach nicht.

#### 3.2.3 *System*

Neben den allgemeinen Eigenschaften von Systemen, die in Abschnitt 2.2 bereits beschrieben wurden, weisen ambiente Systeme einige Besonderheiten auf. Der Begriff System (von altgriech. *sýstema* – das Gebilde, Zusammengestellte, Verbundene) deutet bereits auf eine *Mehrteiligkeit* hin, die auch ambiente Systeme aufweisen, die sich aber von derjenigen unterscheidet, die z. B. ein einzelner Laptop-PC oder in gewissem Sinne auch ein Schreibtischrechner, der durchaus aus mehreren Komponenten besteht,

### 3.2 Begriffsklärung „intelligentes ambientes System“

aufweist. Die Mehrteiligkeit des ambienten Systems liegt in dessen Zusammensetzung aus mehreren verteilten Sensoren, Aktuatoren und Rechnerknoten im Sinne des Pervasive Computing (vgl. Abschnitt 3.1) begründet. Diese spezielle Art der Zusammengesetztheit hat Auswirkungen auf den Begriff des Systems, indem sie zu einer Unschärfe der Grenze zwischen System und Umwelt führt, wie weiter unten beschrieben wird. Auch kann die digitale Funktionalität, bei Computersystemen üblicherweise die Hauptsache, bei einzelnen Artefakten ambienter Systeme im Hinblick auf die Gesamtfunktionalität des Artefakts eine untergeordnete Rolle spielen, nämlich dann, wenn der Fall einer *Augmentierung* (vgl. Abschnitt 3.2.1) eines bereits zuvor existierenden Artefakts gegeben ist, das dabei seine analoge Funktionalität behält.

Ambiente Computersysteme besitzen wie jedes andere System eine Grenze im Sinne der Systemtheorie (vgl. Abschnitt 2.2), die das, was zum System gehört, von dessen Umwelt abgrenzt. Während jedoch bei einem herkömmlichen Computersystem jederzeit klar angebbar ist, ob dieser Bildschirm oder jene Tastatur zum System gehört oder nicht, verschwimmt die Systemgrenze bei ambienten Systemen zusehends. Gemeint ist hier weniger die Erkennbarkeit dieser Grenze für den Benutzer. Dieser Aspekt und seine Auswirkungen auf die Ausbildung adäquater mentaler Modelle beim Benutzer werden in Kapitel 4 behandelt. Hier geht es um die *tatsächliche* Existenz der Systemgrenze, die bei ambienten Systemen in verschiedenerlei Hinsicht eher den Charakter einer „semipermeablen Membran“ annimmt als den einer stabilen Abtrennung.

Ein Grund für die Unschärfe der Grenze zwischen ambientem System und Umwelt liegt in der zugrunde liegenden Vernetzungslogik (Estrin u. a., 2002). Die teils mobilen oder in andere Artefakte eingebetteten Knoten sind nicht statisch verschaltet, sondern Teil sich dynamisch rekonfigurierender Netzwerke. Knoten werden ein- und ausgeschaltet, betreten und verlassen den Bereich eines WLANs, auf mobilen Endgeräten werden Apps, die Systemfunktionalität bereitstellen, gestartet und beendet oder Kontext-

Firewalls wie Ambient Dynamix<sup>2</sup> (Carlson und Schrader, 2012) gewähren und unterbinden kontextabhängig die Verwendung von Sensordaten. Die Inklusions- und Exklusionsmechanismen, die die Grenzziehung zwischen System und Umwelt bedingen, sind hier also in hohem Maße dynamisch.

Ein weiterer Grund für die unscharfen Systemgrenzen liegt in der laufenden Veränderung der einzelnen Systemkomponenten selbst, sogar wenn diese zu einem gegebenen Zeitpunkt eindeutig Teil des Systems sind. Solche Veränderungen entstehen beispielsweise durch Updates der Software eines existierenden Knotens, die vorhandene Funktionalität modifizieren oder neue Funktionalität in das System einbringen. So könnte z. B. eine KI-Komponente um neue Schlussverfahren erweitert werden oder ein Mikrofonknoten zur Sprechererkennung durch bessere Algorithmen eine höhere Erkennungsrate erzielen. Eine weitere Form der Veränderung existierender Systemstrukturen besteht im Austausch von Teilen z. B. der Sensorik durch gleichartige, aber verbesserte Bauteile. Im gerade verwendeten Beispiel könnte es sich um eine Mikrofonkapsel mit höherer Empfindlichkeit handeln.

Die Unschärfe der Grenze zwischen ambientem Computersystem und Umwelt ändert jedoch nichts an der Abgrenzung selbst, weswegen wir auch weiterhin von Systemen sprechen können. Weil ambiente Systeme Grenzen haben, haben sie eine Umwelt, die aus allem besteht, was nicht zum System gehört. Da diese Umwelt zu groß ist, um praktisch-funktional auf sie Bezug nehmen zu können, muss sie hinsichtlich der für das Funktionieren des Systems relevanten Aspekte gefiltert werden. Das heißt, der gerade relevante Kontext muss identifiziert werden, um im Handeln darauf Bezug nehmen zu können:

„We use the term *context* to mean any identifiable configuration of environmental, mission-related and agent-related features that has predictive power for an agent’s behavior. The term *situation* is used to refer to the entire set of circumstances surrounding an agent, including the agent’s own internal state. Context

---

<sup>2</sup><http://ambientdynamix.org/>

### 3.2 Begriffsklärung „intelligentes ambientes System“

is thus the elements of the situation that should impact behavior.“ (Turner, 1998, Herv. i. Orig.).

Die beteiligten Agenten müssen also context-aware sein, um darauf aufbauend kontextsensitiv handeln zu können. Da dieses Thema für die ambienten Systeme und für ihre Benutzer gleichermaßen relevant ist, wird es in Kapitel 5 gesondert behandelt.

#### 3.2.4 Arbeitsdefinition

Aus den obigen Ausführungen zu den einzelnen Bestandteilen des Begriffs „intelligentes ambientes System“ kann folgende Arbeitsdefinition für die weitere Auseinandersetzung mit dem Thema hergeleitet werden:

*Intelligente ambiente Computersysteme* sind (1) Konfigurationen von Artefakten, die (2) zumindest teilweise digitale Funktionalität aufweisen, (3) mit ihren Benutzern zumindest teilweise implizit interagieren, (4) während sich diese Interaktion ggf. zeitlich und räumlich erstreckt, und die (5) dabei emergentes Verhalten zeigen.

Die Punkte 1 und 2 beziehen sich auf das Computersystem, die Punkte 3 und 4 auf seinen ambienten Charakter und Punkt 5 schließlich auf den Aspekt der Intelligenz. Diese Definition deckt sich im Wesentlichen mit den Kriterien von Aarts und Encarnação (2006, S. 2):

„**integration** through large-scale embedding of electronics into the environment

**context-awareness** through user, location, and situation identification

**personalization** through interface and service adjustment

**adaptation** through learning

**anticipation** through reasoning“

### 3 *Ambiente Systeme*

#### 3.3 FUNKTIONSEBENEN INTELLIGENTER AMBIENTER SYSTEME

Bisher war in dieser Arbeit immer einfach von ambienten Systemen die Rede, und damit waren perfekt ambiente Systeme in dem Sinne gemeint, dass sie sich idealerweise vollständig in eine Umgebung integrieren und die Interaktion zwischen ihnen und ihren Benutzern vollständig implizit abläuft. Weiter oben wurde dieser Fall der vollständig impliziten Interaktion zwischen Nutzer und System als optimal hinsichtlich des ambienten Charakters des Systems postuliert. Im Sinne praktischer Anwendbarkeit solcher Systeme muss dessen Ambienz aber nicht perfekt sein, sondern nur hinreichend für die Bereitstellung gewisser Dienste. Perfekte Ambienz ist eher theoretischer Natur, soll uns aber im Kontext der vorliegenden Arbeit als Maßstab dienen. Es gibt Potenziale, die der Benutzer gar nicht erkennen muss, z. B. dass seine Heizung die Wohnung auf 30 °C heizen kann, welche Motorkennlinien oder Fahrwerksparameter sein Auto kennt etc.

Das Gegenteil dieser perfekt ambienten Systeme bilden klassische Werkzeugsysteme, die in ihrer Gänze sichtbar sind und deren Interaktion mit ihren Benutzern komplett explizit abläuft, d. h. jede Eingabe an das System geschieht seitens des Benutzers willentlich und wissentlich, und jede Ausgabe des Systems wird vom Benutzer auf gleiche Art wahrgenommen. Jedermanns Erfahrung mit Computersystemen aller Art lehrt jedoch, dass es nur eine Frage der Zeit ist, bis in der Interaktion mit ihnen Fehler auftreten. Sei es, dass die KI einen falschen Schluss zieht, sei es, dass eine Interaktionsmöglichkeit wegen ihres Verschwindens hinter anderen Funktionen eines Artefakts, in das sie eingebettet ist, nicht erkannt wird.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, ein Modell zu entwickeln, das Abstufungen zwischen den beiden Extremen abbilden kann. Damit nicht die einzige Alternative zur implizit-ambienten Interaktion der totale Rückfall in alte Werkzeughaftigkeit sein muss, sind Zwischenebenen möglich, über die das System sich schrittweise mit zunehmender Deutlichkeit explizieren kann, um eine erfolgreiche Interaktion mit dem Benutzer zu erreichen, ohne mehr von seinem ambienten Charakter einzubüßen als unbedingt notwendig. Die Frage muss folglich lauten, wie sich im Falle der

Nicht-Erwartungskonformität, d. h. des Scheiterns der impliziten Interaktion, diese partiell durch explizite Interaktionen ersetzen lässt, ohne gleich vom Totalausfall des Systems auszugehen. An dieser Stelle wird also eine Zwischenebene benötigt, die diesen Übergang graduell abbilden kann. Dies kann erreicht werden, indem die Interaktion zwischen Mensch und Maschine dialoghaften, kommunikativ geprägten Charakter annimmt, auf den später noch genauer eingegangen wird.

Diese drei Funktionsebenen, die im folgenden Abschnitt genauer beschrieben werden, können in einem intelligenten ambienten System componentenweise koexistieren und in Abhängigkeit von der jeweiligen Interaktionssituation fallweise zur Anwendung kommen (vgl. Kapitel 6). Sie ermöglichen dem System, sich den unterschiedlich abstrakten mentalen Modellen (vgl. Kapitel 4), die verschiedene Benutzer (oder ein einziger Benutzer in unterschiedlichen Kontexten) vom System und von ihrer Interaktion mit ihm haben, anzupassen. Solange alles reibungslos funktioniert, kann das System ambient sein und alle Interaktion implizit ablaufen. Wenn seitens des Benutzers Verständnisprobleme hinsichtlich des Funktionierens des Systems auftreten, kann das System die kommunikative Ebene betreten. Das heißt, es wird zwar als Computersystem sichtbar und verliert somit (zumindest innerhalb dieser Interaktionssituation) seinen ambienten Charakter, führt den Benutzer aber als Assistent durch die Interaktion, wobei es auf kommunikative Weise dynamisch die benötigten Affordanzen für das mentale Modell des Benutzers erzeugen kann. Auf dieser Ebene nimmt das System aus Nutzersicht den Charakter eines *kommunikativen Assistenten* an, der sowohl seine Ausgaben als auch die möglichen Eingaben durch den Benutzer erklärt. Erst wenn der Benutzer noch konkreter, noch expliziter mit dem System interagiert, z. B. weil er besonders kleinteilig Einfluss auf das Systemverhalten nehmen möchte, scheitert auch die kommunikativ geführte Interaktion und das System nimmt den Charakter eines klassischen Werkzeugs an.

Man beachte, dass es sich bei den genannten Ebenen nicht um unterschiedliche Grade von Ambienz der einzelnen Interaktionssituation handelt. Eine solche ist stets entweder ambient oder kommunikativ oder werk-

### 3 *Ambiente Systeme*

zeughaft. Vielmehr ändert sich der Grad der Ambienz des Systems im Hinblick auf die gesamte Interaktions*historie* zwischen Benutzer und System als Funktion der verfügbaren Affordanzen und Feedback-Mechanismen.

#### 3.3.1 *Ambientes System*

Ein perfektes ambientes System ist eines, das dem Benutzer gegenüber eigentlich *gar nicht* in Erscheinung tritt. Alle Systemeingaben erfolgen implizit, indem der Benutzer mit Artefakten interagiert oder sich im Raum bewegt, ohne sich dabei einer Bezugnahme auf das ambiente System bewusst zu sein. Sofern er auf mentale Modelle zurückgreift, Handlungspläne entwirft etc., geschieht dies stets in Bezug auf den Rest der Welt, aber nicht auf das ambiente System. Auch die Ausgaben des Systems sind auf dieser Ebene implizit, indem alle Parameter, die der Kontrolle des Systems unterliegen, einfach passend sind, *just right*. Wenn z. B. die Nahrungsbeschaffung Aufgabe des Systems ist, klingelt zum genau richtigen Zeitpunkt ein Bote mit genau dem Essen an der Tür, auf das der Benutzer gerade Appetit verspürt, bevor dieser überhaupt überlegen musste, worauf er gerade Lust hat oder dass er überhaupt Hunger hat. Wenn dem System die Klimasteuerung in einem Smart Home übertragen wurde, ist diese Funktion perfekt ambient, wenn die Bewohner des Hauses sich nie in der Situation befinden, überhaupt darüber nachzudenken, dass geheizt, gelüftet oder gekühlt werden muss, weil das Raumklima in allen Lebenslagen und Befindlichkeiten stets *just right* ist.

#### 3.3.2 *Kommunikativer Assistent*

Wenn in einer bestimmten Situation die implizit-ambiente Interaktion scheitert, weil das System seine Aufgaben nicht *just right* zu erfüllen vermag oder es dem Benutzer gegenüber aus einem anderen Grund als Computersystem sichtbar wird, wird regelmäßig die Frage im Raum stehen, wie das System zu einer bestimmten Einschätzung einer Situation kam bzw. warum es eine Situation als diesem oder jenem Kontext zugehörig interpretiert hat, auf Grundlage welcher impliziten Eingaben und welcher internen

### 3.3 Funktionsebenen intelligenter ambienter Systeme

Repräsentationen seiner Künstlichen Intelligenz dies der Fall war etc. Die radikale Lösung dieses Problems besteht darin, alle Sensorwerte, alle semantischen Repräsentationen der internen Ontologien oder alle feuernden Produktionsregeln der Reasoner in ganz und gar unambienter Weise auf einem Bildschirm auszugeben und dem Benutzer die Herleitung der Zusammenhänge selbst zu überlassen. Ebenso ist es möglich, dass der Benutzer Systemeinstellungen verändern oder geänderte Präferenzen mitteilen möchte, ohne möglicherweise langwierige Lernprozesse der KI abwarten zu müssen. Dies ist über eine Art Systemsteuerung, wie sie heute in den meisten Desktop-Betriebssystemen eingebaut ist, möglich.

Sowohl im Fall des Systemfehlers als auch in dem des „ungeduldigen“ Benutzers ist der Rückfall in ein mechanistisch-werkzeughaftes Systemmodell der radikalste und unter der Prämisse des Wunsches nach Ambienz der am wenigsten wünschenswerte Weg. Als Zwischenstufe zwischen diesen beiden Extremen lässt sich eine Ebene konzipieren, auf der das System den Charakter eines kommunikativen und damit mehr oder weniger anthropomorphen Assistenten annimmt, um Erklärungen für das Systemverhalten anzubieten und Interaktionsmöglichkeiten zu vermitteln. Doyle (1999) nennt gerade diese *dialoghafte Suche nach ausreichend guten Lösungen auf unsicheren Entscheidungsgrundlagen* als geeignete Domäne kommunikativer Agentensysteme.

Natürlich muss das System die ambiente Ebene nicht gleich in Bezug auf alle seine Funktionen verlassen und kommunikativ werden. Es genügt, wenn das Erklärungs- und Kommunikationspotenzial an der Stelle, d. h. zu dem Zeitpunkt und in Bezug auf die Systemfunktionen, in Erscheinung tritt, an der der Benutzer sie gerade benötigt.

Diese Zwischenebene lässt sich nahezu beliebig differenzieren, denn je nach konkreter Ausprägung des jeweiligen Systems können die Erklärungen und Hilfestellungen des Assistenten sich auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen bewegen, also unterschiedliche Grade an technischem Verständnis des Benutzers und Granularität seiner mentalen Modelle, das System betreffend, voraussetzen. Dafür muss das System nicht nur ein Modell der mentalen Zustände, Wissensbestände und Intentionen seines Kommu-

### 3 *Ambiente Systeme*

nikationspartners aufbauen, sondern auch seine eigenen „mental Zustände“ geeignet repräsentieren, um zwischen beiden zu differenzieren und auf dieser Basis geeignete diskursive Strukturen zu entwickeln (vgl. etwa Wachsmuth, 2008).

#### 3.3.3 *Werkzeug-Extension*

Das Konzept des Werkzeugs oder, allgemeiner noch, technischer Artefakte überhaupt, als „extension of man“, der Erweiterung der Reichweite und Möglichkeiten des menschlichen Körpers, findet sich bereits bei Aristoteles und wurde seit dem späten 19. Jahrhundert systematisch ausgearbeitet (vgl. etwa Lawson, 2010). McLuhan (1994) erweitert diese Sichtweise zu einem Konzept, das auf Medien und damit auch auf Computersysteme anwendbar ist. Während manuelle Werkzeuge die körperlichen Funktionen des Menschen erweitern, tun elektronische Medien bzw. Computersysteme dasselbe mit seinen Sinnesorganen und seinem zentralen Nervensystem. Organische Leistungen werden durch Werkzeuge verbessert, verändert oder gar neu geschaffen.

Wie bereits erwähnt, steht der Ambienz am anderen Ende des „Abstraktionskontinuums“ die reine Werkzeughaftigkeit des Systems gegenüber. In dieser Ausprägung verliert das System jegliches Entgegenkommen für den Benutzer und jegliche Ambienz, es wird vollständig als Computersystem, als technisches Artefakt, sichtbar, und alle Eingaben des Benutzers müssen explizit erfolgen, ebenso wie alle Ausgaben des Systems dem Benutzer explizit vermittelt werden.

#### 3.4 FAZIT

In diesem Kapitel wurden die drei Bestandteile des Begriffs „intelligentes ambientes System“ einzeln definiert, und daraus wurde anschließend eine Arbeitsdefinition für den Gesamtbegriff abgeleitet. Das Ausmaß der Ambienz eines Systems wird bestimmt durch diejenigen Interaktionen zwischen dem System und seinen Benutzern, die implizit ablaufen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn Eingabedaten durch versteckte Sensorik er-

hoben werden oder die Interaktion durch die Einbettung von Teilen des Systems in andere Artefakte vermittelt wird. Der Intelligenzbegriff wurde auf das Konzept der Smartness zurückgeführt, der die phänomenologische Oberflächlichkeit scheinbar intelligenter Funktionalität betont, die auf Eigenschaften wie Graceful Degradation verzichtet. Der Systemcharakter der hier behandelten Konfigurationen digitaler Artefakte wird bestimmt durch die zugrunde liegende Vernetzungslogik und den daraus resultierenden hohen Grad an Dynamik, der die Systemgrenzen verschwimmen lässt.

In dem Maße, wie der ambienten Charakter eines Systems abnimmt, z. B. indem die scheinbare Intelligenz bezüglich bestimmter Interaktionen versagt, muss das System andere Modi verwenden, um die Interaktion mit dem Benutzer aufrechtzuerhalten. Die Basis dafür bildet der werkzeughafte Modus, in dem das System gänzlich als technisches Artefakt sichtbar ist, dem ganz bestimmte, festgelegte Interaktionsformen und dazu gehörige Affordanzen eingeschrieben sind. Eine Zwischenebene stellt der Modus des kommunikativen Assistenten dar, in dem das System Affordanzen und Erklärungen dynamisch erzeugen kann.

Im folgenden Kapitel wird der Begriff des mentalen Modells untersucht, um zeigen zu können, wie die spezifischen Charakteristika dieser Strukturen mit den eben skizzierten Eigenschaften ambienter Systeme und ihrer alternativen Funktionsmodi in Wechselwirkung stehen.



Mentale Modelle sind eine Form der Wissensrepräsentation, die Menschen benutzen, um bestimmte Aspekte komplexer Sachverhalte und Zusammenhänge, die „durch geringe Transparenz gekennzeichnet sind“ (Kluwe, 1990, S. 157), in einem Komplexität reduzierenden Modell anschaulich zu machen. Sie sind also Nachbildungen der Wirklichkeit, die helfen sollen, die Welt zu verstehen und menschliches Verhalten zu leiten. Mentale Modelle können nicht auf einmal gelernt oder erzeugt werden, sondern sie entwickeln sich in der Interaktion mit der Welt und ihre Bildung wird durch die Art dieser Interaktion ebenso wie durch Vorwissen und -verständnis relevanter Sachverhalte beeinflusst.

In Anbetracht der erwähnten technologischen Entwicklungen ist es erforderlich, den Begriff der mentalen Modelle neu in den Blick zu nehmen. Unterschiedliche Ansätze in den Bereichen Kognitions- und Ingenieurpsychologie, Informatik und Linguistik versuchen, theoretische Konzeptualisierungen mentaler Modelle zu entwickeln und empirisch zu erproben. Seit den frühen 1980er Jahren wurden verschiedene Theorien vorgelegt, die den von Craik (1963) eingeführten Begriff aufnehmen und sich insbesondere auf den Umgang mit komplexen technischen Systemen und logisches Schlussfolgern beziehen.

Der Begriff „Mentale Modelle“ wird nicht einheitlich verwendet. Unterschiedliche Forschungstraditionen verwenden jeweils eigene Definitionen, die den Eigenheiten des jeweiligen Forschungsgebiets Rechnung tragen. Jede dieser Definitionen hat folglich ihre Daseinsberechtigung, was jedoch erforderlich macht, vor Verwendung des Begriffs deutlich zu machen, auf

#### 4 Mentale Modelle

welche der unterschiedlichen Definitionen man sich bezieht. Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere die Ansätze der Ingenieurpsychologie und der Kognitionspsychologie relevant.

Diese beiden Ansätze haben gewisse Gemeinsamkeiten, die im Folgenden herausgearbeitet und diskutiert werden. Ziel ist es, einen Begriff mentaler Modelle zu definieren, der auf früheren Konzeptualisierungen beruht, aber gleichzeitig geeignet ist, den Umgang von Benutzern mit intelligenten ambienten Computersystemen zu beschreiben. Deshalb wird – nach der Vorstellung einiger relevanter Verwendungszusammenhänge des Begriffs – eine pragmatische Arbeitsdefinition abgeleitet, die in ihrer gewollten Unschärfe einen Dachbegriff für die unterschiedlichen Konzeptualisierungen mentaler Modelle bieten kann.

„Mental models seem a pervasive property of humans. I believe that people form internal models of the things and people with whom they interact. These models provide predictive and explanatory power for understanding the interaction.“ (Norman, 1986, S. 46)

Wenn mentale Modelle so allgegenwärtig sind, wie Norman sie darstellt, und seit langem so vielseitig erforscht werden, warum ist es dann erforderlich, sich erneut damit auseinanderzusetzen? In der Interaktion mit ambienten Computersystemen wird dem Benutzer die Bildung adäquater mentaler Modelle erschwert, weil durch den zunehmend impliziten Charakter und die potenzielle räumliche wie zeitliche Verteilung der Mensch-Computer-Interaktion eindeutige Hinweise auf die inneren Funktionszusammenhänge des Systems nicht oder nur selten zu erlangen sind. Im Gegenteil liegt eine konstituierende Eigenschaft ambienter Systeme ja gerade darin, dass die Interaktion mit ihnen sich in der Interaktion mit Artefakten verbirgt, die im Idealfall nicht als zu einem Computersystem gehörig erkennbar sind. Deshalb ist die Verfügbarkeit eines adäquaten mentalen Modells Voraussetzung für ein Gefühl der Sicherheit und Vertrautheit beim Benutzer. Anders ausgedrückt: Fehlt ein adäquates mentales Modell, fol-

gen für den Benutzer Unsicherheit und Unbehagen bei der Benutzung des Systems.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden zunächst wesentliche Eigenschaften von Modellen im Allgemeinen und mentaler Modelle im Besonderen referiert. Daraus ergibt sich im Anschluss ein Zwei-Stufen-Modell als Versuch, die Begriffe mentaler Modelle aus unterschiedlichen Forschungstraditionen zu integrieren, und schließlich eine Arbeitsdefinition für die weitere Auseinandersetzung mit dem Themenkomplex. Danach wird gezeigt, warum gerade im Umgang mit ambienten Systemen die Verfügbarkeit adäquater mentaler Modelle besonders wichtig ist und wie diese Adäquatheit von der Rolle des Benutzers in Bezug auf das System abhängt. Dass der Aufbau geeigneter mentaler Modelle über ambiente Systeme nicht nur wichtig, sondern auch schwieriger ist als bei anderen Systemen, wird ebenso dargestellt wie mögliche Ansätze, diesen besonderen Schwierigkeiten zu begegnen.

#### 4.1 EIGENSCHAFTEN MENTALER MODELLE

Modelle im Allgemeinen weisen einige grundlegende Eigenschaften auf, die auch für mentale Modelle gelten. Stachowiak (1973, S. 130ff.) nennt folgende drei wesentlichen Merkmale, die für alle Modelle gelten:

**Abbildungsmerkmal** Ein Modell ist eine Abbildung eines Originals, d. h. Attribute des Originals werden Attributen des Modells zugeordnet. Dieses Verhältnis kann rekursiv sein, d. h. das Original kann selbst wieder Modell von etwas sein.

**Verkürzungsmerkmal** Es werden nicht alle Attribute des Originals abgebildet, sondern nur diejenigen, die der Ersteller<sup>1</sup> des Modells für nötig

---

<sup>1</sup>Wenn hier von „Erstellern“ und allgemeiner von „Personen“ die Rede ist, so ist zu beachten, dass Modelle in ihrer allgemeinen Form keineswegs nur von Personen gebildet und benutzt werden können. Ein Modell kann z. B. durchaus von einer Maschine verwendet werden, um innerhalb einer bestimmten Anwendungsdomäne funktionieren zu können, oder es kann im Sinne Künstlicher Intelligenz sogar durch eine Maschine erstellt werden.

#### 4 Mentale Modelle

erachtet (siehe pragmatisches Merkmal). Ein Modell dient also der Komplexitätsreduktion im Vergleich zum Original. Andererseits kann das Modell Attribute besitzen, die sich nicht im Original finden.

**Pragmatisches Merkmal** Modelle sind nicht eindeutig, sondern aufgrund des Verkürzungsmerkmals kann es von einem Original mehrere verschiedene Modelle geben. Diese existieren und können Verwendung finden

1. für bestimmte Personen<sup>1</sup>
2. innerhalb bestimmter Zeiträume
3. zu bestimmten Verwendungszwecken.

Dutke (1994, S. 4f.) nennt als Beispiel für diese pragmatischen Aspekte den Schaltplan eines elektrischen Geräts, der für einen Ingenieur verständlich ist, für einen Schüler der unteren Jahrgangsstufen jedoch nicht (1). Nach einigen Jahren Physikunterricht (2) versteht auch der Schüler den Schaltplan. Dieser ist jedoch vornehmlich bei der Reparatur des Geräts nützlich, zum Erlernen seiner Bedienung eher weniger (3).

*Mentale Modelle* als Spezialfall weisen alle Merkmale auf, die oben im Zusammenhang mit Modellen im Allgemeinen beschrieben wurden. Darüber hinaus besitzen sie zusätzliche Eigenschaften.

Mentale Modelle werden nicht nur aufgebaut, um ein Erklärungsmuster für eine bestimmte Domäne oder einen Sachverhalt zu haben. Vielmehr wirken sie (nicht zuletzt aufgrund ihrer Verfügbarkeit als Erklärungsmuster) *handlungssteuernd*:

„They enable individuals to make inferences and predictions, to understand phenomena, to decide what action to take and to control its execution, and above all to experience events by proxy [...]“ (Johnson-Laird, 1983, S. 397)

Verschiedene Menschen erzeugen in den gleichen Situationen durchaus unterschiedliche mentale Modelle (Jarz, 1997, S. 78). Diese Modelle unterschei-

den sich nicht nur darin, welches Handlungswissen sie abbilden und wie sie dies tun, sondern auch in der Qualität dieser Abbildung, was wiederum Unterschiede in der Handlungsfähigkeit bedeutet: „Der Umgang mit dem komplexen Sachverhalt kann jeweils nur so adäquat sein, wie es die Abbildung des Sachverhalts im mentalen Modell der Person ist“ (Kluwe, 1990, S. 158). Dies unterstreicht, dass mentale Modelle handlungssteuernde Wirkung besitzen.

Aus Stachowiaks pragmatischem Merkmal ergibt sich unmittelbar das Erfordernis, dass unterschiedliche Benutzer eines ambienten Systems, die unterschiedliche Interaktionen mit dem System vollziehen, diese unterschiedlichen mentalen Modelle des Systems auch tatsächlich benötigen. Folglich muss einerseits die Bildung jeweils adäquater Modelle vom System unterstützt werden, indem den Benutzern jeweils geeignete Affordanzen und Interaktionsmöglichkeiten angeboten werden. Andererseits muss das System, wenn es an bereits bestehende mentale Modelle seiner Benutzer anknüpfen soll, wiederum Modelle dieser Modelle implementieren. Darauf wird in Kapitel 6 detailliert eingegangen.

Aufgrund seiner Studien über mentale Modelle kommt Norman (1983, S. 8) zu dem Schluss, „that most people’s understanding of the devices they interact with is surprisingly meager, imprecisely specified, and full of inconsistencies, gaps, and idiosyncratic quirks.“ Daraus ergeben sich drei wesentliche Eigenschaften mentaler Modelle, die mit dem Verkürzungs- und dem pragmatischen Merkmal Stachowiaks korrelieren.

Mentale Modelle sind erstens unvollständig. Dies liegt einerseits in der Natur von Modellen begründet (siehe S. 49). Andererseits beruht diese Eigenschaft bei mentalen Modellen im Speziellen darauf, dass sie in der Auseinandersetzung mit der Welt entstehen und gebildet werden, und dieser Prozess benötigt Zeit und ist zudem abhängig von der Verfügbarkeit von Informationen über den Gegenstandsbereich des Modells, die in das Modell integriert werden können.

Mentale Modelle sind zweitens instabil. Diese Eigenschaft bezieht sich auf den gerade genannten Prozess der fortlaufenden Aktualisierung und Weiterentwicklung des Modells in Abhängigkeit von der Auseinanderset-

zung mit der Welt und der Verfügbarkeit sinnvoll integrierbarer Informationen in der Welt. Was „sinnvoll“ integrierbar ist, bemisst sich z. B. an den Aspekten, die im o. g. pragmatischen Merkmal von Modellen beschrieben sind, also daran, für wen, wann und wozu das Modell aufgebaut wird. Instabil sind mentale Modelle nicht nur in Bezug auf ihre Erweiterung und Präzisierung, sondern auch hinsichtlich des Vergessens z. B. von Modelldetails, die lange nicht zur Anwendung kamen.

Mentale Modelle sind drittens resistent gegenüber Änderungen. Diese Eigenschaft steht nur scheinbar im Widerspruch zur zuvor genannten Instabilität. Änderungsresistenz bedeutet, dass mentale Modelle häufig *trotz* der Verfügbarkeit besserer, aktuellerer, adäquaterer oder überhaupt korrekter Informationen nicht aktualisiert werden. Als Beispiel sei hier der Physiker genannt, der sich wider besseren Wissens die Schaltung seiner Zimmerbeleuchtung im Alltag mithilfe des Wasserkreislaufmodells (vgl. Gentner und Gentner, 1983) erklärt. Solange dieses Modell innerhalb seines Anwendungskontexts „funktioniert“, d. h. hinreichend adäquat ist, würde nicht nur seine Aktualisierung und Verfeinerung, sondern auch die spätere Anwendung des neuen, unnötig komplexen Modells kognitive Ressourcen binden, ohne dass darin ein Mehrwert bestünde. Die Änderung mentaler Modelle ist also eine Frage des Kosten-Nutzen-Verhältnisses.

In der Literatur werden mentale Modelle gelegentlich auch als *naive* oder *subjektive Theorien* bezeichnet (vgl. McCloskey, 1983; Oberauer u. a., 2006). Dieser Begriff trifft allerdings eher auf Modelle zu, die schwerpunktmäßig *funktionale* Aspekte ihres Gegenstandsbereichs abbilden. Diese Art mentaler Modelle entspricht weitgehend dem unter Ingenieurpsychologen verbreiteten Verständnis mentaler Modelle. Die mentalen Modelle, die viele Kognitionspsychologen fokussieren (stellvertretend sei hier Johnson-Laird, 1983, genannt), weisen eher den Charakter analog-bildhafter Abbildungen auf, für den sich ein Theoriebegriff nicht in gleichem Maße aufdrängt. Die Unterschiede zwischen den Konzeptualisierungen mentaler Modelle in Ingenieur- und Kognitionspsychologie werden in Abschnitt 4.3 herausgearbeitet.

## 4.2 AUFBAU MENTALER MODELLE

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass sich, aufbauend auf dem grundsätzlichen Abbildungscharakter von Modellen (siehe S. 49), auch mentale Modelle auffassen lassen als Abbildung aus einem Basisbereich, der aus Elementen und Beziehungen zwischen diesen Elementen besteht, in einen Zielbereich, der ebenfalls aus Elementen und Beziehungen zwischen denselben besteht. Häufig werden *Analogien* als Basis der Konstruktion mentaler Modelle genannt (vgl. etwa Gentner und Gentner, 1983; Kluwe, 1990; Dutke, 1994). Das Vorliegen einer Analogie bedeutet, dass sich die *Beziehungen zwischen den Elementen* von Basis- und Zielbereich ganz oder teilweise gleichen. Analogien sind nicht zu verwechseln mit Ähnlichkeitsbeziehungen, die durch ganz oder teilweise gleiche *Eigenschaften der Elemente* gekennzeichnet sind.

Der erfolgreiche Aufbau eines mentalen Modells ist also eine Frage hinreichend ähnlicher Beziehungen zwischen den Elementen, nicht der Ähnlichkeit der Elemente. Letztere hilft aber beim *Erkennen* des Vorliegens der Analogie und unterstützt damit ebenfalls den Aufbau des mentalen Modells (Gick und Holyoak, 1980). Wenn eine solche Ähnlichkeitsbeziehung zwischen Basis- und Zielbereich eines Modells nicht gegeben ist, können *Metaphern* helfen. Die Begriffe Analogie und Metapher werden zwar häufig synonym gebraucht, unterscheiden sich aber durchaus in ihrer Bedeutung: Der Begriff Analogie bezeichnet das *Vorliegen* der oben genannten Relation, während eine Metapher ein Mittel zur *Veranschaulichung* dieser Relation ist.

Aus den eben geschilderten Sachverhalten folgt, dass der erfolgreiche Aufbau ebenso wie die Verwendung eines mentalen Modells davon abhängig ist, ob die betreffende Person über die entsprechenden *Schemata* verfügt, um Analogien, Ähnlichkeitsbeziehungen und Metaphern des entsprechenden Sachgebiets verstehen zu können. Wie später deutlich werden wird, ist auch diese Abhängigkeit von geeigneten Schemata verantwortlich für das Erfordernis, Benutzern ambienter Systeme den Aufbau unterschiedlicher mentaler Modelle zu ermöglichen, wenn diese auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen mit dem System interagieren wollen oder müssen.

#### 4 Mentale Modelle

Dutke (1994, S. 38) versteht den Prozess der Konstruktion mentaler Modelle als zweistufig. Auf der ersten Stufe entsteht ein *Perzeptionsmodell*, mithilfe dessen die Topologie des Systems wahrgenommen werden kann, aber nicht die abstrakten Relationen zwischen den Systemelementen. Nach vertiefter Auseinandersetzung mit dem System oder nach Hinzufügen abstrakten bzw. schematischen Wissens zum Modell entsteht als zweite Stufe ein *konzeptuelles Modell* oder *Kausalmodell*. Hinsichtlich ihrer Verwendung liegt der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Modellstufen in ihrer *Simulationsfähigkeit*, bezogen auf die Komplexität der mit ihnen simulierbaren Vorgänge. Am Beispiel eines qualitativen Modells eines elektrischen Summers verdeutlichen de Kleer und Brown (1983, S. 159), „that the behavior of the overall device is constrained, not only by local interactions of its component behaviors, but also by global interactions.“ Die Simulationsfähigkeit eines mentalen Modells ist also davon abhängig, welche qualitativen und ggf. quantitativen Einflussgrößen wie gut abgebildet werden, um aus der Anordnung der Komponenten das Verhalten des Systems ableiten zu können.

#### 4.3 ZWEI STUFEN, ZWEI ANSÄTZE

Das unterschiedliche Verständnis des Begriffs mentaler Modelle, wie es sich bei eher kognitionspsychologisch und eher ingenieurpsychologisch orientierten Quellen findet, weist auffallende Parallelen zu dem zweistufigen Konstruktionsprozess aus Perzeptions- und Kausalmodell auf, der oben beschrieben wurde.

##### 4.3.1 Kognitive Psychologie

In der kognitionspsychologischen Tradition (vgl. etwa Johnson-Laird, 1983) bezeichnet der Begriff „mentales Modell“ eine Datenstruktur im Arbeitsgedächtnis (vgl. Baddeley, 2000), auf der Inferenzen gezogen werden können (Reasoning). Diese Strukturen haben den Charakter analoger Abbildungen im visuell-räumlichen Notizblock (vgl. Abb. 4.1, hier im Sinne von bildhaft, jedoch nicht unbedingt bildlich), „and their manipulation makes it

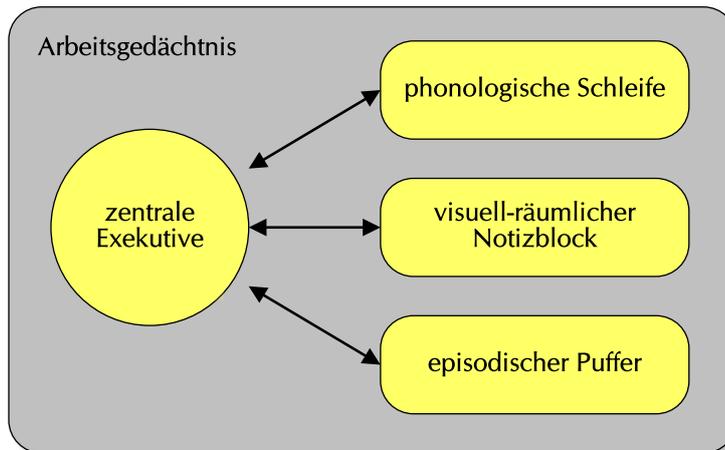


Abbildung 4.1: Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell.

possible to reason without logic“ (Johnson-Laird, 1983, S. 165). Da Modelle dieser Art ihren Schwerpunkt auf die phänomenologische Abbildung der Gestalt eines Sachverhalts legen, eignen sie sich insbesondere zur strukturellen Analyse eines Systems, während ihr funktionales Erklärungspotenzial eher begrenzt ist.

Aus der Perspektive der Kognitionswissenschaft sind mentale Modelle Teil derjenigen dynamischen Wissensrepräsentationsstruktur, die insbesondere für räumliche Informationen zuständig ist. Innerhalb des Arbeitsgedächtnismodells von Baddeley (2000) heißt diese Struktur „visuo-spatial sketchpad“. Dieses *Wo-System* steht in Verbindung mit dem *Was-System*, das propositionale Fakten enthält.

Der Begriff „mentales Modell“ verweist darüber hinaus auf eine bestimmte Verarbeitungsebene der Wissensrepräsentation. Schemata beschreiben Struktur und Inhalt generischen Wissens. Produktionssysteme definieren deklaratives und prozedurales Wissen ebenso wie die Prozesse, die das eine in das andere überführen können. Mentale Modelle können als die höchste Repräsentationsebene angesehen werden, nämlich als ein dynamisch aktualisiertes Abbild der aktuellen Situation, zu der es in einem homomorphen Verhältnis steht.

#### 4 Mentale Modelle

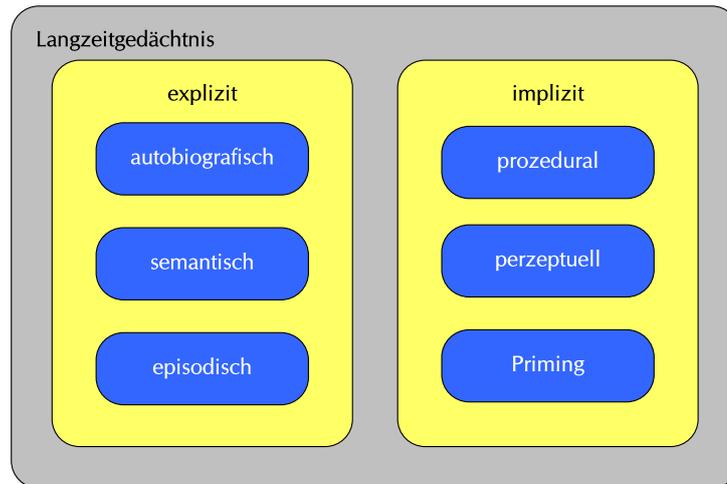


Abbildung 4.2: Die Subsysteme des Langzeitgedächtnisses.

Innerhalb dieser Forschungstradition gilt Reasoning als der Prozess der Kontruktion mentaler Modelle. Kognitionspsychologen, die sich mit dem menschlichen Denken befassen, wie Johnson-Laird (1983), Craik (1963) aufgreifend, oder mit Sprachverstehen, wie van Dijk und Kintsch (1983), bewegen sich nahe an dieser Definition des Begriffs mentaler Modelle.

##### 4.3.2 Ingenieurpsychologie

In der ingenieurpsychologischen Tradition beschreibt der Begriff „mentales Modell“ Strukturen im expliziten, semantischen Teil (vgl. Abb. 4.2) des Langzeitgedächtnisses (vgl. etwa Atkinson und Shiffrin, 1968). Diese Strukturen bilden im Unterschied zu dem zuvor genannten Modelltypus eher funktionale Analogien ab. Die mentalen Modellbegriffe beider Forschungstraditionen weisen also Parallelen auf, aber auch signifikante Unterschiede, weil sich auf unterschiedlichen Repräsentationen unterschiedliche kognitive Operationen ausführen lassen. Dass mentale Modelle explizites Wissen sind, bedeutet indes nicht, dass sie ohne Weiteres explizierbar sind. Insbesondere ihre empirische Untersuchung wird dadurch erschwert, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Inhalte der Modelle von den

Abruf- und damit verbundenen Reflektionsprozessen unbeeinträchtigt verbalisiert werden können (Bainbridge, 1979).

Gentner und Stevens (1983) nehmen ebenso wie Wilson und Rutherford (1989) die Gebiete der ingenieurmäßigen Konstruktion technischer Artefakte, der Mensch-Maschine-Interaktion und Human Factors in den Blick. In diesem Bereich ist es vonnöten, mehrere Ebenen mentaler Modelle zu unterscheiden, die in unterschiedlichen Personen existieren, die mit demselben Artefakt befasst sind. Nach Norman (1983) handelt es sich dabei um

1. das konzeptuelle Modell des Benutzers, also seine Repräsentation des Artefakts,
2. das mentale Modell des Benutzers, seine interne Repräsentation (vgl. Abschnitt 4.3.1) und
3. das konzeptuelle Modell des Entwicklers des Artefakts.

Konzeptuelle Modelle sind ebenfalls mentale Modelle. Die unterschiedliche Nomenklatur dient nur dazu, sie vom kognitionswissenschaftlichen Verständnis mentaler Modelle unterscheiden zu können. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass der ingenieurpsychologische Begriff mentaler Modelle sich auf Strukturen im Langzeitgedächtnis und nicht auf Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis bezieht.

Eine Taxonomie mentaler Modelle, die unterschiedliche Stakeholder im Umfeld interaktiver Systeme innerhalb bestimmter Domänen haben, bietet Herczeg (2006a, 2009, S. 51ff.). Er betrachtet die am Anwendungsbereich (A) Beteiligten, insbesondere Designer (D), Benutzer (B) und das System selbst (S) als Operatoren, deren Modellbildung als Abbildungsleistung auf den Gegenstandsbereich ihrer jeweiligen Modelle (Operanden) wirkt. Als *Modelle 1. Ordnung* ergeben sich somit die Modellierung des Anwendungsbereich im System  $S(A)$ , die Vorstellung des Designers vom Anwendungsbereich  $D(A)$  und das Modell des Benutzers vom Anwendungsbereich  $B(A)$ . Als *Modelle 2. Ordnung* resultieren wiederum das Modell des Benutzers vom System, das den Anwendungsbereich modelliert  $B(S(A))$ ,

die systeminterne Modellierung seines Benutzers  $S(B(A))$  und so fort. Mithilfe dieses Formalismus lässt sich ein einzelnes Modell, von dem die Rede ist, in seinen Bezügen auf andere Modelle eindeutig benennen.

Um den Prozess der Konstruktion (konzeptueller) mentaler Modelle im Benutzer eines Artefakts zu beschreiben, prägte Kindsmüller (2006) den Begriff der *Modellinduktion*. Er bezieht sich dabei auf die Tatsache, dass es nicht möglich ist, mentale Modelle im Ganzen in das Gedächtnis einzupflanzen. Vielmehr werden mentale Modelle stückweise aus Beobachtungen, Annahmen und externen Informationen gebildet, und dieser Prozess lässt sich allenfalls unterstützen, indem solche Bausteine in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden. Im Zusammenhang mit der Erarbeitung von Gestaltungsregeln für ambiente Computersysteme in Abschnitt 6.5 wird dieses Konzept noch von Bedeutung sein. Insbesondere verweist es aber erneut auf den Prozess, in dem (perzeptive) mentale Modelle der ersten Stufe durch Hinzufügen expliziten Wissens in (konzeptuelle) mentale Modelle der zweiten Stufe überführt werden.

Wie eben dargestellt, unterscheiden sich mentale Modelle im kognitionspsychologischen und im ingenieurpsychologischen Sinn sowohl in Hinblick auf das Gedächtnissystem, in dem sie repräsentiert sind, als auch in den Operationen, die auf diesen Repräsentationen ausgeführt werden können. Vor allem ersteres lässt die Möglichkeit einer Transition zwischen beiden Arten mentaler Modelle zweifelhaft erscheinen. Der Unterschied ist jedoch leicht dadurch erklärbar, dass auch perzeptuelle Modelle im Langzeitgedächtnis abgespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgerufen werden können. Der Unterschied ergibt sich dann vor allem daraus, dass die relevanten Operationen auf dem Modell im einen Fall solche des Arbeitsgedächtnisses sind (visuo-spatial Sketchpad, reasoning without logic), während die relevanten Operationen auf konzeptuellen Modellen zwar letztendlich ebenfalls im Arbeitsgedächtnis stattfinden, aber insbesondere Strukturen im Langzeitgedächtnis *beeinflussen*. Beide Sichtweisen, die kognitionspsychologische und die ingenieurpsychologische, schließen sich also keineswegs aus, sondern fokussieren unterschiedliche Evolutionsstufen eines mentalen Modells.

#### 4.4 ENTWICKLUNG EINER ARBEITSDEFINITION

„Considering the theoretical relationship among ‘pictures in the mind,’ mental images, mental models, and, indeed, any other representational construct such as schemata or scripts can be a tortuous endeavour.“ (Wilson und Rutherford, 1989, S. 625f.) Bereits Mitte der 1980er Jahre kamen Rouse und Morris (1986) in ihrem Übersichtsartikel zu dem Schluss, dass die Vielfalt unterschiedlicher Konzeptualisierungen des Begriffs „mentales Modell“ gerade deshalb nicht hilfreich ist, weil die Forschungspraxis nach präzisen, eindeutigen Begriffsbestimmungen und -verwendungen verlangt. Häufig, so Rouse und Morris, werde der Begriff synonym zu einem allgemeinen Begriff von „Wissen“ verwendet, ohne inhaltlichen Mehrwert zu bieten. In einem Versuch, zu einer möglichst generischen, umfassenden Definition zu gelangen, schlagen sie folgende Formulierung vor (Rouse und Morris, 1986, S. 351):

„Mental models are mechanisms whereby humans are able to generate descriptions of system purpose and form, explanations of system functioning and observed system states, and predictions of future system states.“

Die Universalität dieser Definition ergibt sich daraus, dass Rouse und Morris die Bedeutung des Worts „System“ nicht näher bestimmen, sich also nicht auf Computersysteme oder gar, noch enger gefasst, auf intelligente ambiente Systeme beschränken. System lässt sich hier ganz allgemein lesen als *das, was das mentale Modell modelliert*.

Die eben zitierte Definition nennt drei Hauptaufgaben mentaler Modelle, nämlich *Beschreibung*, *Erklärung* und *Vorhersage*. Diese drei Aufgaben lassen sich den beiden Ausbaustufen mentaler Modelle wie folgt zuordnen.

Auf der ersten Stufe wird ein perzeptuelles oder topologisches Modell des Systems gebildet. Dieses funktioniert zunächst rein deskriptiv, beinhaltet also keine abstrakten Relationen zwischen den Elementen des Systems, sondern nur deren räumliche oder allgemein oberflächliche Anordnung zueinander. Das Modell dieser ersten Stufe erfüllt also die erste Aufgabe

mentaler Modelle, ermöglicht ersten explorativen Umgang mit dem System und stellt gleichzeitig einen Bezugsrahmen zur allmählichen Integration höheren, abstrakteren Wissens über das System zur Verfügung.

In der fortgesetzten Interaktion mit dem System wird das daraus entstehende Systemwissen im Prozess der *Modellinduktion* (Kindsmüller, 2006) sukzessive in das Modell integriert. Dazu muss dieses Wissen in geeigneter, d. h. modellinduktionstauglicher Form vorliegen. Die erste Möglichkeit, an solches Wissen zu gelangen, besteht in der Verfügbarkeit von Affordanzen, d. h. von Interaktionsangeboten seitens des Systems, die als solche erkennbar und zu deuten sind. Die zweite Möglichkeit ist die systematische Schulung, also der Erwerb expliziten Lehrbuchwissens über die Funktionsweise und die inneren Zusammenhänge des Systems. Die dritte Möglichkeit schließlich besteht in der Deduktion dieses Wissens aus beobachtetem Systemverhalten. Anders als die ersten beiden Möglichkeiten besteht diese dritte quasi immer, birgt jedoch gleichzeitig ein besonders hohes Risiko des Erkennens scheinbarer Zusammenhänge, wo keine sind, und der Erzeugung „abergläubischer“ Erklärungen.

Durch die Modellinduktion gelangen wir zu einem mentalen Modell der zweiten Stufe. Erst dieses konzeptuelle oder Kausalmodell besitzt durch die reichhaltigere Abbildung der inneren Zusammenhänge der Modellelemente schließlich auch das Erklärungs- und das Vorhersagepotenzial, um die zweite und die dritte Aufgabe mentaler Modelle, wie sie von Rouse und Morris genannt werden, zu erfüllen.

Im Hinblick auf das in dieser Arbeit untersuchte Gebiet, nämlich intelligente ambiente Systeme, und aufbauend auf den dargelegten Konzeptualisierungen und Konnotationen des Begriffs mentaler Modelle lässt sich zusammenfassend sagen, dass, wenn im Folgenden von mentalen Modellen gesprochen wird, zumeist konzeptuelle Modelle im ingenieurpsychologischen Sinn gemeint sind. Im Hinblick auf ambiente, intelligente Computersysteme umfasst dieser Begriff insbesondere die Fähigkeit des Benutzers,

1. die Funktionsweise des Systems mit eigenen Worten, wenn auch vereinfachend, zu beschreiben,

#### 4.5 *Unterschiedliche Benutzer – unterschiedliche Modelle*

2. seine Interaktion mit dem System, d. h. effektive Handlungen in Bezug auf bestimmte Schnittstellen und die Reaktionen des Systems darauf, zu erklären und
3. Erwartungen hinsichtlich des Systems zu formulieren, d. h. das Verhalten des Systems in einem gegebenen Kontext zu antizipieren.

Das mentale Modell des Benutzers im Sinne seiner internen Wissensrepräsentation ist ebenfalls von Interesse, da das Verständnis der Umstände seiner Konstruktion, seiner Modifikation oder seines Verwerfens helfen können, Gestaltungsregeln für das Design ambienter, intelligenter Systeme zu formulieren. Diese Regeln sollten wiederum die konzeptuellen Modelle der Entwickler solcher Systeme beeinflussen, aber diese Prozesse sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

#### 4.5 UNTERSCHIEDLICHE BENUTZER – UNTERSCHIEDLICHE MODELLE

Unterschiedliche Benutzer haben und brauchen unterschiedliche mentale Modelle von einem System (Herczeg, 2009, S. 51ff., vgl. oben S. 57). Wie in anderen Bereichen der Mensch-Maschine-Interaktion ist es hilfreich, die unterschiedlichen Benutzergruppen im Umfeld eines intelligenten ambienten Systems zu kategorisieren (vgl. Kapitel 6). Diese Unterscheidung ist grundsätzlich abhängig vom jeweils betrachteten konkreten System, von den Interaktionsmöglichkeiten, die es anbietet, aber auch von der jeweiligen Ausprägung der Anwendungsdomäne und den konkreten Einsatzszenarien. In dieser Hinsicht unterscheidet sich die nötige Vorgehensweise also nicht von der Untersuchung klassischer, d. h. nicht ambienter, interaktiver Systeme in der HCI-Forschung.

Für ein konkretes, aber fiktives System und ein bestimmtes forschungsleitendes Erkenntnisinteresse könnten sich z. B. Entwickler, Wartungstechniker, technikferne Jugendliche und technikbegeisterte Senioren als relevante Benutzergruppen ergeben.

Ein mögliches Klassifizierungskriterium sind organisatorische Rollen, also welchen Job jemand im Zusammenhang mit dem System macht, wel-

che Stelle er in einem Unternehmen, das das System einsetzt, bekleidet. Ein anderes Kriterium ist der Kenntnisstand des Benutzers, also ob es sich um einen unerfahrenen Benutzer, einen Gelegenheitsbenutzer, einen Routinebenutzer oder einen Experten handelt, und es sind etliche weitere vorstellbar (vgl. etwa Herczeg, 2009, S. 81ff.). Dass theoretisch eine ahnungslose Administratorin ebenso vorstellbar ist wie ein in seinem Aufgabenbereich virtuoser Sekretär zeigt, dass diese Klassifizierungskriterien voneinander prinzipiell unabhängige Dimensionen darstellen und damit einen Klassifizierungsraum aufspannen. Wie genau dieser Raum beschaffen sein soll, d. h. welche Dimensionen relevant sind, welche Metriken auf ihnen definiert sein sollen und welche Unterräume zu einer bestimmten Benutzerklasse zusammengefasst werden sollen, muss im Einzelfall bestimmt werden. Insofern unterscheiden sich intelligente ambiente Systeme nicht von anderen Systemen, die mit üblichen Verfahren der Mensch-Maschine-Interaktionsforschung untersucht werden. Unter dem Gesichtspunkt ihrer mentalen Modelle unterscheiden sich die jeweils beteiligten Benutzergruppen insbesondere im Hinblick auf die möglichen Interaktionen mit dem System, für die ihr mentales Modell (oder ihre mentalen Modelle) adäquates Erklärungs- und Vorhersagepotenzial besitzt.

So werden z. B. technisch interessierte Nutzer eher technisch geprägte Modelle aufbauen, die auch Repräsentationen für mögliche oder erwartete Fehlermodi einschließen. Besonders unerfahrene Nutzer, die mit dieser Klasse von System bislang keinerlei Kontakt hatten, werden stark phänomenologisch orientierte Modelle aufbauen, schon allein deshalb, weil ihnen die abstrakten Wissensbestände fehlen, um ihr Modell in ein Kausalmodell der zweiten Stufe zu überführen.

Selbst wenn zwei konkrete Benutzer in unserem gedachten Klassifizierungsraum sehr nah beieinander liegen, also z. B. annähernd identische Rollen und Erfahrungen besitzen und mithin derselben Benutzergruppe zugerechnet werden können, haben sie aller Wahrscheinlichkeit nach nicht das gleiche mentale Modell vom System. Ihre mentalen Modelle werden jeweils ähnliche interaktionsrelevante Aspekte abbilden und die Abbildung wird als mentales Modell in beiden Fällen dem Analogieprinzip mentaler

#### 4.6 Adäquatheit und Äquivalenz mentaler Modelle

Modelle Genüge tun (gleiche Beziehungen zwischen Elementen des Basis- und Zielbereichs), aber nicht zwangsläufig auch dem Ähnlichkeitsprinzip (Gleichheit der Elemente selbst, vgl. Abschnitt 4.2). Man kann sagen, dass die mentalen Modelle dieser beiden Benutzer funktional äquivalent hinsichtlich der relevanten Interaktionen sind, jedoch nicht zwangsläufig strukturell identisch. Zwischen unterschiedlichen Benutzergruppen sind deren mentale Modelle nicht funktional äquivalent, weil sie unterschiedliche Interaktionen abbilden müssen. Der Unterschied zwischen verschiedenen Benutzergruppen besteht also nicht allein im Grad ihrer Expertise bzw. in der Qualität ihrer mentalen Modelle des Systems, sondern grundlegend im Inhalt der Modelle, also in den konkreten Interaktionen, die sie überhaupt abbilden.

Anders ausgedrückt: Benutzergruppen eines interaktiven Systems lassen sich so auffassen, dass sie sich in der Art der Interaktionen, die sie mit dem System haben, gleichen oder ähneln und mithin die gleichen Interaktionshandlungen beherrschen müssen. Organisatorische Rollen, Erfahrungsstand etc. sind dabei lediglich Parameter, die diese Kategorisierung leiten. Daraus folgt, dass die mentalen Modelle innerhalb dieser Benutzergruppen hinsichtlich dieser Interaktionen äquivalent sind.

#### 4.6 ADÄQUATHEIT UND ÄQUIVALENZ MENTALER MODELLE

Adäquat sollen solche mentalen Modelle heißen, die in alltäglich auftretenden Interaktionssituationen eine ausreichende Kongruenz<sup>2</sup> zwischen den Strukturen und den daraus durch den Benutzer ableitbaren Vorhersagen des Modells und dem tatsächlich beobachtbaren Verhalten des Systems aufweisen. Ausreichend ist diese Kongruenz dann, wenn sie es dem Benutzer erlaubt, aufgrund der Modellvorhersagen mit dem echten System zu interagieren und dabei nur selten, d. h. im vertretbaren Maß einer ungefähren Erwartungskonformität, zu scheitern.

---

<sup>2</sup>Diese Form der Kongruenz als Maß für die Qualität der Abbildungen eines mentalen Modells ist nicht zu verwechseln mit der Kongruenz zwischen analoger und digitaler Funktionalität eines augmentierten Artefakts, wie sie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben wurden.

Damit ist gemeint, dass Erwartungskonformität im Sinne der Mensch-Maschine-Interaktion (vgl. ISO 9241-110) graduell ist. Um die eigene Erwartungshaltung des Nutzers existiert eine  $\varepsilon$ -Umgebung, die den vom Nutzer noch tolerierten Unterschied zwischen Wunsch und Wirklichkeit beschreibt, also das Ausmaß der Abweichung von der eigenen Erwartung, die noch als konform akzeptiert wird. Wenn wir die tatsächlich beobachtete Abweichung des Systemverhaltens von der Nutzererwartung,  $\delta$ , betrachten, so beschreibt  $\delta \leq \varepsilon$  einen vom Nutzer subjektiv noch als erwartungskonform empfundenen Fall, während  $\delta > \varepsilon$  aus Nutzersicht nicht mehr akzeptabel ist. Dabei ist festzuhalten, dass  $\delta$  sowohl aufgrund einer Fehlfunktion des Systems als auch aufgrund einer ungerechtfertigten Erwartungshaltung des Nutzers entstehen kann.

Wenn zwei unterschiedliche mentale Modelle im Hinblick auf eine bestimmte Interaktion mit einem konkreten System jeweils adäquat sind, dann sind die beiden Modelle *äquivalent* hinsichtlich dieser Interaktion. Die unterschiedlichen Modelle können dabei in unterschiedlichen Benutzern bestehen, für die diese Interaktion jeweils relevant ist. Sie können aber auch im selben Benutzer bestehen, wobei sie entweder nacheinander (vgl. Stachowiaks pragmatisches Merkmal, Abschnitt 4.1) oder gleichzeitig (siehe S. 52) bestehen und sogar genutzt werden können.

#### 4.7 BESONDERHEITEN MENTALER MODELLE AMBIENTER SYSTEME

Mentale Modelle ambienter Systeme werden insbesondere dann benötigt, wenn diese Systeme nicht mehr optimal funktionieren, d. h. wenn sie auf irgendeine Art dysfunktional oder defekt sind. Im Gegensatz dazu müssen Benutzer von Werkzeugen, also auch von Computersystemen mit Werkzeugcharakter, ein adäquates mentales Modell fortlaufend zur Anwendung bringen, um mit dem System zielgerichtet (d. h. nicht bloß explorativ) umgehen zu können. Im Hinblick auf den Umgang des Benutzers mit dem ambienten System können wir also folgern, dass es im Fehlerfall seinen ambienten Charakter einbüßt und Werkzeugcharakter bekommt, also zu einer Extension wird.

#### 4.7 Besonderheiten mentaler Modelle ambienter Systeme

Interessanter sind an dieser Stelle solche Systeme, die ohne jede Änderung ihrer Funktionalität oder Leistungsfähigkeit, allein abhängig vom Kontext ihrer Verwendung durch den Benutzer, mal als Bestandteil ambienten Raums und mal als werkzeughafte Extension des Benutzers erscheinen. Beispielhaft dafür steht das Automobil, das bei der alltäglichen Einkaufsfahrt ein reines Fortbewegungswerkzeug ist, das den Benutzer schneller und mit weit größerer Tragfähigkeit als seine eigenen Füße zwischen Heim und Supermarkt zu expedieren vermag. Während einer lang andauernden Fahrt in den Urlaub aber richtet die Familie sich in ihrem Fahrzeug häuslich ein, arrangiert die benötigte Ausrüstung wie Bücher und Reisespiele, dazu Lebensmittel und Getränke, und dasselbe Fahrzeug bekommt den Charakter eines Lebensraums (wenn auch auf Zeit), dessen technische Ausrüstung wie Unterhaltungselektronik, Navigationsausrüstung, Klimatisierung, Innenbeleuchtung und Fahrassistenzsysteme zu einem ambienten System verschmelzen, das den Raum auf subtile Weise augmentiert und den Aufenthalt in ihm „einfach angenehm“ gestaltet.

Es wurde bereits darauf verwiesen, dass im Fall des Zusammenbruchs des Ambienten, im Fehlerfall, der Raum Maschinencharakter bekommt und seitens des Benutzers andere mentale Modelle (oder überhaupt solche) nebst den geeigneten Mechanismen des Umgangs mit ihnen erforderlich werden. Der Wechsel zwischen den Systemparadigmen („ambientes“ vs. „Werkzeugsystem“) erfordert also die *Umschaltung* zwischen zwei mentalen Modellen.

Es existiert aber noch eine dritte Ebene, die sich zwischen den beiden Extremen einordnen lässt. Es ist dies die Ebene des *Assistenten*, dessen Verhalten mehr oder weniger anthropomorphen Charakter besitzt. Der Assistent zeichnet sich dadurch aus, dass die Interaktion mit ihm nicht vollständig implizit ist wie beim ambienten System (*just right*) und nicht ganz und gar explizit an festen, aktivitätszentrierten Affordanzen orientiert wie beim klassischen Werkzeugsystem. Stattdessen besitzt die Interaktion mit ihm *kommunikativen* Charakter, d. h. dynamische Affordanzen werden situationsabhängig ad hoc erzeugt und Mismatches zwischen mentalem Modell des Benutzers und Kontextmodell des Systems können durch Erklärungen

#### 4 Mentale Modelle

(*explanation awareness*) zum aktuellen Zustand entschärft werden. Prototypisches Beispiel für solche Systeme ist der Computer HAL im Film „2001: Odyssee im Weltraum“.

Ein gut konstruiertes ambientes System sollte diese Ebenenstruktur abbilden und geeignete Übergänge zwischen den Ebenen modellieren, die mit den Modellwechseln seitens seiner Benutzer möglichst übereinstimmen, um die Interaktion zu jedem Zeitpunkt aufrecht erhalten zu können (vgl. Kapitel 6).

Mentale Modelle stellen Handlungswissen dar: „Menschen handeln nach (in doppeltem Sinne) den von ihnen konstruierten mentalen Modellen. Je besser die Modelle – oder die Fertigkeit zur Modellbildung – desto besser die Fertigkeit in der Handlung selbst.“ (Jarz, 1997, S. 79)

Da sich ambiente Systeme gerade dadurch auszeichnen, dass ihre Systemgrenzen verschwimmen und das System nicht klar von den nicht systemzugehörigen Teilen des Raums unterscheidbar ist, ja sogar das Vorhandensein eines ambienten Computersystems insgesamt nicht klar feststellbar ist, solange es hinreichend gut funktioniert, erschweren sie im Vergleich zu herkömmlichen, nicht-ambienten Systemen dem Benutzer den Aufbau eines adäquaten mentalen Modells des Systems. Als Beispiel sei hier das elektrische Leitungsnetz<sup>3</sup> genannt, bei dem sich die Frage stellt, ob das mentale Modell des Benutzers vielleicht nur bis zur Steckdose in der Zimmerwand reicht oder sogar über Leitungsnetz und Kraftwerk hinaus bis zum Braunkohlebagger.

Die mentalen Modelle, die Benutzer ambienter Systeme von diesen Systemen haben, werden sowohl in ihrer Beschaffenheit (Adäquatheit und Fehlerhaftigkeit) als auch in ihrem Modellcharakter (vgl. Abschnitt 4.1) erst sichtbar, wenn das System, aus welchen Gründen auch immer, aus seiner Ambienz herausfällt und als Computersystem sichtbar wird. Die Sichtbarkeiten von System und mentalem Modell, hier insbesondere die Sichtbar-

---

<sup>3</sup>Hier ist wohlgemerkt nicht das im Umfeld der Forschung zu mentalen Modellen vielbemühte Bild des elektrischen Stromkreises als Wasserkreislauf gemeint (Gentner und Gentner, 1983), sondern die Infrastruktur des Leitungsnetzes und seiner Speisung an sich.

keit für den Benutzer selbst, möglicherweise aber auch für externe Beobachter, sind also eng gekoppelt.

Für den Benutzer liegt eine Schwierigkeit bei der Interaktion mit intelligenten Systemen und insbesondere beim Aufbau eines mentalen Modells von ihrer Funktionsweise darin, dass sie möglicherweise unvorhersehbare oder aus seiner Sicht nichtdeterministische Ergebnisse liefern können. Diese Problematik steht in engem Zusammenhang mit den Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit, beeinflusst sie doch ebenso wie die Verfügbarkeit geeigneter Affordanzen den Aufbau eines adäquaten mentalen Modells auf Seiten des Benutzers. Dieser Prozess umfasst im Wesentlichen den Aufbau einer isomorphen Abbildung zwischen der maschinellen Repräsentation der Systemfunktionalität, z. B. im Programmcode, und ihrer menschlichen Repräsentation im Langzeitgedächtnis des Benutzers. Intelligentes, das heißt sich aus dem Benutzer nicht erschließbaren Gründen änderndes Verhalten des Systems lässt seine Inferenzmechanismen zum Aufbau dieses Isomorphismus ins Leere laufen.

#### 4.8 UMGANG MIT DIESEN BESONDERHEITEN

Wenn ein Mensch sich einer bestimmten Situation ausgesetzt sieht, stellt sich die Frage, ob er ein geeignetes mentales Modell besitzt, um mit dieser Situation umzugehen. Im Fall, dass er über ein solches Modell verfügt, muss dieses für ihn sichtbar sein, also zuerst natürlich als existent und danach auch als hier und jetzt anwendbar erkannt werden, um zur Bewältigung der Situation beitragen zu können. Mit *Verfügbarkeit* ist also nicht das bloße Haben, sondern auch die Anwendbarkeit mentaler Modelle in diesem Sinne gemeint.

Wenn ein Benutzer sich einer bestimmten Interaktionssituation ausgesetzt sieht, muss er zunächst versuchen, anhand spezifischer Merkmale diese Situation als Instanz eines bestimmten Kontexts zu identifizieren. Kontext lässt sich hier vereinfacht als eine *Klasse von Situationen* verstehen<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup>In einem Krankenhaus könnte eine Situation, in der die Ärzte Müller und Meier neben dem Bett von Frau Lehmann stehen, eine Instanz des Kontexts Arztvisite sein.

#### 4 *Mentale Modelle*

(vgl. Kapitel 5). Erst nach dieser Klassifizierung der Situation kann er nach einem geeigneten mentalen Modell suchen, das diese Interaktion in diesem Kontext abbildet. Die Identifikation der Situation als einem bestimmten Kontext zugehörig ist umso wichtiger, wenn die Situation unbekannt ist und deshalb nicht auf Anhieb ein adäquates mentales Modell aktiviert werden kann.

Es genügt folglich nicht, bei der Konstruktion eines Systems, zumal eines intelligenten ambienten Systems, auf geeignete Informationsangebote zur Modellinduktion seitens der Benutzer zu achten. Vielmehr muss bei dem Versuch, die Bildung adäquater mentaler Modelle im Benutzer zu fördern, auch deren spätere Auffindbarkeit und Anwendbarkeit bedacht werden. Wenn mentale Modelle durch das Bestehen von Analogiebeziehungen zwischen ihren Ursprungs- und Zielbereichen gekennzeichnet sind, dann besteht eine Möglichkeit, die Verfügbarkeit eines solchen Modells zu erhöhen, darin, das Erkennen der Analogie durch eine geeignete Metapher zu unterstützen (vgl. Abschnitt 4.2).

#### 4.9 FAZIT

In diesem Kapitel wurde aus dem Verständnis verschiedener Forschungstraditionen, was mentale Modelle sind und wie sie beschaffen sind, ein einheitliches Konzept erarbeitet. Mentale Modelle im Sinne der Kognitionspsychologie sind analog-bildhafte Abbildungen im Arbeitsgedächtnis, die sich als topologisches Modell der Gestalt eines Systems verstehen lassen. In der Tradition der Ingenieurpsychologie sind mentale Modelle Strukturen im semantischen Langzeitgedächtnis, die kausale Funktionszusammenhänge abbilden. Diese lassen sich als zweite Entwicklungsstufe begreifen, die aus dem topologischen Modell durch Hinzufügen abstrakten Faktenwissens entstehen kann. Dabei handelt es sich um einen iterativen Prozess, der als Modellinduktion bezeichnet wird.

Aus den beschriebenen Charakteristika mentaler Modelle folgt, dass ein System, dessen ambiente Funktionsweise von der Aufrechterhaltung einer impliziten Form von Interaktion abhängt, sich in dynamischer Art und Wei-

se an die unterschiedlichen mentalen Modelle unterschiedlicher Benutzer und sogar innerhalb eines einzelnen Benutzers sowie an unterschiedliche Kontexte, innerhalb derer die Interaktion stattfindet, anpassen muss. Es muss also kontextsensitiv sein. Die Begriffe Kontext und Kontextsensitivität bzw. Context-Awareness werden im folgenden Kapitel behandelt.



Intelligente ambiente Computersysteme existieren immer innerhalb einer Umwelt und sind gleichzeitig Teil der Umwelt ihrer Benutzer. Sowohl das System als auch der Benutzer befinden sich ebenso wie ihre Umwelt zu jedem Zeitpunkt in einem gewissen Zustand. Die konkreten Gegebenheiten einer solchen Situation eröffnen und begrenzen Handlungsoptionen für die beteiligten Menschen und Systeme. Damit die Akteure adäquat handeln können, müssen sie die relevanten Aspekte der Situation identifizieren und bewerten, um ihr Verhalten daran orientieren zu können. Das bedeutet, sie müssen die Situation einem Kontext zuordnen, also context-aware sein. Erst auf Grundlage dieser Context-Awareness ist kontext-sensitives Verhalten möglich.

„Diese Tendenz, Ordnung in das Beobachtbare zu bringen sowie Sinn und Kausalstrukturen zwischen Ereignissen herzustellen, ist so durchgängig, daß dahinter ein ganz zentrales zugrundeliegendes Motiv des Menschen [...] vermutet wird.“ (Schmalt und Heckhausen, 1990, S. 485)

Jede Veränderung der Gegebenheiten erzeugt eine neue Situation, und diese neue Situation muss von den Akteuren dahingehend bewertet werden, ob sie noch zum vorher erkannten Kontext gehört oder ob sie ihre Handlungen an einem neuen Kontext orientieren müssen. Die Zuordnung von Situationen zu Kontexten, d.h. Context-Awareness, muss also in einem kontinuierlichen Prozess erfolgen. Sofern aufgrund der Veränderung der Situation ein neuer Kontext gegeben ist, ändern sich möglicherweise die

Erwartungen und Anforderungen der Benutzer an das System, und das System muss möglicherweise aufgrund der neuen Parameter andere Funktionalität exponieren und Affordanzen zur Verfügung stellen.

In diesem Kapitel werden die Begriffe Kontext und Situation geklärt und in ihrem Verhältnis zueinander dargestellt. Danach geht es um die Frage, was Context-Awareness für Systeme und für ihre Benutzer jeweils bedeutet. Im Anschluss daran wird in Kapitel 6 herausgearbeitet, inwieweit diese Thematik Architektur und Gestaltung intelligenter ambienter Systeme im Sinne einer erfolgreichen Konstruktion von Interaktion beeinflusst.

### 5.1 KONTEXT UND SITUATION

Die Begriffe Kontext und Situation sowie ihr Verhältnis zueinander werden in der Literatur sehr unterschiedlich definiert. Die Vertreter verschiedener Forschungstraditionen leiten die Begriffe aus den Konzepten ab, die in den jeweils relevanten Theoriesystemen von Bedeutung sind. Ein gemeinsamer Nenner ist nicht immer leicht zu erkennen. Im Folgenden werden einige Ansätze unterschiedlicher Schwerpunktsetzung beispielhaft herausgegriffen und ihre Gemeinsamkeiten herausgearbeitet, um schließlich zu Begriffen zu gelangen, die sich für die interdisziplinäre Auseinandersetzung mit ambienten Systemen eignen.

Turner (1998) hebt in seiner Definition der Kategorie Kontext deren antizipatorischen Charakter hervor. Er definiert Situation als die Gesamtheit der konkreten Umstände und Kontext als diejenigen Attribute der Situation, die handlungslenkende Vorhersagekraft für einen Agenten besitzen. Diese Auffassung korreliert mit dem Verständnis des Begriffs Kontext als generalisierte Klasse von Situationen und des Begriffs Situation als konkrete Ausprägung eines Kontexts (siehe S. 74).

„We use the term *context* to mean any identifiable configuration of environmental, mission-related and agent-related features that has predictive power for an agent’s behavior. The term *situation* is used to refer to the entire set of circumstances surrounding an agent, including the agent’s own internal state. Context

is thus the elements of the situation that should impact behavior.“ (Turner, 1998, S. 308, Herv. i. Orig.)

Brézillon (2007) fokussiert zwar – wie auch Turner – den Akteur innerhalb einer Situation, leitet seinen Kontextbegriff aber stärker aus den Wissensbeständen dieses Akteurs beim Lösen eines konkreten Problems her. Er schreibt:

„Adopting an engineering stance, we will define context as the set of all the knowledge that could be evoked by a human being facing a situation, assuming that he has an unlimited time to think about it.“ (Brézillon und Pomerol, 1999, S. 15)

Kontext besteht bei Brézillon also nicht aus Attributen der äußeren Situation, sondern aus den als situativ relevant beurteilten Wissensbeständen *innerhalb* des Akteurs.

Aus Sicht der Tätigkeitstheorie hingegen ist Kontext keine äußere Kategorie, die um eine Situation gelegt wird und derentwegen sich Menschen in dieser Situation auf eine bestimmte Art verhalten. Nardi (1996) sieht den umgekehrten Fall als gegeben an: Indem Menschen gegenüber einer bestimmten Art von Objekt auf eine bestimmte Art tätig werden, erzeugen sie einen Kontext. Vertreter der Tätigkeitstheorie postulieren, dass Menschen Kontext und dafür relevante Einflussfaktoren in Bezug auf ihre Aktivitäten, d. h. ihre Interaktion mit der Welt, konzipieren.

„Activity theory, then, proposes a very specific notion of context: the activity itself is the context. What takes place in an activity system composed of object, actions, and operation, is the context. Context is constituted through the enactment of an activity involving people and artifacts.“ (Nardi, 1996, S. 76, Herv. i. Orig.)

Alle diese Definitionsansätze heben unterschiedliche Aspekte von Kontext hervor. Turner betont seine Vorhersagekraft für künftige Zustände der Welt,

d. h. dass er über das Hier und Jetzt hinaus weist. Brézillon hebt das Wissen des Akteurs hervor, mithilfe dessen dieser einen Kontext konstituiert. Nardi wiederum konzentriert sich auf die Handlung des Akteurs und sieht Kontext entstehen, wenn alle Elemente einer Situation, die um die eigentliche Handlung herum existieren und diese beeinflussen und ermöglichen, *zusätzlich* zur Handlung betrachtet werden. Der Unterschied liegt für sie in der Menge der betrachteten Elemente.

Gemeinsam ist den genannten Ansätzen, dass der Kontextbegriff in einem bestimmten Bezug zum Begriff der Situation (bzw. Handlung) steht und gewissermaßen aus diesem herleitbar ist. Als basale Unterscheidung zwischen Situation und Kontext lässt sich festhalten, dass erstere eine konkrete Konfiguration von Gegebenheiten zu einem bestimmten Zeitpunkt ist, während der Begriff Kontext sich auf eine Klasse von Situationen bezieht. Die Gegebenheiten, die eine Situation konstituieren, können z. B. ein bestimmter Ort, die dort anwesenden Personen, der konkrete Zeitpunkt oder verwendete Artefakte, d. h. allgemein bedeutsame Objekte sein. Kontext beschreibt das, was an der Situation typisch ist. Dies schließt die Beziehungen zwischen diesen bedeutsamen Objekten ein, wie Nardi (1996, S. 76) betont: „context cannot be reduced to an enumeration of people and artifacts, rather the specific transformative relationship between [them] [...] is at the heart of any definition of context“<sup>1</sup>. Er umfasst diejenigen typischen Features, die unterschiedliche Situationen, die zum selben Kontext gerechnet werden können, miteinander gemeinsam haben. Dazu gehören auch die möglichen Ausprägungen dieser Features, d. h. die gültigen Belegungen der den Kontext konstituierenden Variablen. Wie in der Softwaretechnik dienen Klassen auch hier „zur *Gruppierung* und *Kapselung* von Attributen und dazugehörigen Methoden zu einer konzeptuellen Einheit“ (Rumpe, 2011, S. 17, Herv. i. Orig.).

---

<sup>1</sup>Dass anwesende Personen und Dinge hier zur Situation gerechnet werden, steht nur scheinbar im Widerspruch zur Tätigkeitstheorie. Indem diese Objekte Teil der unmittelbaren Handlung sind, sind sie Teil der Situation. Erst indem sie die einzelne Handlung überdauern *können* und im Gegensatz zu dieser weiterhin existieren *können*, lösen sie sich von ihrer situativen Gebundenheit und werden damit *auch schon innerhalb der Handlung* Kontext

Wenn man alle Attributwerte einer Situation entfernt, erhält man eine Klasse, von der die Situation eine Instanz ist. Umgekehrt gilt: Wenn man die Attribute einer Kontextklasse mit (zulässigen) Werten belegt, erhält man eine (mögliche/denkbar/vorstellbare) Situation als Instantiierung dieses Kontexts. Die Klasse existiert nicht *a priori*, sondern wird durch Auswahl der Attribute konstituiert. Ein Mensch erkennt, dass verschiedene erlebte Situationen gemeinsame Merkmale aufweisen, und durch diese Gemeinsamkeiten entsteht der Kontext, dem diese Situationen zugehörig sind.

„Abstracting situations into contexts helps people to cognitively master the manifold of situations they encounter all the time: they have mental models of certain contexts, which in turn enable them to retrieve scripts and schemas that propose default interpretations, behavior and expected outcomes.“ (Schmitt u. a., 2011)

## 5.2 AWARENESS

In der Auseinandersetzung eines Computersystems – dies gilt ebenso für menschliche Akteure – mit dem ihn umgebenden Zustand der Welt nennen Kofod-Petersen und Cassens (2007) drei aufeinander aufbauende Stufen der Kontextbezogenheit, die sie in aller Kürze wie folgt charakterisieren:

**Perception** The initial act of perceiving the world that the system inhabits

**Context Awareness** Being aware of the environment and reasoning about ongoing situations

**Context Sensitivity** Exhibit appropriate behaviour in ongoing situations

In Bezug auf das zuvor skizzierte Verhältnis zwischen Situation und Kontext ist der Stufe der Wahrnehmung (Perception) die Situation zuzuordnen. Durch die Verarbeitung der so gewonnenen Informationen, durch Klassifizierung und Reasoning, gelangt man auf die Stufe der Context-Awareness. Diese ist, insofern wir von Handlungszusammenhängen sprechen, für sich

genommen wertlos, sofern nicht auf ihrer Grundlage das eigene Verhalten geplant und angepasst wird. Diese Kontextsensitivität ist das eigentliche Ziel des Prozesses und die Awareness nur Mittel zu diesem Zweck. Awareness vollzieht sich also im *Übergang* zwischen Situation und Kontext. Anders ausgedrückt: Context-Awareness ist Situation-Awareness plus Klassifizierung der Situation zwecks Erlangung von Handlungsfähigkeit.

Hier zeigt sich eine starke Parallele zwischen den Konzepten von Situation und Kontext bzw. Awareness und den beiden Entwicklungsstufen mentaler Modelle, dem topologischen und dem Kausalmodell, die in Kapitel 4 Thema waren. In beiden Fällen steht am Anfang eine rein phänomenologische Abbildung, d. h. die Wahrnehmung von Gegebenheiten in der Welt. Aus dieser erwachsen durch Hinzufügen abstrakten Wissens und durch interpretative Prozesse Strukturen, die zu logischem Reasoning und der Projektion von Erwartungen befähigen.

In der Literatur finden sich sowohl der Begriff „situation awareness“ als auch der Begriff „context awareness“. Beide sind eng verwandt, aber es lassen sich Unterschiede im Grad der semantischen Interpretation der Situation identifizieren. Die Gegebenheiten einer Situation können durch zwei unterschiedliche Prozesse Aufmerksamkeit auf sich ziehen und somit ins Bewusstsein gelangen: Einerseits durch einen reizgesteuerten Bottom-Up-Prozess, in dem bestimmte Elemente der Situation quasi automatisch Aufmerksamkeit auf sich ziehen, und andererseits durch einen Top-Down-Prozess, der konzeptgetrieben ist und in dem Erwartungen und erlernte Zusammenhänge die Aufmerksamkeit steuern. Dieser Top-Down-Prozess, der das Erkennen eines Kontexts und den Abruf der damit verknüpften mentalen Modelle beinhaltet, um den Aufmerksamkeitsfokus zu lenken, ist gerade der Prozess der Awareness. Prinz (1990, S. 93) spricht von „willkürlicher Selektion“, weil „die Implementierung der selektiven Wahrnehmungsentention den selektiven Wahrnehmungsprozessen selbst eindeutig vorausgeht“. Der Unterschied zwischen Situation-Awareness und Context-Awareness besteht folglich in der Richtung der Aufmerksamkeitssteuerung, und darin liegen die unterschiedlichen Grade an semantischer Verarbeitung begründet.

Im Bereich Human Factors ist statt von Context-Awareness häufig von Situation-Awareness (SA) die Rede. Dennoch zeigen sich deutliche Parallelen zu den hier diskutierten Konzepten. Endsley u. a. (2003, S. 13) definieren Situation-Awareness als „being aware of what is happening around you and understanding what that information means to you now and in the future“. Die Autorinnen beschreiben drei Ebenen oder *Levels* der Situation-Awareness:

**Level 1** Wahrnehmung der Situation

**Level 2** Verstehen der Bedeutung

**Level 3** Projektion in die Zukunft

Für Awareness im Sinne von Handlungsplanung und -bewertung müssen alle Ebenen durchlaufen werden, da das Wissen um einen momentanen Zustand kaum praktischen Nutzen besitzt, wenn man nicht abschätzen kann, ob der Zustand eine Sekunde später noch vorliegt oder welche Folgezustände stattdessen infrage kommen.

Folgendes Beispiel macht die Unterschiede der drei Ebenen deutlich: Im Zusammenhang mit Situation-Awareness sprechen Militärpiloten und Flugsicherungspersonal auch von „the picture“. Dieser Ausdruck deutet auf den bildhaften Charakter eines zunächst topologischen Modells der *Situation* hin, d. h. auf die Wahrnehmung, welches andere Luftfahrzeug sich zu einem gegebenen Zeitpunkt wo im betreffenden Luftraum befindet, auf welcher Höhe es mit welcher Geschwindigkeit welchen Kurs hält etc. Damit bezieht sich der Ausdruck „the picture“ auf das SA-Level 1, während für die Levels 2 und 3, das Verstehen der Bedeutung der wahrgenommenen Konstellation und die Vorhersage und Planung der Zukunft, das Hinzuziehen weiteren Wissens erforderlich ist, um z. B. eine drohende Kollision oder einen bevorstehenden Luftkampf erkennen und die eigene Handlungsplanung an diesen Erkenntnissen ausrichten zu können.

Hier wird deutlich, dass der Begriff der Situation-Awareness, wie er in diesem Bereich von Endsley et al. verwendet wird, im Grunde das bezeichnet, was von anderen Autoren Context-Awareness genannt wird, so auch

in der vorliegenden Arbeit. Die Begriffe Context-Awareness und Situation-Awareness liegen also näher beieinander, als das oben ausgeführte Verhältnis von Situation und Kontext zunächst suggeriert. Besonders hinsichtlich der zweiten und dritten SA-Ebene finden sich Bezüge zum hier verwendeten Kontextbegriff, weil dort die Beobachtungen der ersten Ebene klassifiziert werden und der erkannte Kontext als Basis für mögliche zukünftige Instantiierungen (Situationen) verwendet wird. Wenn man sich vor Augen hält, dass die Aufmerksamkeitslenkung auf der ersten Ebene ebenfalls nicht rein reizgesteuert (bottom-up) geschieht, sondern auch top-down durch Erwartungen hinsichtlich der Relevanz bestimmter räumlicher u. a. Teilbereiche der Welt gelenkt wird, spielt die Annahme eines bestimmten Kontexts, dem die gegenwärtige Situation zuzurechnen ist, schon hier eine wichtige Rolle. In Endsleys Modell (vgl. Abb. 5.1) erscheint an dieser Stelle das mentale Modell des Handelnden, mit dem die situativen Elemente der drei Stufen jeweils abgeglichen werden. Dies zeigt, dass Kontext ein subjektives Konstrukt ist, das als Teil des mentalen Modells des Akteurs gebildet wird und innerhalb desselben zur Vorhersage bestimmter Parameter einer Situation dient. In dieser Hinsicht ist auch die von Turner erwähnte „predictive power“ relevant, um weitere Handlungsschritte auf die zu erwartenden zukünftigen Systemzustände abstimmen zu können.

Ein Begriff von Situation-Awareness, der sich an den oben herausgearbeiteten Kriterien orientiert, muss also als Unterschied zur Context-Awareness den Grad der semantischen Interpretation der verfügbaren Informationen betonen. Der Kontext muss aus der Situation *abgeleitet* werden. Die Situation muss zu diesem Zweck hinreichend *semantisch reichhaltig* repräsentiert sein, was für reine *Situation-Awareness* entsprechend Endsleys Level 1 zunächst nicht nötig ist.

„Die aktuelle Reizinformation ist nur eine der beiden wesentlichen Informationsgrundlagen des Wahrnehmungsprozesses. Neben ihr geht dauerhaft gespeicherte Information aus dem Wissensgedächtnis des Beobachters als zweite Grundlage in das Endprodukt ein. Wir müssen also annehmen, daß im Wahrneh-

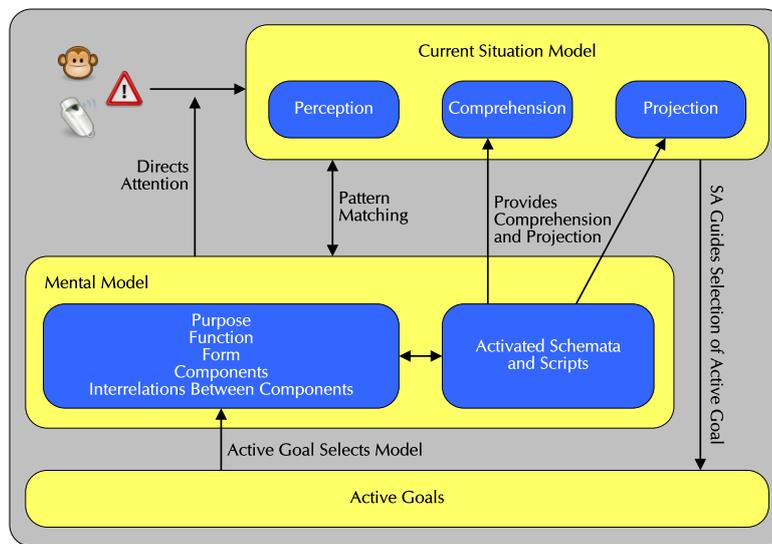


Abbildung 5.1: Endsleys Situation-Awareness-Modell (vgl. Endsley, 2000b).

mungsprozeß Reizinformation und Gedächtnisinformation in ständiger Wechselwirkung stehen. [...] die ‚Entdeckung‘, daß die Wahrnehmung in gewissem Umfang von Eigenschaften der wahrnehmenden Person, von ihren Erwartungen, Motiven und Einstellungen sowie von Eigenschaften der Wahrnehmungssituation abhängt.“ (Prinz, 1990, S. 74)

Endsley (2000a,b) gliedert den Prozess der Situation-Awareness bzw. Context-Awareness in vier Phasen: Erstens befindet sich ein Akteur in einer bestimmten, gegebenen Situation. Zweitens ist es erforderlich, dass er diesen „state of affairs“ wahrnimmt. Drittens lösen bestimmte Parameter bzw. Attributwerte der Situation die Suche nach einem geeigneten mentalen Modell und ggf. dessen Abruf aus („matching“). Viertens ermöglicht dieses mentale Modell das Verständnis („comprehension“) früherer und aktueller sowie die Antizipation zukünftiger Situationen. Deutlich ist hier wiederum die Parallele zur Charakterisierung mentaler Modelle von Rouse und Morris (1986, vgl. S. 59). Das mentale Modell ermöglicht den Zugriff auf Skripte

bzw. Schemata zur kontextsensitiven und damit situationsangepassten Verhaltenssteuerung.

Im Anschluss an diese Ausführungen ist es sinnvoll, Context-Awareness differenziert sowohl im Hinblick auf menschliche Akteure wie auch auf Computersysteme zu betrachten.

„The concept of context awareness is relevant with regard to ambient intelligent computer systems as well as to their users. The former need context awareness to provide their services in a ways [sic] that are unobtrusive and adequate to the situation at hand while the latter depend on the same concept in order to interact with the systems in satisfying and confident ways.“  
(Schmitt u. a., 2011, S. 279)

### 5.3 CONTEXT-AWARENESS IN MENSCHLICHEN AKTEUREN

Menschen brauchen Context-Awareness, um in einer Situation nach geeigneten (adäquaten) mentalen Modellen zum Bewältigung dieser Situation zu suchen. Sie sind von Natur aus context-aware, und auch in der Interaktion mit ubiquitären und ambienten Computersystemen hoher Komplexität müssen sie die Chance haben zu erfassen, wie der Zustand des Systems ist, warum er so ist und was voraussichtlich als Nächstes passieren wird. Wenn den Benutzern die dafür notwendigen Informationen nicht vermittelt werden können, wird sich dies negativ auf die Praktikabilität intelligenter ambienter Systeme in realweltlichen Anwendungsszenarien und auf die Akzeptanz seitens der Benutzer auswirken.

Ein tragfähiges Konzept von Kontext und Context-Awareness in Menschen ist nötig, um die Situiertheit der Wahrnehmung von und Interaktion mit intelligenten ambienten Computersystemen seitens ihrer Benutzer verstehen zu können. Vor diesem theoretischen Hintergrund lassen sich dann Systeme entwickeln, die

- Kontextmodelle auf Grundlage der gewachsenen Anwendungspraxen der Benutzer in der jeweiligen Domäne implementieren,

#### 5.4 Context-Awareness in ambienten Systemen

- Sensoren, Aktuatoren und Affordanzen verwenden, die sowohl zu bestehenden mentalen Modellen der Benutzer passen als auch die Bildung neuer mentaler Modelle unterstützen und
- ausreichend Rückmeldungen und ggf. Erklärungen liefern können, um dem Benutzer den Systemzustand zu vermitteln.

#### 5.4 CONTEXT-AWARENESS IN AMBIENTEN SYSTEMEN

Bei der Konstruktion ambienter Computersysteme stellt sich die Frage, ob solche Systeme prinzipiell auf Context-Awareness angewiesen sind, um die gewünschte Funktionalität leisten zu können. Ducatel u. a. (2001, S. 11) sind der Auffassung, dass dies der Fall ist:

„AmI implies a seamless environment of computing, advanced networking technology and specific interfaces. It is aware of the specific characteristics of human presence and personalities, takes care of needs and is capable of responding intelligently to spoken or gestured indications of desire, and even can engage in intelligent dialogue. ‘Ambient Intelligence’ should also be unobtrusive, often invisible: everywhere and yet in our consciousness – nowhere unless we need it.“

Wie beim Menschen bedeutet context-aware zu werden auch für ambiente Systeme, einen Kontext als gegeben zu erkennen, und dies erfordert eine semantisch reichhaltige Repräsentation der vorliegenden Situation. Da die Semantik realweltlicher Situationen sich nur sehr schwierig in Computersystemen abbilden lässt, stellt sich die Frage, in welchem Ausmaß diese Semantik nötig ist, um Benutzern nützliche Dienste anbieten zu können. Die Vermutung liegt nahe, dass für viele der Funktionen existierender Awareness-Technologien *echte* Context-Awareness nicht unbedingt nötig ist, sondern wesentlich einfachere semantische Modelle und Inferenzen darauf ausreichen. Dennoch können solche Systeme die Context-Awareness ihrer Benutzer fördern. Die besonderen Eigenschaften ambienter Systeme

jedoch, die in Kapitel 3 (vgl. auch Schmitt u. a., 2010) herausgearbeitet wurden, erfordern komplexere Semantik, um der Vielfalt möglicher Eingaben und dem impliziten Charakter ihrer Benutzerinteraktion gerecht werden zu können. Wenn Systeme smart sein sollen, dann müssen sie notwendig context-aware sein, weil sie anders als intelligente Systeme keine *graceful degradation* haben und deshalb bei der kleinsten Unstimmigkeit dumm erscheinen (vgl. Kapitel 3).

Ein ambientes System *ist* in einem Kontext und *erzeugt* gleichzeitig einen Kontext. Für Context-Awareness in digitalen Artefakten oder Netzwerken daraus braucht es mehr als massenhafte Sensoreingaben und verteilte Ausgabekanäle. Im Gegenteil erfordern solche Systeme nicht notwendigerweise eine große Zahl unterschiedlicher Sensoren (Hudson u. a., 2003; Fogarty u. a., 2004). Die tatsächliche Zahl und die Arten von Sensoren hängen vielmehr von der konkreten Anwendungsdomäne des Systems ab. Vor allem sind ambiente Systeme auf eine semantisch reichhaltige Repräsentation des Kontexts angewiesen, d. h. auf ein tieferes Verständnis der sich entfaltenden Interaktionssituation und ihrer Bedeutung für die anwesenden Benutzer (und ggf. auch die abwesenden).

## 5.5 FAZIT

Kontext ist definiert als abstrakte Klassifikation konkreter Situationen. Er hilft Menschen, die Anforderungen dieser Situationen zu bewältigen, indem er den Abruf geeigneter mentaler Modelle und des entsprechenden Wissens unterstützt. Im Gegensatz zu Situation-Awareness erfordert Context-Awareness semantisch reichhaltige Repräsentationen und Abstraktionen relevanter Attribute der vorliegenden Situation. Diese sind der menschlichen Kognition immanent, aber nur schwierig technisch zu modellieren.

Aus den hier skizzierten Konzepten von Awareness können wir folgende Aussagen über ambiente Computersysteme und ihre Benutzer ableiten:

1. Adäquate mentale Modelle von einem System sind notwendige Voraussetzung für die Context-Awareness seitens des Benutzers, während er mit dem System interagiert.

2. Unterstützung bei der Klassifikation von Situationen in Kontexte kann helfen, die Situation-Awareness des Benutzers zu verbessern.
3. Ein System, das hinsichtlich bestimmter Interaktionen context-aware sein soll, benötigt eine Art „mentales Modell“, d.h. eine semantisch reichhaltige Repräsentation der Interaktionssituationen.

Die Gestaltung ambienter intelligenter Computersysteme muss auch diese Erkenntnisse berücksichtigen, wie im folgenden Kapitel deutlich wird.



In diesem Kapitel geht es darum, die Erkenntnisse der vorherigen Kapitel zusammenzufassen und auf dieser Grundlage Schlussfolgerungen darüber zu ziehen, wie intelligente ambiante Computersysteme konstruiert werden müssen, damit die ihnen eingeschriebenen Modelle und die mentalen Modelle ihrer verschiedenen Benutzer so korrespondieren, dass erfolgreiche Interaktion möglich ist. Daraus ergeben sich verschiedene Anforderungen und Notwendigkeiten, die im Folgenden herausgearbeitet werden.

Eine grundlegende Eigenschaft ambienter Systeme ist die (teilweise) Unsichtbarkeit ihrer Ein-/Ausgabegeräte und darauf realisierter Benutzungsschnittstellen. Doch nicht nur die Benutzungsschnittstellen selbst werden unsichtbar, sondern zugleich und auf der Grundlage dessen findet eine Verlagerung von expliziter hin zu stärker impliziter Interaktion statt. Darin liegt eine zweite Art von Unsichtbarkeit, die ambienten Systemen zueigen ist, und dies macht neue Sichtweisen auf die Frage ihrer Benutzbarkeit und Erwartungskonformität erforderlich, wie in Kapitel 3 gezeigt. Im Extremfall ist sich ein Benutzer überhaupt nicht dessen bewusst, dass eine Eingabe an das System stattgefunden hat, wenn diese beispielsweise über längere Zeiträume durch unauffällige Sensoren stattfindet. Indem diese Interaktionen nicht nur implizit sein, sondern auch räumlich wie zeitlich verteilt stattfinden können, wird es für den Benutzer schwieriger, adäquate mentale Modelle vom System aufzubauen, weil er nie oder nur selten Hinweise auf innere Funktionsweisen des Systems erlangen kann (vgl. Abschnitt 4.7). Hinzu kommt, dass ambiante Sensorik und Aktuatorik zuweilen in vorhandene Artefakte des täglichen Lebens eingebettet sind und deren ursprüng-

liche Funktionalität augmentieren oder gar ersetzen und ihnen eine Eigenintelligenz hinzufügen (vgl. Abschnitt 3.2). Wie unter diesen Prämissen die Interaktion zwischen Mensch und Computer gelingen kann, ist Gegenstand dieses Kapitels.

Die Interaktion zwischen einem System und seinen Benutzern findet innerhalb eines Interaktionsraums statt, der durch die vom System angebotenen Funktionen aufgespannt und in gleichem Sinne durch nicht vorhandene Funktionalität begrenzt wird (vgl. Abschnitt 2.3.2). Zugleich befinden sich System und Benutzer zu jedem Zeitpunkt in einer spezifischen Situation, deren Gegebenheiten für alle Beteiligten Handlungsmöglichkeiten eröffnen und begrenzen. Immerhin lassen sich unterschiedliche Situationen als bestimmten Kontexten zugehörig gruppieren (vgl. Abschnitt 5.1), die jeweils typische Interaktionsoptionen aufweisen. Dabei kann es sich um einen Unterraum des gesamten Interaktionsraums zwischen Benutzer und System handeln, in dem die der Interaktion zugrunde liegenden Ziele und Absichten auf einer bestimmten Abstraktionsebene repräsentiert sind. Ambient Systeme müssen Interaktion auf Abstraktionsebenen gewährleisten können, die mit der im mentalen Modell des Benutzers repräsentierten Abstraktionsebene korrespondieren.

Interaktion im hier gemeinten Sinne lässt sich als eine geteilte, d. h. gemeinsam realisierte *Übersetzungsleistung* von Mensch und Maschine begreifen, die die Erzeugung eines *hybriden Aktanten* aus den Beteiligten zum Ziel hat. Erst dieser hybride Aktant, eine Art Mischwesen aus menschlichen und technischen Anteilen, vermag die angestrebte Handlung auszuführen, die weder Mensch noch Maschine allein „vorzuhaben“ oder auszuführen imstande wären. Dieses Konzept entstammt der Akteur-Netzwerk-Theorie (ANT), auf die in Abschnitt 6.4 noch ausführlicher Bezug genommen wird.

Wenn Interaktion auf verschiedenen Abstraktionsebenen stattfinden kann, haben Menschen unterschiedliche mentale Modelle dieser Interaktionen, und das System muss Benutzer und Interaktion ebenfalls unterschiedlich modellieren. Dann müssen die Abstraktionsebenen auf Benutzer- und Systemseite korrespondieren, damit die Interaktion gelingt. Es ist festzuhalten, dass der Wechsel zwischen Ambienz-, Assistenten- und Werkzeugebene

nicht nur im Fehlerfall möglich ist, sondern auch von unterschiedlichen Verwendungskontexten desselben Artefakts oder Raums ausgehen kann.

#### 6.1 UNTERSCHIEDLICHE EBENEN IN DER INTERAKTION MENSCH – SYSTEM

Wenn die Rede von unterschiedlichen Abstraktionsebenen in der Interaktion zwischen Mensch und System ist, müssen zwei unterschiedliche *Arten von Abstraktion* unterschieden werden. Einerseits sind dies (a) die Abstraktionsstufen einzelner Interaktionshandlungen, wie sie in den Ebenenmodellen von Herzeg (2006b) u. a. abgebildet werden. Diese Ebenenmodelle werden in diesem Abschnitt noch ausführlich behandelt. Andererseits treten unterschiedliche Abstraktionsgrade (b) im Zusammenhang mit der kontext- und problemgerechten Modellierung des gesamten Interaktionsprozesses zwischen Mensch und System zutage, also auf einer Metaebene zu den vorgenannten Graden. Herzegs Modell ist hier insofern hervorzuheben, als es beide Arten von Abstraktion vereint. Die oberen drei seiner sechs Ebenen beziehen sich auf die Modellierung der Problemdomäne, die unteren drei auf die konkreten Handlungen in der Interaktion bezüglich dieser Domäne.

Für ein Gelingen der Interaktion müssen die beteiligten Parteien sowohl hinsichtlich (a) als auch (b) verträglich sein. Anders herum ausgedrückt kann Interaktion entweder bei der Ausführung eines konkreten Interaktionsschritts scheitern (z. B. wenn ein Knopfdruck vom System nicht erkannt wird oder der Benutzer einen Knopf zum Drücken sucht, den es nicht gibt) oder bereits in einem fehlerhaften Problemlösungsansatz (z. B. wenn der Bremsassistent in einem „intelligenten“ Auto beim Befahren einer steilen Tiefgaragenrampe bremst, weil der Abstandsassistent einen drohenden Auffahrunfall zu erkennen glaubt).

Wenn die Interaktion aufgrund fehlerhafter Modellierung von Kontext- oder Problemstruktur (b) scheitert, führt dies zur Auswahl einer falschen Ebenenstruktur (a), sodass auch die innere Korrektheit der letzteren keine erfolgreiche Interaktion zu gewährleisten vermag. In diesem Fall wird die Korrektur des Fehlers in (b) zwangsläufig zur Auswahl einer anderen

Ebenenstruktur in (a) führen, weil die Annahme einer geänderten Kontext- und Problemstruktur andere Interaktionsschritte erforderlich macht.

In Kapitel 4 wurde dargestellt, dass mentale Modelle nicht zuletzt aufgrund ihrer induktiven Entstehungsweise notwendig idiosynkratisch sind und somit keine zwei Benutzer desselben Systems dieselben mentalen Modelle von diesem System haben. Die Benutzer eines Systems können sich aber nicht nur hinsichtlich ihrer Modelle für die gleichen Interaktionen mit dem System unterscheiden, sondern auch hinsichtlich der Interaktionen mit dem System, für die sie überhaupt geeignete mentale Modelle mit hinreichendem Erklärungs- und Vorhersagepotenzial besitzen. Diese Tatsache wird im folgenden Abschnitt 6.2 genauer erörtert.

Jede Mensch-Maschine-Interaktion ist auf verschiedenen Detail- und Abstraktionsebenen beschreibbar. In der Literatur finden sich unterschiedliche Beschreibungen dieser Abstraktionsebenen, von denen hier die von Herczeg (2006b), Rasmussen (1983) und Norman (1986) beschrieben und verglichen werden.

### 6.1.1 Herczeps 6-Ebenen-Modell

Das 6-Ebenen-Modell von Herczeg (vgl. ders., 2006b, S. 19ff.) kann als Weiterentwicklung der aktivitätstheoretischen Ansätze von Leont'ev (1978) gesehen werden und besteht aus vier Schemata, die sich auf kommunikationsorientierte und handlungsorientierte Systeme beziehen und die Interaktion zwischen diesen und ihren Benutzern jeweils aus Sicht beider Parteien in sechs Abstraktionsebenen gliedern. Es handelt sich in allen vier Fällen jedoch um dieselben Ebenen, deren Belegung sich je nach Interaktionstyp und -richtung unterscheidet. Die folgende Beschreibung bezieht sich auf die handlungsorientierte Interaktion, wobei Unterschiede zwischen den system- und benutzerseitigen Belegungen der unterschiedlichen Ebenen jeweils deutlich gemacht werden.

Die höchste, abstrakteste Ebene bildet in allen Modellen die *intentionale Ebene*, auf der Aufgaben und Ziele der Interaktionspartner großmaßstäblich abgebildet sind. Auf der *pragmatischen Ebene* darunter wird durch

## 6.1 Unterschiedliche Ebenen in der Interaktion Mensch – System

„verfahrens- und problemorientierte Unterstützungsfunktionen“ (Herczeg, 2006b, S. 28) die Manipulation der Interaktionsobjekte sichergestellt, um (Teil-)Ziele der Interaktion zu realisieren. Bei klassischen Computersystemen sind dies die bekannten Formen von Ein- und Ausgabeschnittstellen. Auf der *semantischen Ebene* befinden sich diese Interaktionsobjekte, die manipuliert und deren Zustände erkannt werden.

Die bisher genannten Ebenen betreffen die kontext- und problemgerechte Modellierung der Interaktion, während sich die folgenden auf die einzelnen Interaktionshandlungen beziehen, die diese Modellierung realisieren.

Der Umgang mit den Interaktionsobjekten der semantischen Ebene gehorcht gewissen Regeln, die die räumlich-zeitliche Struktur ihrer Wahrnehmung und Manipulation strukturieren. Diese Regeln bilden die *syntaktische Ebene* und bestehen ihrerseits aus Zeichen, deren Ein- und Ausgabe die *lexikalische Ebene* der Interaktion bildet. Auf der untersten, der *sensomotorischen Ebene* schließlich dreht sich alles um die Signale, mit deren Hilfe die Zeichen übermittelt und somit alle höheren Ebenen vermittelt werden. Diese sechs Ebenen durchlaufen sowohl der Mensch als auch das System, mit dem er interagiert, im Rahmen ihrer Interaktion. Dabei ist jede Seite sowohl mit dem Erkennen der Aktivitäten der anderen Seite als auch mit dem Erzeugen eigener Aktivitäten, initial oder beziehend auf vorherige Aktivitäten, beschäftigt. Für einen grafischen Überblick über Herczegs Schema vgl. Abb. 6.1.

### 6.1.2 Drei bzw. fünf Ebenen bei Rasmussen

Ähnlich wie Herczeg stellt auch Rasmussen (1983, S. 257) fest: „humans are not simply deterministic input-output devices but goal-oriented creatures who actively select their goals and seek the relevant information“. Unter Berufung auf Rosenbluth und Wiener stellt er fest, dass Menschen teleologische Kreaturen sind, denn ihr Verhalten „is modified *during its course* by signals from the goal.“ (ebd., Herv. i. Orig.) Hier zeigt sich auch bei Rasmussen der bidirektionale Charakter von Mensch-Maschine-Interaktion, während er sein Stufenschema schwerpunktmäßig aus der menschlichen Per-

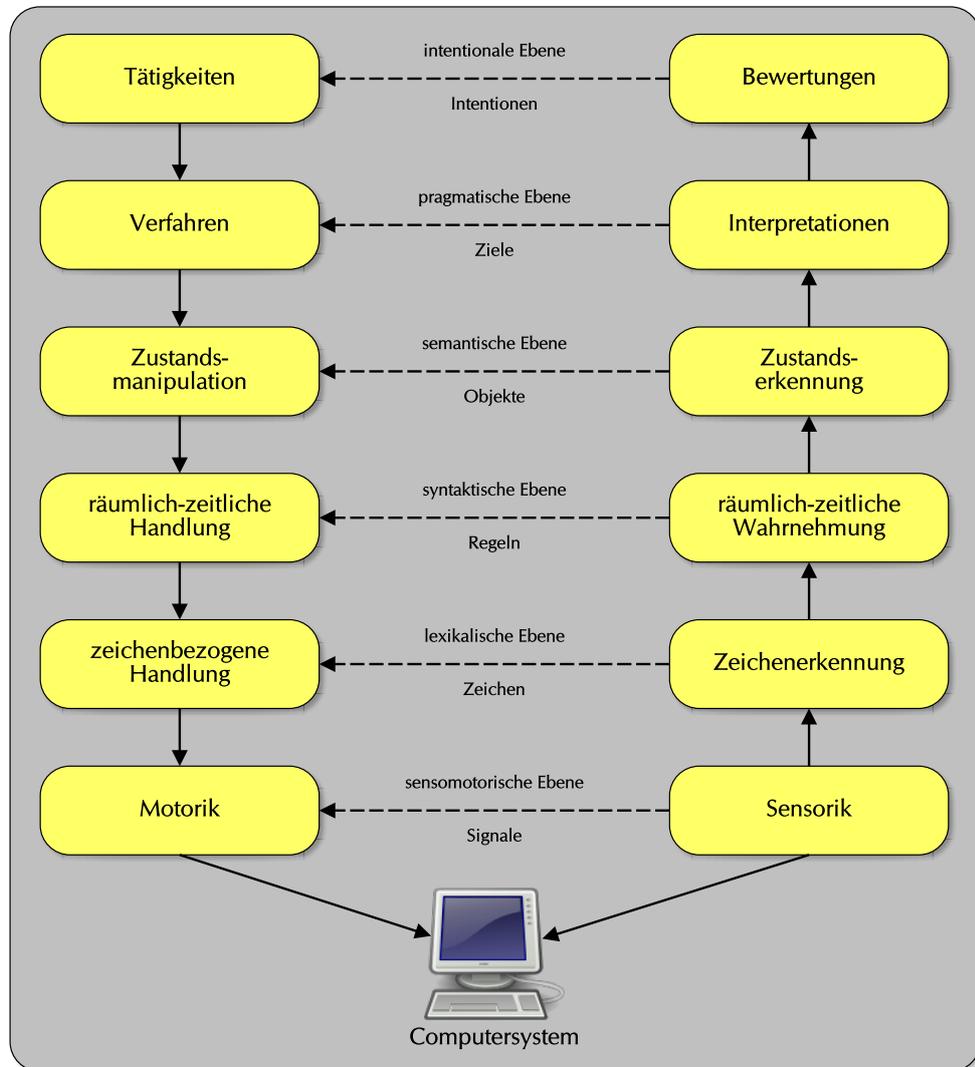


Abbildung 6.1: Herzigs 6-Ebenen-Modell für menschliche Handlungen.

## 6.1 Unterschiedliche Ebenen in der Interaktion Mensch – System

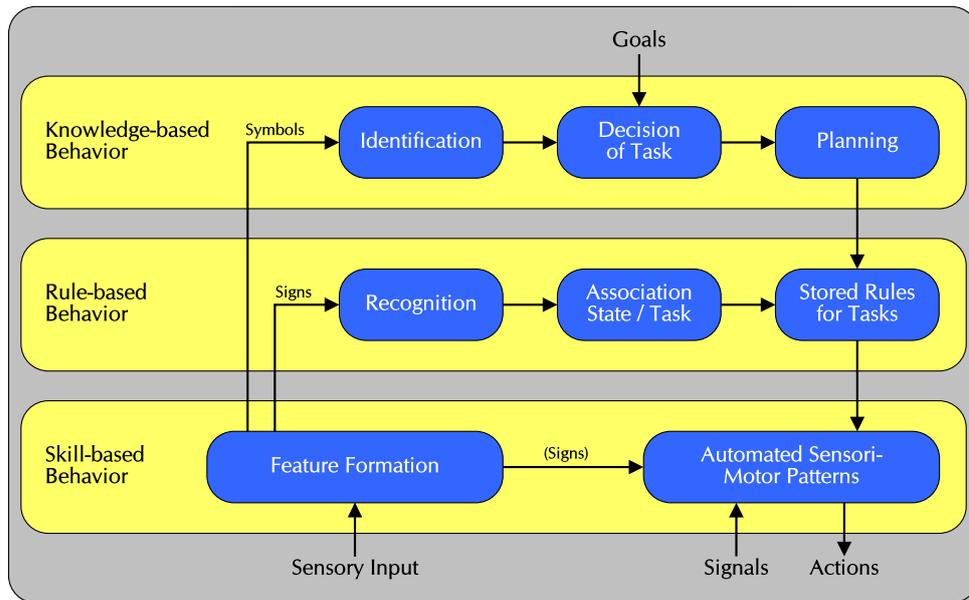


Abbildung 6.2: Rasmussens drei Ebenen menschlichen Verhaltens (vgl. Rasmussen, 1983).

spektive formuliert. In diesem Sinne gliedert auch Rasmussen menschliches Verhalten im Allgemeinen und menschliche Interaktion mit technischen Artefakten im Speziellen in mehrere Ebenen, von denen er im zitierten Aufsatz drei identifiziert: *skill-based*, *rule-based* und *knowledge-based behavior* (vgl. Abb. 6.2). Seiner wissensbasierten Ebene entsprechen dabei im Wesentlichen Herzegs intentionale und pragmatische und semantische Ebenen, dessen syntaktische und nicht-automatisierte lexikalische Funktionen beziehen sich auf Rasmussens regelbasiertes Verhalten, und Sensomotorik ebenso wie hoch automatisierte lexikalische Zeichenmanipulation lassen sich als *skill-based* charakterisieren.

In ihrem Werk „Cognitive Systems Engineering“ gliedern Rasmussen u. a. (1994) den Interaktionsraum zwischen Benutzer und System in fünf Abstraktionsstufen, die sie als *means-ends relations*, also Mittel-Ziel-Relationen bezeichnen. Auf der obersten Ebene sind Bedeutung und Zweck der Interaktion, außerdem Werte(systeme) des Benutzers sowie Einschränkun-

## 6 Die Konstruktion von Interaktion

gen, die in der Umwelt begründet liegen, repräsentiert. Auf der darunter liegenden Ebene geht es um abstrakte Funktionsrepräsentationen und Metriken zu ihrer Priorisierung. Die dritte Ebene beschreibt *general functions*, aus denen die abstrakten Funktionen zusammengesetzt sind, jedoch unabhängig von ihrer physischen Ausführung. Letztere sind in Form von Prozessen und Aktivitäten auf der nächsten Ebene abgebildet. Auf der untersten Ebene schließlich stützt die gesamte Interaktion sich auf die physische Form und Konfiguration der Elemente, auf die im Rahmen der Interaktion eingewirkt wird. Ein entscheidendes Charakteristikum dieses Schemas ist, dass das, *was* auf einer der Ebenen repräsentiert ist, geschieht, *weil* es für die nächst höhere Ebene erforderlich ist, und so *wie* es aufgrund der nächst niedrigeren Ebene implementiert ist. Darauf bezieht sich der Ausdruck „means-ends relations“. Es sind, so Rasmussen u. a. (1994, S. 36ff.), einerseits diese fünf Stufen und andererseits die für den spezifischen Akteur leistbaren Zerlegungen des ihm gegenüber stehenden Systems in Teilsysteme und Komponenten, die letztlich seinen Interaktionspfad in Bezug auf seine Interaktionsziele bestimmen.

### 6.1.3 Norman: Sieben Schritte auf vier Ebenen

Norman (1986) untergliedert Interaktionshandlungen eines Benutzers mit einem technischen Artefakt in insgesamt sieben Schritte. Über der gesamten Interaktion steht ein Ziel (*goal*, entsprechend der Intention bei Herzog), von dem ausgehend Intentionen formuliert werden (vgl. Herzogs Ziele). Die Intentionen werden, so Norman, in Handlungssequenzen übersetzt und diese ausgeführt. Gewissermaßen auf dem Rückweg wird zunächst der neue Systemzustand wahrgenommen, anschließend interpretiert und schließlich im Hinblick auf das übergeordnete Ziel ausgewertet. Wie in Abb. 6.3 deutlich wird, ordnen sich diese sieben Interaktionsschritte in vier Ebenen an, auf denen (abgesehen von der Zielrepräsentation) wie bei Herzog jeweils ein Handlungs- und ein Bewertungsschritt liegen.

6.1 Unterschiedliche Ebenen in der Interaktion Mensch – System

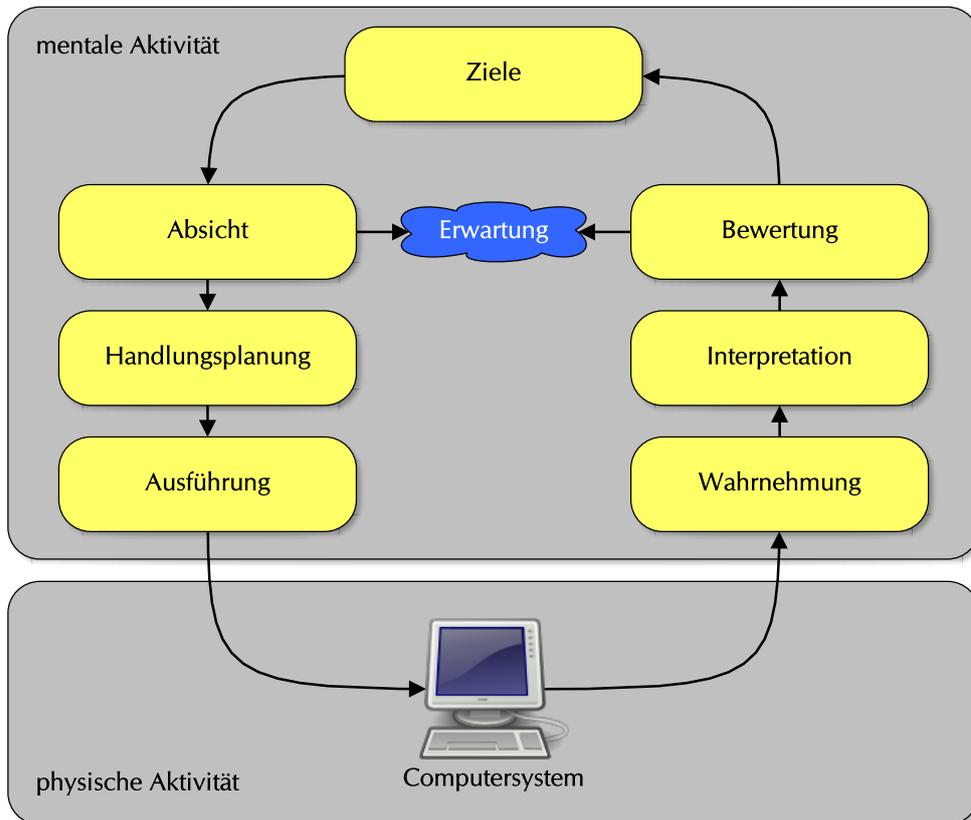


Abbildung 6.3: Normans sieben Schritte auf vier Ebenen. Abgesehen von der Zielrepräsentation erfolgt auf jeder Ebene ein Handlungs- und ein Bewertungsschritt.

### 6.1.4 Gemeinsamkeiten der drei Modelle

Alle drei der oben referierten Ebenenmodelle bilden drei Haupt-Ebenen ab, nämlich wissensbasierte, regelbasierte und physische Ebenen, auch wenn sie diese z. T. mit weiteren Differenzierungen versehen. Diese Ebenen unterschiedlich abstrakter Sichten auf die Mensch-Computer-Interaktion beziehen sich auf eine ganz bestimmte Interaktionshandlung. Das Ziel dieser einzelnen Interaktionshandlung ist jedoch im Rahmen einer übergeordneten Kontext- und Problemrepräsentation definiert, die somit eine Metaebene zu den einzelnen Interaktionen, die in ihrem Rahmen stattfinden, bildet.

Beispielhaft kann das Zusammenwirken dieser unterschiedlichen Ebenen seitens des Benutzers wie folgt skizziert werden: Zunächst existiert eine Wahrnehmung des vorliegenden Kontexts und eines zu lösenden Problems, z. B. dass es in der Wohnung abends zu früh kühl wird. Auf dieser Grundlage wird ein mentales Modell aktiviert, das geeignet erscheinende Erklärungs- und Lösungsansätze beinhaltet, z. B. dass die Nachtabenkung der Heizung auf 20 Uhr programmiert ist und wie dies geändert werden kann. Diese Erklärungs- und Lösungsansätze lenken anschließend die konkrete Interaktion, z. B. das Drücken bestimmter Tasten auf der Heizungssteuerung in Abhängigkeit von bestimmten Anzeigehalten. Hier greifen die Ebenenmodelle von Herzeg, Rasmussen, Norman etc. Wenn das Problem der zu frühen Auskühlung der Wohnung nicht durch eine verstellte Nachtabenkungsurzeit verursacht wird, sondern durch eine vorgehende Echtzeituhr der Heizungssteuerung, wird eine an sich korrekte Interaktion im Sinne der Ebenenmodelle zwangsläufig spätestens dann scheitern, wenn im Menü der Nachtabenkung klar wird, dass diese sehr wohl auf 24 Uhr eingestellt ist.

Für jede Interaktion werden – aus der Innensicht des Benutzers – die Abstraktionsebenen bis zu einem bestimmten Maß an Konkretisierung bewusst durchlaufen. Dieses Maß ist von den verfügbaren mentalen Modellen abhängig. Mit zunehmender Routine werden die konkreteren Ebenen der Interaktion u. U. nicht mehr bewusst durchlaufen, sondern im Sinne des psychologischen Begriffs von Automatisierung (vgl. etwa Anderson, 2001,

## 6.2 Notwendigkeit unterschiedlicher Modelle auf Benutzerseite

S. 100f.) zu einem großen *Chunk* zusammengefasst. In Rasmussens *Decision Ladder* wird dieser Mechanismus als „shortcuts“ abgebildet: „Stereotyped processes can by-pass intermediate stages.“ (Rasmussen und Goodstein, 1985, S. 6)

### 6.2 NOTWENDIGKEIT UNTERSCHIEDLICHER MODELLE AUF BENUTZERSEITE

Die unterschiedlichen mentalen Modelle in Bezug auf einen Interaktionsgegenstand unterscheiden sich in erster Linie im Detailgrad, in dem die Systemfunktionalität abgebildet wird, um die Modellierung einer Problemstellung bzw. eines Anwendungskontexts und geeigneter Lösungsansätze zu ermöglichen. Wie bereits erwähnt, kann erst im Rahmen einer solchen problembezogenen Modellierung eine konkrete Interaktionshandlung ausgewählt werden, die sich wiederum in die drei grundlegenden Ebenen der Modelle von Herczeg, Rasmussen und Norman gliedern lässt, nämlich in wissensbasierte, regelbasierte und automatisierte Interaktion.

Aus umgekehrtem Blickwinkel lässt sich formulieren, dass unterschiedliche vorhandene konzeptuelle Modelle unterschiedliche Interaktionen zwischen Benutzer und System überhaupt erst ermöglichen, weil sie Modellierungen von Interaktionssituationen zulassen, die für die Lösung bestimmter (Klassen von) Problemstellungen taugen und für andere nicht. Dies wird im bereits angeführten Beispiel der verstellten Heizungsuhr deutlich. Ein konzeptuelles Modell des Heizungssystems, in dem eine Echtzeituhr nicht enthalten ist, verhindert eine situative Modellierung der Problemstellung, die zur Lösung dieses Problems überhaupt tauglich wäre. Erst mit (einem Modell) der Echtzeituhr kann eine Interaktionssituation erzeugt werden, in der – bei erfolgreichem Durchschreiten der übrigen Abstraktionsebenen – eine Problemlösung möglich ist.

Aus den geschilderten Verhältnissen und dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen Konzept der Modellinduktion folgt unmittelbar, dass unterschiedliche Notwendigkeiten für Interaktion unterschiedliche Affordanzen erfordern, die vom System auf geeignete Weise exhibiert werden, um die differenzierte Bildung mentaler Modelle zu ermöglichen, die jeweils für die

problemgerechte Modellierung einzelner Interaktionssituationen geeignet sind. Gründe dafür können beispielsweise sein

- unterschiedliche Rollen im Umgang mit dem System, etwa Endanwender, Techniker oder Entwickler
- unterschiedliches Verständnis aufgrund bereits vorhandener Modelle (s.o.), entweder in Bezug auf genau diesen Interaktionsgegenstand oder bzgl. analoger bzw. metaphorisch vergleichbarer Interaktionen
- unterschiedliche Kontexte, in denen die Interaktion stattfindet und aufgrund derer unterschiedliche Modelle in *demselden* Benutzer bzw. System aktiviert werden. Derselbe Benutzer kann also ggf. kontextabhängig unterschiedlichen Benutzergruppen zugerechnet werden.

Dies lässt sich am Beispiel eines Gas- und Wasser-Installateurs illustrieren. Dieser hatte bereits vor Beginn seiner Berufsausbildung ein mentales Modell des Heizungssystems in seiner Wohnung. Zu diesem Modell kommen im Laufe der Ausbildung verschiedene neue Modelle hinzu, die beispielsweise für die Planung eines neuen Heizungssystems oder für die Behebung bestimmter Fehlerbilder geeignet sind. Nach Feierabend interagiert der Installateur mit dem Heizungssystem in seiner Privatwohnung aber üblicherweise wieder als Endbenutzer, zumindest solange das System fehlerfrei funktioniert. Im Fehlerfall kann er natürlich auch zu Hause seine professionellen Modelle aktivieren.

Die unterschiedlichen mentalen Modelle ermöglichen den Abruf der jeweils geeigneten Schemata / Skripts zum Umgang mit dem jeweils gegebenen Kontext (vgl. Endsley u. a., 2003, S. 23ff.) in einer konkreten Interaktionssituation. Die Rollen, die nicht zuletzt durch die mit den jeweils angemessenen konzeptuellen Modellen möglichen Problemmodellierungen konstituiert werden, können nicht nur zwischen Personen, sondern auch innerhalb einer Person je nach Kontext (vgl. Kapitel 5) variieren. Der Installateur verliert sein bereits vor Beginn der Berufsausbildung vorhandenes mentales Modell nicht, sondern baut auf dessen Basis ein weiteres Modell für andere Problemkontexte auf und behält beide Modelle, sodass er mit

### 6.3 Notwendigkeit unterschiedlicher Modelle auf Systemseite

dem System in unterschiedlichen Kontexten in unterschiedlichen Rollen interagieren kann. Die Besonderheit in diesem Fall liegt darin, dass der Installateur die Rolle wechseln kann, sobald er in eine Situation gerät, in der das aktuelle mentale Modell keine problemgerechte Modellierung mehr ermöglicht. Andere Benutzer müssen in diesem Fall z. B. einen Experten konsultieren.

#### 6.3 NOTWENDIGKEIT UNTERSCHIEDLICHER MODELLE AUF SYSTEMSEITE

In Abschnitt 3.2 wurde dargestellt, dass ambiente Systeme sich von anderen insbesondere dadurch unterscheiden, dass ihre Interaktion mit ihren Benutzern *implizit* erfolgt. Dass die Benutzer eines Systems in Abhängigkeit von den notwendigen oder gewünschten kontextbezogenen Interaktionen ggf. unterschiedliche mentale (d. h. hier: konzeptuelle) Modelle vom System benötigen, wurde in Abschnitt 6.2 herausgearbeitet. Speziell in der Interaktion zwischen ambienten Systemen und ihren Benutzern sind aber auch seitens des Systems unterschiedliche und womöglich gar dynamische Modellierungen dieser Interaktionen erforderlich. Einem ambienten System muss, wie jedem anderen System auch, ein Modell seiner eigenen Funktionalität eingeschrieben sein. Im Unterschied zu klassischen Computersystemen genügt es bei ambienten Systemen aber nicht, ein einziges oder einige wenige mentale Modelle des Benutzers zu antizipieren. In Herzegs Notation ausgedrückt (vgl. Abschnitt 4.3.2) werden also mehrere  $S(S(A))$  benötigt. Die weiteren Anteile an der Herstellung einer Passung zwischen den Modellen auf System- und auf Benutzerseite wird dort dem Benutzer überlassen, indem er sein eigenes Systemmodell  $B(S(A))$  anpassen muss oder bestenfalls in engem Rahmen das System konfigurieren und damit begrenzt an seine Vorstellungen adaptieren kann. Aufgrund des impliziten Charakters ambienter Interaktion muss ein solches System besonders flexibel sein, weil es in den impliziten Handlungen des Benutzers die Belegung der oberen, abstrakteren Stufen der Ebenenmodelle nach Herzeg, Rasmussen und Norman erkennen muss, um seinerseits die Korrespondenz der Modellierungen gewährleisten zu können.  $S(B(S(A)))$  muss hier also als dynamisches

Modell zur Adaption des Systems an das Wissen des Benutzers über das System implementiert werden. Dafür sind möglichst fein abgestufte Modelle des Benutzers bzw. von dessen Modellen erforderlich. Schlimmstenfalls – bezogen auf den ambienten Charakter der Interaktion – muss das System einen Teil der Adaptionarbeit dem Benutzer aufbürden, indem es in den Modus des kommunikativen Assistenten (vgl. Abschnitt 3.3.2) zurückfällt und erforderliche Affordanzen zur Verfügung stellt, die dem Benutzer die Auswahl eines adäquateren mentalen Modells oder die Differenzierung des vorhandenen ermöglichen. Die Aufgabe, die Korrespondenz der beiderseitigen Modelle zu sichern, teilen sich Benutzer und System in diesem Fall.

Klassische analoge, werkzeughafte Artefakte implementieren typischerweise nur sehr wenige funktionale Modelle, häufig sogar nur ein einziges, und stellen an ihren Benutzer dementsprechend hohe Anforderungen, was die Abstraktion dieser Funktionalität und ihre Übersetzung in Funktionalität höherer Ebenen und schließlich seine eigenen Handlungsintentionen betrifft. Im Laufe der technischen Weiterentwicklung und der Erschaffung immer komplexerer und auch multifunktionaler Werkzeuge wurde diese Übersetzungsleistung zwar nicht obsolet, jedoch ließen sich mit der Kenntnis einer physischen Schnittstelle des Artefakts nun mehrere Zustände mittlerer Abstraktionsebenen erreichen, die wiederum zum Erreichen mehrerer unterschiedlicher Intentionen dienen konnten.

Bei herkömmlichen Computersystemen, die seit geraumer Zeit in Arbeits- und Freizeitkontexten zum Einsatz kommen, spricht man nicht umsonst von der *Universalmaschine*, da sie mithilfe unterschiedlichster Softwarepakete für unglaublich viele Zwecke eingesetzt werden können. Innerhalb eines funktionalen Systems, also des Zusammenwirkens des Computers mit einer spezifischen Anwendungssoftware, sind zwar möglicherweise viele unterschiedliche Modelle implementiert, d. h. hier: viele unterschiedliche Wege, die gleiche Intention zu erfüllen. Diese Modelle sind jedoch typischerweise statisch. Die gemeinsame Übersetzungsleistung von Benutzer und System beginnt hier also nicht mehr auf der physischen Ebene, sondern kann abstrakter formuliert werden. Ehn und Kyng (1986) konstatieren, der Computer „reduces the jobs of the workers to algorithmic procedures“,

### 6.3 Notwendigkeit unterschiedlicher Modelle auf Systemseite

wobei sie ihre Betonung eher auf die Beschränkung der Entscheidungsfreiheit und weniger auf die Entlastung des Benutzers legen.

Die Problematik, die sich aus den unterschiedlichen Verortungen und der möglichen Delegation der Übersetzungsleistung ergibt, fasst Norman (1986, S. 51) zusammen: „Simple tools have problems because they can require too much skill from the user. Intelligent tools can have problems if they fail to give any indication of how they operate and of what they are doing.“

Ambiente Systeme stellen den Extremfall der Delegation der Übersetzung zwischen den unterschiedlichen Abstraktionsebenen dar, weil die Interaktion mit ihnen, solange sie tatsächlich „ambient“ funktionieren, aus Sicht des Benutzers ausschließlich intentional definiert ist. Allenfalls ein Bewusstsein des gewünschten Zielzustandes der Welt ist benutzerseitig erforderlich. In der Interaktion mit einem System, das als kommunikativer Assistent in Erscheinung tritt, muss der Benutzer zusätzlich zur intentionalen Ebene auch die pragmatische und die semantische Ebene mehr oder weniger bewusst durchlaufen, um im Dialog mit dem System seine Intentionen vermitteln zu können. Im Fall eines Systems, das im Modus einer werkzeughaften Extension arbeitet, muss der Benutzer seine Absichten bis auf die syntaktische Ebene explizieren, um mit den festgelegten Schnittstellen des Systems regelgerecht interagieren zu können. Abb. 6.4 zeigt dieses Inklusionsverhältnis.

Die lexikalische und die sensomotorische Ebene der Interaktion werden vom Benutzer nicht in gleicher Weise bewusst durchlaufen, da die Lexikalik in hohem Maße kulturell vorgeprägt ist und sensomotorische Handlungen vielfach trainiert und dadurch hochgradig automatisiert sind.

Die Chance, die sich aus der Entwicklung intelligenter Systeme ergibt, besteht darin, dass diese die in ihnen wirksamen Modelle des Kontexts und der Interaktion dynamisch lernen bzw. erzeugen können. Das bedeutet, sie können sich „on the fly“ auf unterschiedliche benutzerseitig vorhandene bzw. wirksame Modelle des gewünschten Zustandes der dem System zugänglichen Welt einstellen. Man kann sagen, dass das System dem Benutzer auf seinem Weg durch die Interaktionsebenen gewissermaßen ent-

## 6 Die Konstruktion von Interaktion

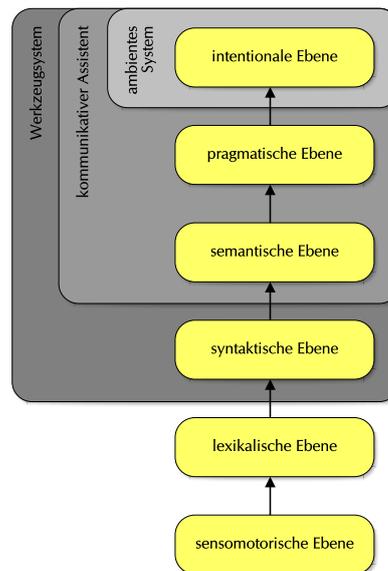


Abbildung 6.4: Die drei Funktionsmodi von Systemen. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Interaktionsebenen, die der Benutzer *explizit* und damit bewusst durchlaufen muss (vgl. S. 99).

gegenkommt, um ihm Interaktion so nah wie möglich an der intentionalen Ebene, d.h. so ambient wie möglich, anbieten zu können. Im Falle intelligenter ambienter Systeme bedeutet dies, die Magie (vgl. Abschnitt 3.2.2) robuster zu machen. Ansätze, wie diese *adaptive Abstraktion* erzielt werden kann, werden in Abschnitt 6.5 erörtert.

### 6.4 AMBIENTE SYSTEME UND IHRE BENUTZER ALS HYBRIDE AKTANTEN

Wie eingangs dieses Kapitels bereits erwähnt, kann die erfolgreiche Interaktion zwischen Benutzer und System beschrieben werden als die Bildung eines hybriden Aktanten aus den beiden, und erst dieses Mischwesen kann die gewünschte Handlung im Zusammenwirken seiner Bestandteile realisieren. Dieses Konzept entstammt der Akteur-Netzwerk-Theorie (ANT), deren Vokabular helfen kann, die Bedingungen für den Erfolg der Hybridisierung zu formulieren.

## 6.4 Ambiente Systeme und ihre Benutzer als hybride Aktanten

### 6.4.1 Grundbegriffe der Akteur-Netzwerk-Theorie

In diesem Abschnitt werden einige grundlegende Begriffe der ANT eingeführt, die für das Verständnis der Anwendung dieser Theorie auf das Thema ambiente Systeme unerlässlich sind. Andere, ebenfalls wichtige Begriffe werden nicht dargestellt, da es nicht darum geht, eine ganzheitliche Einführung in die ANT zu leisten. Für einen umfassenden Überblick über die ANT und ihre Geschichte empfiehlt sich der Sammelband von Belliger und Krieger (2006a).

Der Mensch handelt nicht alleine, sondern stützt sich dabei auf Hilfsmittel und handelt unter Bezugnahme auf natürliche sowie im weitesten Sinne technisch erzeugte Gegebenheiten. Nicht nur der Mensch an sich, sondern auch diese „Partner“ sind handlungsfähig, weil Technik bei ihrer Konstruktion die Übernahme vormals menschlichen Handelns eingeschrieben bekommt und damit selbst Handlungspotenzial erhält. Kombinationen aus Mensch, Anwendung eines Artefaks und/oder Ausnutzung natürlicher Gegebenheiten sind hybride Aktanten, deren einzelne Bestandteile in einem soziotechnischen Netzwerk zusammentreten, um gemeinsam zu handeln. Diese soziotechnischen Netzwerke entstehen in sogenannten Übersetzungsprozessen, in denen der Teilakteur, aus dessen Perspektive die Betrachtung des Netzwerks erfolgt, die übrigen Teile in das Netzwerk integriert bzw. diese ihre Integration selbst vollziehen. Belliger und Krieger (2006b) identifizieren vier wesentliche Schritte des Übersetzungsprozesses, der zur Bildung eines handlungsfähigen soziotechnischen Netzwerks, also eines hybriden Aktanten führt. Diese vier Teilprozesse müssen vollständig durchlaufen werden, damit ein stabiles, handlungsfähiges Netzwerk entstehen kann. Im Folgenden werden diese vier Teilprozesse kurz dargestellt, um im nächsten Abschnitt herauszuarbeiten, wie sie sich auf die Interaktion zwischen einem ambienten System und seinem Benutzer beziehen lassen, um diese Interaktion als Ergebnis eines Hybridisierungsprozesses im Sinne der ANT zu charakterisieren.

Der erste Schritt auf dem Weg zu einem handlungsfähigen Aktanten ist die *Problematisierung*. Der Hauptakteur formuliert ein zu lösendes Problem.

## 6 Die Konstruktion von Interaktion

Entscheidend ist dabei, dass andere menschliche, technische oder natürliche Akteure, die zur Lösung beitragen könnten, das Problem zu ihrem Problem machen können und sich damit gewissermaßen zur Mitwirkung bereit erklären. Als zweites folgt das *Interessement*. Damit ist gemeint, dass der Hauptakteur für sich und die anderen Akteure Identitäten, Rollen und Funktionen findet, die sie zur Lösung des Problems annehmen sollen, und dass sie dazu auch bereit sind. Auf das *Interessement* folgt das *Enrolment*, in dem die Akteure die ihnen zugewiesenen und von ihnen akzeptierten Rollen auch tatsächlich einnehmen. Dieser Prozess ist reziprok, d. h. auch der Hauptakteur muss seine Rolle im Netzwerk annehmen und seine evtl. bestehenden Rollen in anderen Netzwerken dafür u. U. modifizieren. Den vierten und letzten Schritt zum handlungsfähigen Netzwerk bildet die *Mobilisierung*. Nun treten die beteiligten Akteure in Transaktionen ein, d. h. sie tauschen Vermittlungsinstanzen aus. Diese „Sprache“ des Netzwerks kann beispielsweise aus Geld, Waren oder Informationen bestehen. Im Austausch der Vermittlungsinstanzen entsteht nun das Netzwerk, und es ist umso stabiler, je länger die Vermittlungsketten sind.

Diese Übersetzungsprozesse, das so entstehende soziotechnische Netzwerk und das darauf aufbauende Konzept eines hybriden Aktanten lassen sich auf die Interaktion zwischen ambienten Systemen und ihren Benutzern anwenden.

### 6.4.2 Erfolgreiche Hybridisierung als Korrespondenz der Abstraktionsebenen auf Benutzer- und Systemseite

Das Verhältnis zwischen einem ambienten System und seinem Benutzer lässt sich mit den Begriffen der ANT beschreiben, und die Übersetzungsprozesse, die in dieser Sichtweise für eine erfolgreiche Interaktion ablaufen müssen, machen die Notwendigkeit der Korrespondenz der Abstraktionsebenen auf beiden Seiten deutlich.

Bereits in der Phase der *Problematisierung* ist es entscheidend, dass der Benutzer in der Lage ist, sein Problem so zu formulieren, dass seitens des Systems eine korrespondierende Modellierung des Problems existiert, um die

#### 6.4 *Ambiente Systeme und ihre Benutzer als hybride Aktanten*

Möglichkeit einer diesbezüglichen Interaktion, d. h. der Etablierung eines entsprechenden soziotechnischen Netzwerks erkennen zu können. Dem *Interessement* entspricht auch in der hier betrachteten Interaktion die Aufteilung der jeweiligen Aufgaben im Rahmen der gemeinsamen Aktivität zwischen Benutzer und System, d. h. die Übereinkunft, welche Teile vom Benutzer respektive vom System übernommen werden sollen und wie diese verzahnt werden können. Während des *Enrolments* zeigt sich dann, ob die beteiligten Parteien in der Lage sind, die zuvor ausgehandelte Aufgabenteilung tatsächlich zu übernehmen. Im vorliegenden Fall wird sich das Enrolment vor allem in der Erwartungshaltung der jeweils anderen Partei manifestieren, also im Zugriff auf ein konzeptuelles Modell, mithilfe dessen erwartete Transformationen des gemeinsam gebildeten Handlungssystems formuliert werden. Während der *Mobilisierung* treten schließlich die Ebenenmodelle von Herzog, Rasmussen und Norman in Erscheinung, denn das Gelingen der Interaktion und damit der Konstruktion des hybriden Aktanten aus Benutzer und System hängt nun entscheidend davon ab, dass konkrete Interaktionshandlungen, d. h. Iterationen gegenseitiger Ein- und Ausgaben, als Vermittlungsinstanzen in Zirkulation gebracht werden können.

Erfolgreiche Mensch-Technik-Interaktion lässt sich also entlang der Begriffe der ANT als erfolgreicher Vollzug der Hybridisierung beschreiben. Genauer gesagt ist die erfolgreiche Bildung eines hybriden Aktanten Voraussetzung für sein Handeln, dessen Vollzug wir hier als Interaktion (der Aktanten-Bestandteile) bezeichnen.

Oben wurde bereits ausgeführt, dass die Verbindung zwischen Mensch und System auf unterschiedlichen Ebenen zwischen basal physischer und abstrakt-intentionaler Form repräsentierbar ist, und ganz offenbar gelingt Interaktion nur dann, wenn beiderseits kompatible Repräsentationen auf den unterschiedlichen Ebenen zum „Andocken“ bereitstehen.

In dem Maße, wie das System seine Repräsentationen auf den unterschiedlichen Ebenen an die des Benutzers anpassen kann und diesen damit von Anpassungen seiner Repräsentationen entlastet, kann es als ambientes System funktionieren. Dazu ist es zugleich erforderlich, dass die Repräsen-

tationen auf der höchsten, der intentionalen Ebene nicht nur zueinander passen, sondern auch dem tatsächlich „in der Welt“ vorliegenden Problem angemessen sind. Ein System kann folglich umso besser als ambientes System funktionieren, je besser es diese *adaptive Hybridisierung* zu unterstützen vermag. Die adaptive Hybridisierung realisiert sich nicht nur in der einzelnen Interaktionssituation, d. h. in der einzelnen Handlung des hybriden Aktanten, sondern ist eine Funktion der Interaktions*historie* zwischen Benutzer und System.

Die Interaktion zwischen einem ambienten Computersystem und seinem Benutzer sollte sich möglichst an den vorhandenen mentalen Modellen des Letzteren orientieren. Das System sollte also die von ihm angebotenen Interaktionsmöglichkeiten so darbieten, dass sie sich erstens auf die Kontext-Klassifikation der aktuellen Situation durch den Benutzer beziehen und zweitens in ihrer konzeptuellen Modellierung innerhalb dieses Kontexts weitestmöglich den Modellen des Benutzers entsprechen. Ein Umschalten in den kommunikativ-assistiven Funktionsmodus, d. h. die dynamische Erzeugung von Affordanzen oder gar die Exposition statischer, nicht-ambienter Benutzungsschnittstellen sollte nach Möglichkeit vermieden werden. Im weitesten Sinne sollte sich demnach jede Form von „Erziehung“ des Benutzers auf unvermeidliche „Recovery“ beschränken, wenn die Korrespondenz der Interaktionsebenen bereits gescheitert ist.

Der wichtigste Grund für diese Priorität liegt darin, dass mentale Modelle idiosynkratisch und relativ resistent gegenüber Korrekturen und Erweiterungen sind (vgl. Abschnitt 4.1). Eine Anpassung der systemseitigen Modelle ist also tendenziell leichter zu bewerkstelligen. Aus Entwicklersicht ist diese Form der Adaption darüber hinaus leichter zu kontrollieren und – bei Verfügbarkeit adäquater technischer Rahmenbedingungen – auch leichter zu implementieren.

Ein weiterer und aus diesem ersten folgender Grund für die Verlagerung der Adaptionleistung auf Systemseite ist, dass das Verschwinden der Interaktion mit ambienten Systemen und ihr impliziter Charakter aus Sicht des Benutzers definiert ist. Darin liegt ja auch eine der wesentlichen Eigenschaften ambienter Systeme (vgl. Abschnitt 3.2). Im Umkehrschluss lässt

sich festhalten, dass implizite Interaktion und damit der ambiente Charakter des Systems nur gewährleistet ist, wenn der Benutzer die intentionale Interaktionsebene nicht verlassen muss, also nicht gezwungen ist, seine Absichten auf konkretere Formen der Interaktion herunterzubrechen. Für den Benutzer soll die Interaktion möglichst die genannten Eigenschaften aufweisen, während dem System selbstverständlich jederzeit „bewusst“ sein darf (und muss), dass eine Interaktion stattfindet und welchen Modellen diese gerade folgt.

Um den kognitiven Aufwand für den Benutzer möglichst gering zu halten, sollte sich also, soweit irgend möglich, stets das System dem Benutzer anpassen und nicht umgekehrt. Lediglich im Fall, dass das mentale Modell des Benutzers so gravierende Fehler oder Lücken aufweist, dass die Anpassung auf Systemseite nicht ausreicht, um eine Korrespondenz der beiden Seiten zu erreichen, müssen dem Benutzer Möglichkeiten geboten werden, sein mentales Modell zu berichtigen oder weiterzuentwickeln.

### 6.5 SICHERSTELLEN DER KORRESPONDENZ DER EBENEN

Wenn einerseits die Verantwortung für die Korrespondenz der Interaktionsebenen möglichst beim ambienten System liegen soll und andererseits der Benutzer möglichst nicht mit expliziten Erhebungen zu seiner Kontext-Klassifikation der vorliegenden Situation behelligt werden soll, muss das System über andere Mittel und Wege verfügen, die nötigen Informationen zu erlangen, d. h. das Vorliegen eines bestimmten Kontexts zu erkennen. Innerhalb einer gegebenen Anwendungsdomäne kann davon ausgegangen werden, dass dem System domänenspezifische Sensorik ebenso zur Verfügung steht wie geeignete Aktuatorik, um Ausgaben in einer Art und Weise zu tätigen, die sich unauffällig in die zu erwartenden Situationen integriert und eine implizite Interaktion zwischen Benutzer und digital augmentierter Umgebung bestmöglich unterstützt.

Welche Teile der systeminternen Modellierung vom Entwickler des Systems vorgedacht und zur Entwicklungszeit implementiert werden müssen und welche Teile seiner Umwelt das System zur Laufzeit modellieren kann,

wird sich von System zu System und von Anwendungsdomäne zu Anwendungsdomäne unterscheiden. In Verwendungszusammenhängen, die stark formal strukturiert und wenig dynamisch sind, ist die Menge der unterschiedlichen Kontexte, in denen sich die beteiligten Akteure bewegen, besser abzuschätzen als in solchen Domänen, die hochgradig flexibel und dynamisch sind und für die die zu erwartenden Handlungskontexte nicht ohne Weiteres angebbbar sind. In ersterem Fall kann ein größerer Teil der Adaptionsfähigkeit des Systems zu seiner Entwicklungszeit vorausgeplant und implementiert werden, sodass seine Fähigkeiten zur Kontextmodellierung zur Laufzeit einen vergleichsweise geringeren Stellenwert besitzen. Die Anpassungsleistung des Systems beschränkt sich dann auf die Einordnung vorliegender Situationen in die vorgegebenen Kontexte. In letzterem Fall ist diese vorgängige Modellierung nicht möglich, sodass ein größerer Teil davon zur Laufzeit stattfinden muss. Entsprechend mächtiger müssen die Subsysteme sein, die die Identifikation von Kontexten ermöglichen. Die Schwierigkeiten liegen dabei weniger im Auffinden stochastischer Häufungen von Sensorwerten und probabilistischer Korrelationen zwischen ihnen, sondern in der Zuordnung semantischer Interpretationen, um die Übereinstimmung mit den subjektiven Kontextmodellen des Benutzers zu gewährleisten.

Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, sollten Anpassungsleistungen bevorzugt seitens des Systems erfolgen. Entsprechend ist die maßgebliche Instanz für die Klassifikation von Kontexten der Benutzer. Daraus und aus dem idiosynkratischen Charakter mentaler Modelle (vgl. Abschnitt 4.2) folgt, dass es nicht möglich ist, die erforderlichen Modelle, insbesondere  $S(B(A))$ , dem System zur Entwicklungszeit einzuschreiben. Vielmehr muss gewährleistet sein, dass das System diese Modelle dynamisch zur Laufzeit aufbauen kann. Wie Bainbridge (1979) darlegt, gibt es keine zuverlässige Möglichkeit, die mentalen Modelle des Benutzers zu erheben, ohne sie im Zuge dessen möglicherweise zu verändern. Bainbridge (ebd., S. 417) betont „the absolute necessity of validating reports against non-verbal behaviour“. Sie bezieht sich in ihrer Darstellung zwar auf verbale Berichte der Benutzer, ihre Argumente gelten jedoch ebenso für andere Ausdrucksformen. Da

durch eine explizite Rückfrage o.ä. die implizite Interaktion gestört wird, was nach Möglichkeit vermieden werden soll, muss das System eine Art implizite Modellierung betreiben, indem es, aufbauend auf seiner domänenspezifischen Sensorik, die mentalen Modelle des Benutzers „nachbildet“, um seine Interaktionsangebote darauf abzustimmen. Die von Bainbridge geforderte Validierung kann unter Inkaufnahme ihrer disruptiven Auswirkungen zusätzlich vorgenommen werden, falls geeignete Metriken eine zusätzliche Absicherung der impliziten Modellierung nahelegen.

Die Verantwortung für die Korrelation der Interaktionsebenen kann jedoch nicht allein dem System auferlegt werden. Zwei Fälle, in denen die Mitwirkung des Benutzers erforderlich ist, sollen hier Erwähnung finden. Erstens ist dies der Fall, wenn alle verfügbaren mentalen Modelle des Benutzers derart unvollständig oder fehlerhaft sind, dass auf ihrer Grundlage keine praktikable Adaption seitens des Systems möglich ist. Zweitens handelt es sich um den Fall, dass das System aus den erhobenen Daten keine sinnvolle Kontextmodellierung ableiten kann und sich deshalb beim Benutzer rückversichern muss. Beides sind typische Fälle, in denen der kontrollierte Wechsel des Funktionsmodus, z. B. hin zum kommunikativen Assistenten, wünschenswert ist, um im Dialog mit dem Benutzer dessen Modelle und/oder die des Systems so zu verbessern, dass die ambiente Funktionsweise des Systems wieder hergestellt werden kann. Das System muss in diesen Fällen die intentionale Interaktionsebene seines ambienten Funktionsmodus verlassen und als kommunikativer Assistent zusätzlich auf pragmatischer und semantischer Ebene mit dem Benutzer interagieren. Im Falle des Versagens auch dieses Modus erfordert die Interaktion des dann klassischen Werkzeugsystems eine Repräsentation der Interaktion bis hinunter auf die Ebenen der Syntax, Lexikalik und Sensomotorik.

## 6.6 FAZIT

In diesem Kapitel wurden, aufbauend auf in den vorhergehenden Kapiteln herausgearbeiteten Begriffen, die Rahmenbedingungen für die implizite Interaktion zwischen einem intelligenten ambienten System und seinen Be-

nutzern dargestellt. Um diesen Rahmenbedingungen gerecht zu werden, muss ein ambientes System bestimmte Fähigkeiten besitzen, die im Folgenden zusammenfassend dargestellt werden.

Die etablierten Ebenenmodelle von Herzeg, Rasmussen und Norman postulieren, dass die Interaktion zwischen Mensch und System auf unterschiedlich abstrakten Ebenen beschrieben werden kann. Dies gilt sowohl für die Planung, Ausführung und Evaluation einzelner Interaktionshandlungen als auch für die Modellierung des gesamten Interaktionskontexts und des zu lösenden Problems. In Herzegs Modell ist die abstrakteste Ebene die *intentionale Ebene*, auf der der Benutzer seine Absichten formuliert. In zunehmender Konkretisierung werden diese abstrakten Absichten heruntergebrochen bis auf einzelne Muskelbewegungen und Sinneswahrnehmungen, die die *sensomotorische Ebene* bilden.

Verschiedene Benutzer haben unterschiedliche mentale Modelle von einem System, abhängig von ihrem Vorwissen und von den Problemstellungen und Verwendungskontexten, bezüglich derer sie mit dem System interagieren. Aber auch ein einzelner Benutzer kann, wenn er in unterschiedlichen Rollen mit dem System interagiert, unterschiedliche mentale Modelle parallel aufbauen, besitzen und entwickeln sowie rollen- bzw. kontextabhängig zur Anwendung bringen. Die mentalen Modelle des Benutzers können allerdings nicht kurzfristig verändert werden. Zwar kann das System ihm Informationen anbieten, die es ihm ermöglichen, sein Modell zu verfeinern oder fehlerhafte Abbildungen zu korrigieren, aber diese Prozesse sind mit erheblichem kognitivem und letztlich auch zeitlichem Aufwand verbunden, sodass eine Adaption auf Systemseite häufig effizienter ist.

Damit die Interaktion gelingt, müssen die vom System angebotenen Interaktionsmöglichkeiten und Affordanzen zu den mentalen Modellen des Benutzers passen. Die Ebenen, auf denen eine Interaktion modelliert wird, müssen seitens beider Beteiligten miteinander korrespondieren. Das bedeutet, dass auch das System unterschiedliche Modelle von seinen Benutzern haben muss.

Der Grundgedanke beim Entwurf ambienter Computersysteme ist die *implizite Interaktion* zwischen Benutzer und System. Das heißt, der Benut-

Der Benutzer soll seine Intentionen möglichst wenig konkret spezifizieren müssen, um zu einer erfolgreichen Interaktion mit dem in seiner Umgebung eingebetteten System zu gelangen. Anders gesagt soll das System dem Benutzer weitestmöglich die Ebenen hinauf entgegen kommen.

In der Interaktion zwischen Mensch und Maschine lassen sich im Wesentlichen drei unterschiedliche *Funktionsmodi* identifizieren, nämlich der ambiente Modus, der des kommunikativen Assistenten und der einer werkzeughaften Extension. Diese Modi lassen sich auf bestimmte Ebenen innerhalb der erwähnten Ebenenmodelle beziehen:

- Die Interaktion mit einem ambienten System findet auf der intentionalen Ebene statt,
- die Interaktion mit einem kommunikativen Assistenten erfordert zusätzlich die pragmatische und semantische Ebene und
- die Interaktion mit einem Werkzeugsystem muss der Benutzer bis auf die syntaktische Ebene reflektieren.

Der Erfolg bei der Konstruktion eines „möglichst ambienten“ Systems läuft letztlich auf die Frage hinaus, wieviel das System über einen vorliegenden Verwendungskontext und die diesbezüglichen mentalen Modelle seines Benutzers wissen kann. Dabei ist es unerheblich, ob diese systemseitigen Modelle ihm zur Entwicklungszeit eingeschrieben wurden oder ob es sie zur Laufzeit *in situ* erzeugt. Anders ausgedrückt ist die Frage nach der Ambienz eines Systems die Frage nach den Grenzen seiner Modelle und nach dem Zeitpunkt, an dem in Ermangelung adäquater Modelle ein Rückgriff auf explizite Interaktion mit dem Benutzer notwendig wird. Daraus ergeben sich zwei grundlegende Regeln für das Design ambienter Systeme.

Erstens bestimmt die Dynamik der jeweiligen Anwendungsdomäne, d. h. die Schwierigkeit, adäquate Modelle derselben zur Entwicklungszeit vor auszuplanen, die nötige Mächtigkeit der KI-Subsysteme, mit denen solche Modelle nötigenfalls zur Laufzeit erzeugt und angepasst werden können.

Zweitens kommt es auf die Fähigkeit des Systems an, seinen Funktionsmodus und damit die Abstraktionsebene der Interaktion mit seinem Be-

nutzer in Abhängigkeit seiner Modellgüte zu wechseln. Sofern ein hinreichend funktionales Modell der aktuellen Interaktionssituation anwendbar ist, kann das System die Intention des Benutzers antizipieren und vollständig implizit mit ihm interagieren. Falls die Anwendbarkeit eines vorhandenen Modells unsicher ist, kann sich das System als kommunikativer Assistent beim Benutzer rückversichern, um die Interaktionssituation auf einer weniger abstrakten Ebene erfolgreich abzuschließen. Außerdem kann es so ggf. sein Modell oder das des Benutzers korrigieren oder weiterentwickeln, um im Idealfall in den ambienten Modus zurückzukehren. Falls keines der verfügbaren Modelle adäquat scheint, kann das System schließlich als klassisches Werkzeugsystem in Erscheinung treten, um zum Preis der vollständigen Übertragung der erforderlichen Übersetzungsleistung auf den Benutzer dennoch ein Mindestmaß an expliziter Funktionalität anbieten zu können.

In den vorangehenden Kapiteln wurden die theoretischen Grundlagen entwickelt, um intelligente ambiente Systeme an die mentalen Modelle ihrer potenziellen Benutzer anzupassen. Es wurde dargestellt, in welcher Art welche Erscheinungsformen solcher Systeme sich dem Benutzer darbieten müssen, damit dessen mentale Modelle mit den Interaktionsmöglichkeiten und Affordanzen des Systems korrelieren können. Für die praktische Umsetzung von Systemen, die dies leisten können, wird ein Software-Framework benötigt, dessen Architektur die Anbindung der benötigten Funktionsmodule und Service-Provider ermöglicht und definierte Schnittstellen für deren Einbindung in die Funktionslogik des Systems bereitstellt. Kapitel 7 stellt praktische Möglichkeiten vor, die Anforderungen an ein solches Framework umzusetzen. Anhand der Ergebnisse der Arbeitsgruppe am Institut für Multimediale und Interaktive Systeme (IMIS) der Universität zu Lübeck wird beispielhaft eine Architektur dafür skizziert.

Weil in der heutigen Welt intelligente ambiente Systeme und ihre Benutzer in unterschiedlichen Kontexten so funktionieren, wie in den Kapiteln 2 bis 5 gezeigt, muss ihre Interaktion in der in Kapitel 6 dargestellten Form stattfinden. Dies lässt sich beispielhaft auf der Grundlage eines Software-Frameworks wie CAKE (Bouck-Standen u. a., 2013) in real existierende Anwendungssysteme implementieren. Kapitel 7 dient also der abschließenden Illustration und Dokumentation der Umsetzbarkeit dieser Konzepte in Software.

Für die pragmatische Umsetzung unterschiedlicher Systeme zum praktischen Einsatz ist es wünschenswert, die spezifisch intelligent-ambiente

Funktionalität in größerem Maße zu kapseln und die Entwickler weitestmöglich von deren Spezifika zu entlasten. Am IMIS wurden verschiedene Versuche unternommen, ein solches vereinheitlichtes AmI-Framework zu konzipieren und prototypisch zu implementieren.

Wesentliche Schritte dieses Prozesses werden in diesem Kapitel skizziert und anschließend wird dessen Ergebnis, das *Context-Aware and Knowledge-based Environment (CAKE)*, vorgestellt. Die Architektur von CAKE bietet die Möglichkeit, sämtliche intelligent-ambientale Funktionalität eines eben solchen Systems in einem standardisierten Rahmen umzusetzen, während die domänenspezifischen Elemente des Systems mit möglichst wenig Einschränkungen und Vorgaben daran angebunden werden können. CAKE kann und soll aber nicht nur zur Implementierung einsatzfähiger Anwendungssysteme dienen, sondern ermöglicht aufgrund seiner offenen, flexiblen Architektur zugleich den Bau von Forschungssystemen, die helfen, das Verständnis der Interaktion zwischen intelligenten ambienten Systemen und ihren Benutzern weiter zu untersuchen. Mithilfe dieser Forschungssysteme können in zukünftigen Projekten die theoretischen Grundlagen, die in dieser Arbeit dargestellt werden, empirisch untersucht und Hypothesen getestet werden.

Im Folgenden werden zunächst die Anforderungen an ein vereinheitlichtes AmI-Framework aus den Ausführungen der vorhergehenden Kapitel abgeleitet. Anschließend werden wesentliche Konzepte und Ideen, die den Entwicklungen am IMIS zugrunde liegen, dargestellt und wichtige Schritte ihrer Evolution aufgezeigt. In Abschnitt 7.3 wird die Architektur von CAKE beschrieben und aufgezeigt, welche Möglichkeiten sie für die Entwicklung anwendungsbezogener intelligenter ambienter Systeme bietet.

### 7.1 ANFORDERUNGEN AN EINE AMI-ARCHITEKTUR

Welche Anforderungen an ein ambientes Computersystem gestellt werden müssen, das „intelligent“ sein soll im Sinne einer oberflächlichen, phänomenologischen, aber möglichst robusten Art von „Magie“ wurde in den vorigen Kapiteln dieser Arbeit herausgearbeitet und im Wesentlichen in Ka-

pitel 6 zusammengefasst. Um seinen Benutzern die qualitative Erfahrung scheinbar intelligenter Funktionalität bieten zu können, muss die grundlegende Softwarearchitektur eines solchen Systems geeignet sein, diese Anforderungen abzubilden und umzusetzen.

Als erste wichtige Anforderung wurde die Fähigkeit des Systems identifiziert, unterschiedliche Modelle sowohl der Interaktionskontexte als auch der mentalen Modelle seiner Benutzer vorzuhalten. In Abhängigkeit von der Güte dieser verschiedenen Modelle und Metamodelle kann das System Interaktion auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen respektive in den drei Funktionsmodi als ambientes System, kommunikativer Assistent oder werkzeughafte Extension anbieten, um den Absichten und Erwartungen des Benutzers bestmöglich entgegenzukommen.

Abhängig von der Komplexität und Dynamik der konkreten Anwendungsdomäne ergibt sich außerdem die Notwendigkeit für mehr oder weniger mächtige KI-Subsysteme, um fehlende, unvollständige oder qualitativ unzureichende Modelle zur Laufzeit erzeugen oder anpassen zu können.

Wie in Kapitel 3 bereits ausgeführt wurde, zeichnen sich insbesondere jene ambienten Systeme, die sich aus der Vernetzung und Kommunikation räumlich (und auch zeitlich) verteilter Systeme im Sinne des *Ubiquitous Computing* ergeben, durch große Heterogenität ihrer Soft- und Hardware aus. Dieses problematische Moment wird dadurch entschärft, dass softwareseitig zumindest auf den unteren Kommunikationsebenen<sup>1</sup> standardisierte und daher interoperable Schnittstellen und Protokolle eingesetzt werden.

Auf den höheren Protokollschichten hat es sich durchgesetzt, eine Middleware einzusetzen (vgl. etwa Ranganathan und Campbell, 2003; Henricksen u. a., 2005; Baldauf u. a., 2007) Diese ermöglicht es einerseits, inkompatible Protokolle der angeschlossenen Endpunkte ineinander zu übersetzen. Andererseits bietet sie einen guten Ansatzpunkt für eine Vermittlungsinstanz auf semantischer Ebene, z. B. eine KI-Komponente, die die Kommunikation zwischen den beteiligten Subsystemen koordiniert und kontextsen-

---

<sup>1</sup>Schichten 1 bis 4 im OSI-Modell (ISO/IEC 7498-1: International Telecommunication Union, 1994), u. U. auch Schicht 5

sitive Funktionalität erst ermöglicht. In diesem Sinne ist eine solche Middleware als Vermittlungsinstanz integraler Bestandteil intelligenter ambienter Systeme.

Die Aktuatoren eines ambienten Systems, die nötig sind, um eine bestimmte Funktionalität innerhalb einer Domäne (z. B. Smart Home oder Fahrassistenzsysteme) ausführen zu können, werden hauptsächlich durch diese Funktionalität bestimmt. Um kontextsensitiv funktionieren zu können, benötigt ein ambientes System außerdem Sensoren, um die Voraussetzung der Context-Awareness zu gewährleisten. Im Unterschied zur Aktuatorik ist bei dieser Sensorik wesentlich weniger deutlich vorgegeben, welche Subsysteme zur Erlangung gewisser Erkenntnisse über den vorliegenden Kontext benötigt werden und geeignet sind. Dies hängt von zahlreichen Faktoren ab, unter anderem von

- der Umgebung des Systems (unauffällige Integration),
- der Beschaffenheit der Awareness-Komponente, ihre Schlussverfahren und Wissensbestände sowie
- vorhandener Sensorik, die wiederverwendet werden kann.

Je zahlreicher die Faktoren sind, deren Ausprägungen einen bestimmten Kontext konstituieren, desto differenzierter wird sich die Sensorik gestalten, die erforderlich ist, um diesen Kontext zu erfassen. Wie in Abschnitt 5.4 bereits erwähnt, zeigt sich jedoch, dass zur Erfassung eines komplexen Sachverhalts bereits wenige Werte einer überschaubaren Anzahl verschiedener Sensoren ausreichend sein können (Hudson u. a., 2003; Fogarty u. a., 2004). Dies macht deutlich, dass *Flexibilität* eine wichtige Anforderung an eine Architektur für intelligente ambiente Systeme ist. Um die Anpassung an unterschiedliche Anwendungsdomänen und Funktionalitäten gewährleisten zu können, ohne die Architektur selbst substanziell umgestalten zu müssen, ist es erforderlich, *Schlüsselkomponenten modular* austauschbar und adaptierbar zu konzipieren. Diese Erkenntnis spiegelt sich deutlich in der Evolution der am IMIS entwickelten Frameworks.

## 7.2 IDEEN, KONZEPTE UND ENTWICKLUNGSSCHRITTE

Die Auseinandersetzung mit ambienten Computersystemen innerhalb unserer Arbeitsgruppe am IMIS begann im Jahre 2009 mit der Ausschreibung eines studentischen Praktikumsprojekts. Gefordert war, ein System zu entwickeln, das die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts bei der internen Kommunikation unterstützen sollte, indem es durch die Analyse der Unterbrechbarkeit von Kollegen unerwünschte Unterbrechungen bei der Arbeit reduzierte.

Der Anlass für die Entwicklung des Systems war die tatsächlich bestehende Problematik häufiger Unterbrechungen durch Kollegen und Studierende. Die Arbeit an einem wissenschaftlichen Institut umfasst zu einem großen Teil kognitiv äußerst anspruchsvolle Aufgaben, die hohe Konzentration erfordern. Eine ungewollte Unterbrechung kostet häufig mehr Zeit, als die eigentliche Unterbrechung in Anspruch nimmt, weil die Wiederaufnahme der vorherigen Tätigkeit ebenfalls mit signifikantem Zeit- und Konzentrationsaufwand verbunden sein kann.

Bereits in einer frühen Phase des Projekts kam eine weitere Zielsetzung hinzu. Wenn potenzielle Unterbrechungen durch Kollegen und Studierende unterbunden werden könnten, so verschwände dadurch jedoch nicht die Notwendigkeit der Kommunikation, derentwegen die Unterbrechung normalerweise stattgefunden hätte. Dieser Notwendigkeit ließe sich am besten Rechnung tragen, indem das System infrage kommende adäquate Kommunikationswege oder sogar Zeitpunkte vorschläge. Ist beispielsweise eine Wissenschaftlerin mit dem Lesen eines schwierigen Aufsatzes befasst und weist das System daher einen Kollegen auf deren Nicht-Unterbrechbarkeit hin, könnte es stattdessen den Gebrauch eines asynchronen Kommunikationsmediums vorschlagen, damit die Adressatin die Nachricht zu einem späteren, weniger störenden Zeitpunkt empfangen kann.

Wenn das System zur Abschätzung der momentanen Unterbrechbarkeit eines seiner Benutzer ohnehin dessen Aufenthaltsort und mögliche Tätigkeiten erfassen muss, könnte man diese Informationen zugleich verwenden, um Nachrichten anderer Benutzer auf einen geeigneten Kommunika-

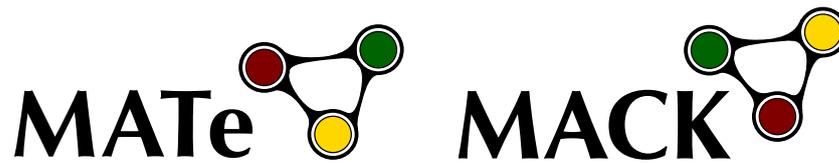


Abbildung 7.1: MATE- und MACK-Projektlogos (Entwurf: Jörg Cassens).

tionsweg zu leiten. Ein Kollege könnte also beispielsweise Bedarf an einer kurzfristigen Besprechung mit zwei weiteren Kollegen anmelden wollen. Diese Nachricht könnte er an das System senden, das sie aufgrund seiner Repräsentation der Aufenthaltsorte und der Tätigkeiten der Adressaten geeignet zuzustellen versucht. Korrigiert einer der beiden gerade Prüfungen und hat diese Aktivität im System mit mittlerer Unterbrechbarkeit registriert, erhält er eine Instant-Messaging-Benachrichtigung. Nehmen wir an, dass der andere Kollege gerade zu Tisch ist, würden ihn IM-Nachrichten und E-Mails nicht erreichen, sodass das System in Kenntnis des Aufenthalts in der Kantine stattdessen eine SMS versenden könnte. Dieses Message-Routing ergab sich als dritte Anforderung an das zu entwickelnde System.

Von einer kleinen Ideensammlung und einigen Skizzen abgesehen bekamen die Studierenden freie Hand hinsichtlich Entwurf und Implementierung. Ihre Ansätze und Ergebnisse wurden bei wöchentlichen Treffen mit den Betreuern offen diskutiert. Darin zeigt sich der explorative Charakter unserer Herangehensweise an die gesamte Thematik. Die Systemarchitektur, die im Rahmen dieses ersten Projekts entstand, erhielt wegen ihrer Ausrichtung auf die Verbesserung der gegenseitigen Awareness der Mitglieder einer Arbeitsgruppe in einer wissensintensiven Domäne den Namen *MATE*, der als rekursives Akronym für „*MATE for Awareness in Teams*“ steht.

Die Architektur von *MATE* spiegelt die Ausrichtung des Systems auf seine spezifische Anwendungsdomäne deutlich wider (vgl. Abb. 7.2). Es handelt sich um ein zentral organisiertes System, dessen Kern der *AwarenessHub* bildet. An den AwarenessHub sind die eher peripheren Funktionseinheiten angeschlossen. Aus Sicht des Hubs peripher, aber in unserer Implementierung dennoch auf dem zentralen *MATE*-Server installiert ist

das *Kommunikationsgateway*, das abhängig von den situativen Gegebenheiten unterschiedliche Medien wie E-Mail, SMS oder andere Nachrichtenaktuatorik anbinden kann. Gleichmaßen sind die Fähigkeiten des Systems, aus den erhobenen Sensordaten Schlüsse auf die Unterbrechbarkeit seiner Benutzer zu ziehen, als *Reasoning-Komponente* an den Hub angeschlossen. In unserer ersten Implementierung handelte es sich dabei um ein sehr einfaches Produktionsregelsystem mit einigen Lookup-Tabellen. Diese halbzentralen Komponenten kommunizieren mit dem AwarenessHub über proprietäre Protokolle und Schnittstellen, die genau auf den jeweiligen Fall zugeschnitten sind. Die damit mögliche Einfachheit der Implementierung wird allerdings mit stark eingeschränkter Flexibilität und Erweiterbarkeit bezahlt.

Ganz dezentral funktionieren die *Sensoren und Aktuatoren*. In der ersten Implementierung orientierte sich nicht nur die Auswahl der zu erfassenden Daten, sondern auch die technische Anbindung an den AwarenessHub streng an der spezifizierten Anwendungsdomäne. Da abhängig von der technischen Basis eines Sensors oder Aktuators dessen verfügbare Ressourcen oder Netzwerkkonnektivität stark variieren können, wurde hier auf größere Flexibilität bei der Umsetzung der Anbindung an den Hub Wert gelegt. Die Peripherie kommuniziert mit dem Hub in einer einfachen Sprache aus Schlüssel-Wert-Paaren, die über das *Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP)*<sup>2</sup> übermittelt wird. Übermittelt werden jedoch nicht die rohen Sensordaten, sondern diese durchlaufen zunächst ein lokales Preprocessing. Dies bringt mehrerlei Nutzen. Die Menge der übermittelten Daten kann dadurch signifikant reduziert werden. Für Sensoren und Aktuatoren gleichermaßen ergibt sich aus der Implementierung mit einer gewissen Eigenlogik zudem ein erleichterter Umgang mit unregelmäßiger Netzwerk-Konnektivität, was vor allem für Einheiten, die auf Mobilgeräten wie Smartphones basieren, von großem Nutzen ist. Beide Arten von Komponenten profitieren außerdem davon, dass abhängig von verschiede-

---

<sup>2</sup>XMPP ist vor allem durch den Instant-Messaging-Dienst *Jabber* bekannt. Durch seine XML-basierte, beinahe beliebig erweiterbare Sprache lässt es sich jedoch für zahllose andere Dienste verwenden.

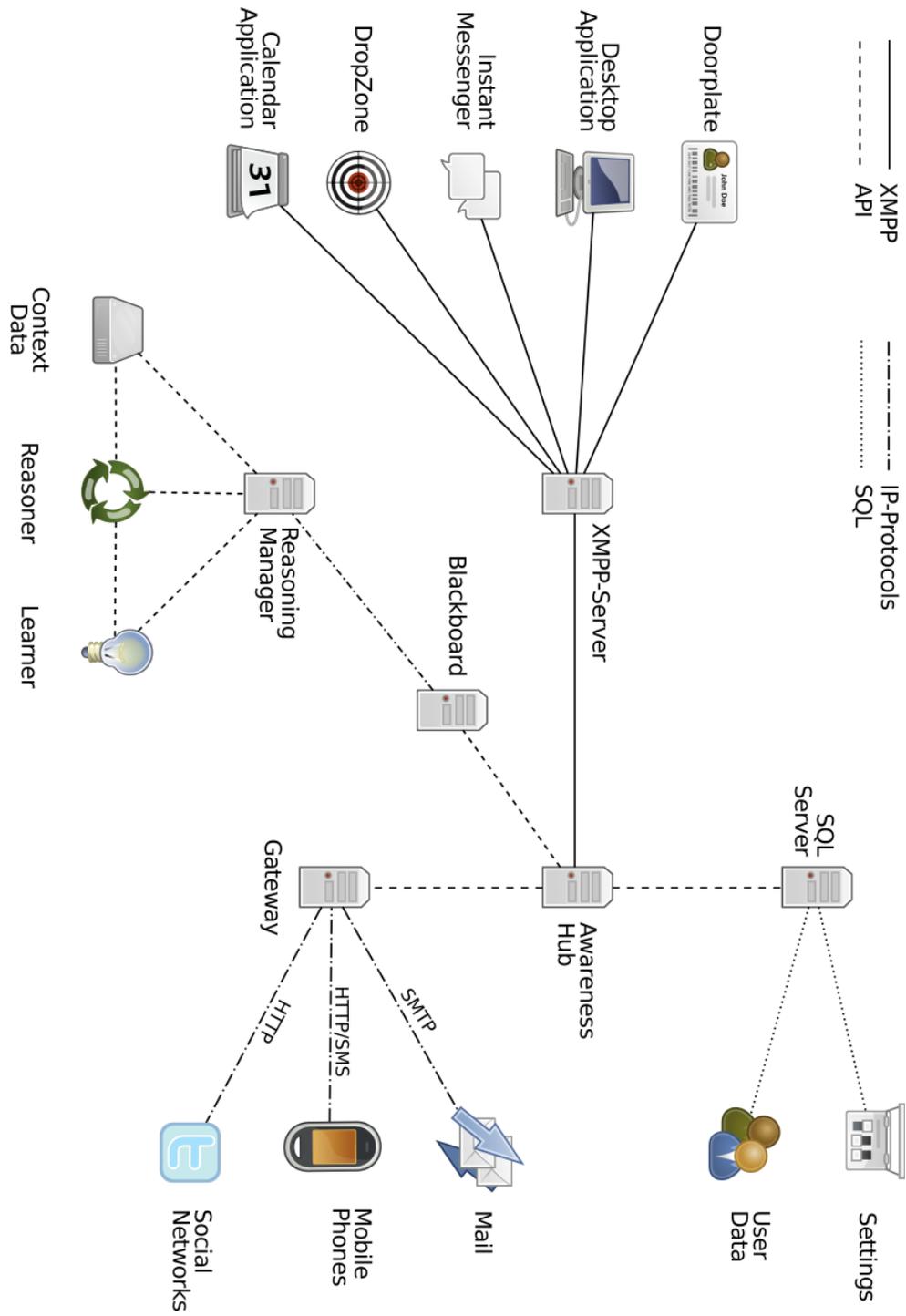


Abbildung 7.2: Architektur des MATE-Systems (Illustration von Jörg Cas-sens in Schmitt u. a., 2011).

nen Randbedingungen sowohl Push- wie auch Pull-Betrieb möglich ist. Im Push-Betrieb meldet sich der Sensor beim AwarenessHub oder dieser bei einem Aktuator, wenn neue Werte vorliegen. Beim Pull-Betrieb fragt der AwarenessHub regelmäßig beim Sensor an, ob es Neuigkeiten gibt, bzw. der Aktuator holt sich vom Hub neue Zustandsinformationen.

Die größere Autonomie der Sensoren ist nicht zuletzt Datenschutz-Erwägungen geschuldet. Wir rechneten damit, dass die Akzeptanz für ein System, das in vielerlei Hinsicht Assoziationen an „Big Brother“ weckt, umso größer sein würde, je mehr Kontrolle die Benutzer über die erhobenen Daten hätten. Die oben beschriebene lokale Vorverarbeitung der Sensordaten ermöglicht es, den Benutzern Filter- und Unschärfefunktionen zur Verfügung zu stellen, bevor die resultierenden Informationen ihren Kontrollbereich verlassen.

In der internen Diskussion zwischen Mitarbeitern unserer Arbeitsgruppe wurde schnell deutlich, dass das System die für seine Funktion benötigten Daten möglichst unaufdringlich und versteckt erheben sollte, um nicht selbst von den Tätigkeiten der Mitarbeiter abzulenken. Diese geringe Sichtbarkeit würde dazu führen, dass die Benutzer nur wenige Hinweise auf die Funktionsweise des Systems erlangen könnten und entsprechend nur wenige Informationen zum Aufbau eines mentalen Modells des Systems nutzen könnten. Dieses Spannungsfeld zwischen ambientem Charakter eines Computersystems und den mentalen Modellen seiner Benutzer wollten wir weiter erforschen. Deshalb mussten wir Benutzergruppen und Anwendungsdomänen außerhalb des universitären Umfelds erschließen.

Die ursprüngliche Auslegung des MATE-Systems sah keine Anpassungen an andere Anwendungsdomänen vor. Aus diesem Grund entschlossen wir uns, aufbauend auf der Architektur von MATE ein allgemeines Framework zum Bau ambienter Systeme abzuleiten. Dieses Projekt erhielt den Namen *MACK (Modular Awareness Construction Kit)* und wurde erneut als studentisches Praktikum umgesetzt. Der Umbau des MATE-Systems in einen möglichst generischen Werkzeugkasten für den Bau kontextsensitiver Computersysteme konzentrierte sich vor allem auf zwei Teilbereiche: das Kommunikationsprotokoll und die Reasoning-Infrastruktur.

Während MATE seine systeminternen Nachrichten als Schlüssel-Wert-Paare in einer proprietären Sprache versendet und XMPP dabei nur als Transportmedium benutzt, wurde MACK dahingehend verändert, dass das Kommunikationsprotokoll einerseits als standardkonforme *Extension* von XMPP implementiert und andererseits selbst erweiterbar konzipiert wurde, um auf die künftige Erschließung neuer Anwendungsdomänen reagieren zu können.

Zunächst besaß MATE nur einen Reasoner, der einfache Wenn-Dann-Regeln in einer Tabelle nachschlagen konnte. Dieser wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (Ruge, 2010) durch den Ontologie-basierten Reasoner *CoRaL* ergänzt. Schließlich wurde im Rahmen einer Masterarbeit (Frahm, 2011) das Modul *Whiteboard* entwickelt. Dabei handelt es sich um die Implementierung einer Blackboard-Architektur für Multi-Agenten-Systeme (vgl. Corkill, 1991), deren Funktionsumfang jedoch eingeschränkt werden konnte. Sensoren schreiben ihre Werte auf das Whiteboard, und mehrere Reasoner können diese Werte *abonnieren*, um bei Änderungen benachrichtigt zu werden. Ergebnisse von Reasoning-Prozessen werden wiederum auf das Whiteboard geschrieben und können den Zustand von Aktuatoren beeinflussen. Für die Integration der Whiteboard-Inhalte in seine Wissensbasis ist jeder Reasoner selbst verantwortlich.

### 7.3 DAS CAKE-FRAMEWORK

Anstatt die vorhandene MACK-Software ein weiteres Mal zu überarbeiten, wurde beschlossen, die gewonnenen Erkenntnisse für eine vollständige Neukonzeption der Plattform zu nutzen. Die neue Architektur wurde im Rahmen einer zweiseitigen Fallstudie von Masterstudierenden der Medieninformatik (Bouck-Standen u. a., 2013) gemeinsam mit Mitgliedern unserer Arbeitsgruppe konzipiert und in Abstimmung mit diesen umgesetzt. Anstatt ein domänenspezifisches System (MATE) nachträglich in ein möglichst universell einsetzbares Framework (MACK) umzubauen, wurde die neue Architektur von Anfang an hochgradig modular ausgelegt, um ein möglichst generisches Baukastensystem zu ermöglichen.



Abbildung 7.3: Peripheriegeräte für MATE: *Cubus* und *Doorplate*.

## 7 Systementwicklung

Der Konzeption von CAKE liegen folgende Prämissen zugrunde:

1. **Flexibilität hinsichtlich Sensoren und Aktuatoren** sowohl für Entwickler als auch für Benutzer:
  - a) Entwickler sollten leicht neue Komponenten für CAKE-basierte Systeme erstellen können.
  - b) Benutzer sollten diese Komponenten leicht selbst installieren und konfigurieren können.
2. **Flexibilität hinsichtlich verwendbarer Reasoner**, sodass der Anwendungsdomäne und ihren Problemstrukturen angemessene Wissensrepräsentationen und Schlußtechniken eingesetzt werden können
3. **Wiederverwendbarkeit** von Sensoren und Aktuatoren über Anwendungsdomänen hinweg, wo dies sinnvoll ist
4. **dezentrale Architektur**, die es jedem Benutzer ermöglicht, seine eigene Awareness-Umgebung zu betreiben, um so Bedenken hinsichtlich des Zugriffs Dritter auf personenbezogene Daten zu begegnen
5. **Schutz der Privatsphäre** durch Steuerung dieser Zugriffe in unterschiedlicher Granularität
6. **funktionale Gleichwertigkeit** zu den bestehenden Lösungen MATE und MACK

Im Folgenden werden die wesentlichen Designcharakteristika der CAKE-Architektur und die dahinter stehenden Erwägungen beschrieben. Ziel ist es, zu zeigen, dass die Architektur von CAKE sowohl hinsichtlich ihrer Generizität als auch ihrer Flexibilität geeignet ist, die eingangs erhobenen Anforderungen an ein Framework zum Bau ambienter Systeme zu erfüllen.

### 7.3.1 Verteilte Architektur

Bei CAKE handelt es sich um ein *verteiltes System*. Jeder Nutzer betreibt eine eigene CAKE-Umgebung, die wiederum geschachtelt sein kann. Das heißt,

ein komplexeres Awareness-Szenario in einem mehrstöckigen Eigenheim kann sich aus mehreren CAKE-Umgebungen zusammensetzen, die untereinander kommunizieren und ihre „umgebungslokal“ gewonnenen Awareness-Informationen austauschen. Mithilfe desselben Mechanismus können Informationen zwischen den CAKE-Umgebungen verschiedener Benutzer ausgetauscht werden. Für letzteren Fall sind Maßnahmen zum Schutz der Privatsphäre des Einzelnen vorgesehen, mithilfe derer konfigurierbar ist, welche Informationen mit welcher Genauigkeit an wessen externe CAKE-Umgebung weitergeleitet werden dürfen. Somit ist es möglich, z. B. in einem Team-Awareness-Szenario am Arbeitsplatz bestimmte Informationen mit reduzierter Genauigkeit weiterzugeben, persönlichen Freunden aber aus derselben CAKE-Umgebung präzisere Informationen zu liefern.

Das CAKE-System wurde von Anfang an modular konzipiert. Dadurch konnte eine strikte Aufteilung der Aufgaben der unterschiedlichen Komponenten erreicht werden, die untereinander nur lose gekoppelt sind. Die aktuelle Implementierung von CAKE besteht aus vier Modulen, die hauptsächlich in JAVA programmiert wurden (vgl. Abb. 7.4).

#### 7.3.2 *Plugin-Modul*

Das Plugin-Subsystem von CAKE ermöglicht es, Sensoren und Aktuatoren zur Laufzeit in die CAKE-Umgebung einzubinden und aus ihr zu entfernen. Außerdem standardisiert und abstrahiert es Sensordaten, um sie für das Logik-Modul nutzbar zu machen.

Um die Erstellung von Plugins zur Anbindung neuer Sensorik und Aktuatorik zu erleichtern, stellt CAKE ein definiertes Application Programming Interface (API) zur Verfügung. Zusätzlich erlauben es sogenannte Treiber, die logische Kommunikation zwischen Sensor oder Aktuator und CAKE-Umgebung von der zugrunde liegenden Hardware-Schnittstelle zu entkoppeln.

Das CAKE-API verlangt für jedes Plugin ein Manifest, in dem die Funktionalität des Plugins, seine Update-Frequenz, eine eindeutige Kennung (UUID), Versionsinformationen und die Kalibrierung des Geräts beschrie-

## 7 Systementwicklung

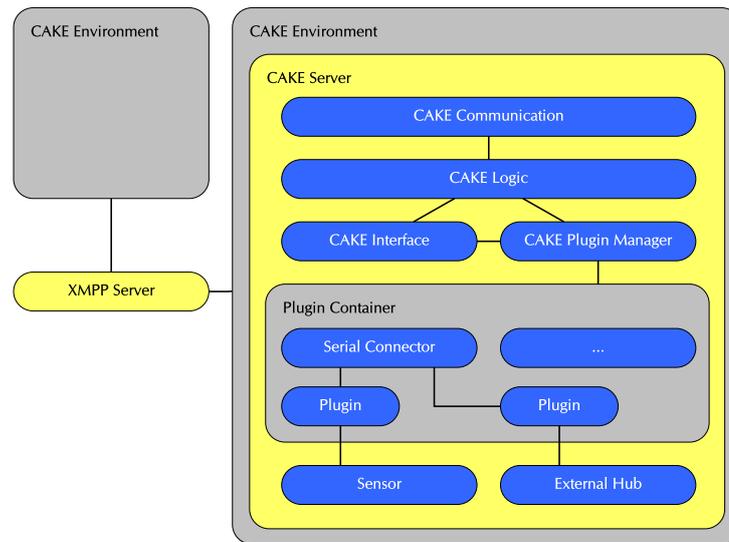


Abbildung 7.4: Architektur einer CAKE-Umgebung. Links im Bild ist die Kommunikation mit einer anderen CAKE-Umgebung angedeutet (vgl. Bouck-Standen u. a., 2013).

ben sind. Aus Sicherheitsgründen läuft jedes Plugin innerhalb der CAKE-Umgebung nebst der von ihm ggf. verwendeten Treiber in einer eigenen Sandbox. Dadurch können die einzelnen Plugins weder untereinander noch mit Ressourcen außerhalb der Plugin-Schicht anders als mittels der definierten API-Aufrufe interagieren. Zugriffsrechte, die über einen minimalen Standard-Satz hinausgehen, müssen vom Plugin während dessen Installation angefordert und vom Benutzer bestätigt werden.

Durch die Verfügbarkeit von Codebeispielen, die als Vorlage für die Entwicklung eigener Plugins dienen können, sowie die Möglichkeit, das Plugin-API als Referenzbibliothek in die verwendete Software-Entwicklungsumgebung einzubinden, wird die Hürde für das Erstellen neuer Plugins gesenkt. Aufgrund dieser flexiblen Architektur können einem CAKE-basierten System zur Laufzeit Interaktionsschnittstellen hinzugefügt und entfernt werden, um das System seiner Anwendungsdomäne und vor allem seinen Benutzern und ihren mentalen Modellen anzupassen.

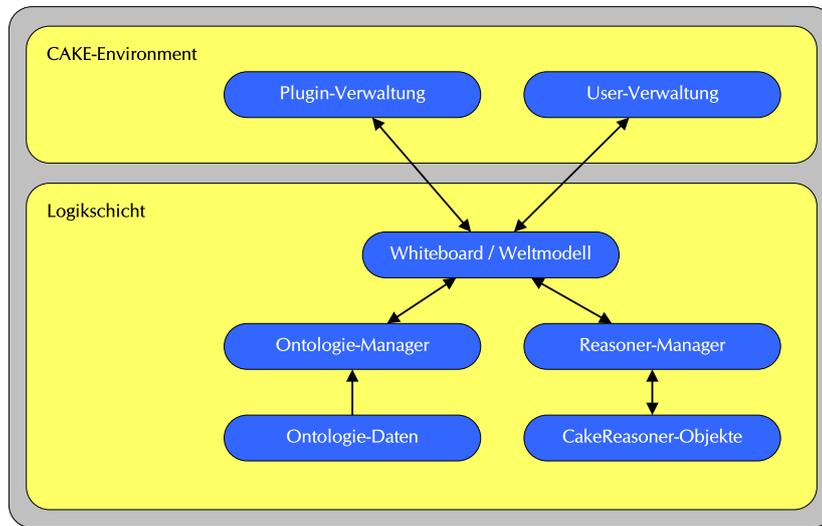


Abbildung 7.5: CAKEs Logikschicht und ihre Anbindung an dessen übrige Architektur (vgl. Abb. 7.4 und Bouck-Standen u. a., 2013).

### 7.3.3 Logik-Modul

Das Logik-Modul (siehe Abb. 7.5) repräsentiert den Zustand der Welt, wie und soweit er dem CAKE-System bekannt ist, und bindet die Reasoning-Mechanismen an, die auf diesem Weltwissen arbeiten. Wie auch MATE und MACK verwendet CAKE ein Whiteboard als zentrales Element, um Wissen über die Welt und die Zustände seiner Reasoner zusammenzuführen.

Bei CAKEs Whiteboard handelt es sich um die Implementierung einer Blackboard-Architektur (vgl. Corkill, 1991). Diese Form der Kontrollarchitektur wurde auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz in den letzten 40 Jahren in zahlreichen Problemdomänen eingesetzt, darunter Sprach- und Bildverstehen, Planungsaufgaben und maschinelle Übersetzung. Die Stärken von Blackboard-Architekturen liegen insbesondere in der inkrementellen Optimierung der gefundenen Lösungen und der Möglichkeit, auf Wissensrepräsentationen unterschiedlicher Abstraktionsgrade zu arbeiten. Beide Fähigkeiten sind für ein Awareness-Framework wie CAKE von

großer Bedeutung. Ein Überblick über die Entwicklung von Blackboard-Architekturen findet sich z. B. bei Carver und Lesser (1994).

Sensor-Plugins schreiben ihre Werte auf das Whiteboard, und Reasoner können diese abonnieren, um über Änderungen informiert zu werden. Reasoning-Ergebnisse werden ebenfalls auf das Whiteboard geschrieben und können zu *virtuellen Sensoren* aggregiert werden. Deren Werte können zu Zustandsänderungen von Aktuatoren führen oder stehen wiederum als Eingabe für andere Reasoner zur Verfügung. Informationen auf dem Whiteboard sind grundsätzlich nur der lokalen CAKE-Instanz zugänglich, können aber selektiv für andere CAKE-Umgebungen freigegeben werden.

Die virtuellen Sensoren werden, anders als die echten Sensoren und Aktuatoren, nicht als Plugins verwaltet, sondern direkt im Logik-Modul erzeugt. Ihre Daten können über das Whiteboard analog zu realen Sensordaten verwendet werden.

Obwohl das Weltmodell des Whiteboards als RDF-Graph formuliert ist, macht CAKE keine Annahmen über die Reasoning-Paradigmen der einzelnen Reasoner im System. Reasoner, die selbst auf RDF-Graphen arbeiten, können direkt angebunden werden, während solche mit anderen internen Repräsentationen für die Zuordnung ihrer Modelle zu den RDF-Graphen des Whiteboards Sorge tragen müssen. In der ursprünglichen CAKE-Implementierung wurde ein einfaches Produktionsregelsystem eingebaut, dessen Regelwerk von den Benutzern des Systems leicht selbst erweitert und angepasst werden kann. Die hierarchischen Schachtelungen komplexer Wenn-Dann-Regeln scheint jedoch wenig transparent für Endbenutzer. Im Rahmen einer Bachelorarbeit (Wilken, 2012) wurde zusätzlich, basierend auf myCBR<sup>3</sup> (Stahl und Roth-Berghofer, 2008) ein fallbasierter Reasoner entwickelt. Wissensarme Ansätze maschinellen Lernens wurden, basierend auf dem Machine-Learning-Framework WEKA<sup>4</sup> (Hall u. a., 2009), ebenfalls im Rahmen einer Bachelorarbeit (Böckler, 2013) für CAKE erschlossen.

Die Möglichkeit, unterschiedliche Weltmodelle zu haben und diese sowohl unabhängig voneinander als auch als Verbund zu nutzen, ist zentral

---

<sup>3</sup><http://mycbr-project.net/>

<sup>4</sup><http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

für die Eignung von CAKE für die Interaktion auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen und den Wechsel zwischen denselben (vgl. Kapitel 6).

### 7.3.4 Kommunikationsmodul

Das Kommunikationsmodul stellt eine REST-Schnittstelle für die grafische Benutzungsoberfläche (GUI) bereit. Das GUI ermöglicht die Konfiguration von Sensoren und Aktuatoren, das Hinzufügen und Bearbeiten von Produktionsregeln des entsprechenden Reasoners sowie die Verwaltung von Benutzern, Benutzergruppen und deren Berechtigungen.

Darüber hinaus können über ein XMPP-basiertes Protokoll Verbindungen zu anderen CAKE-Umgebungen hergestellt werden. Deren Benutzer, sofern sie lokale Zugriffsrechte erhalten, werden durch ihre XMPP-ID bzw. JID (Jabber-ID) repräsentiert. Das Modul implementiert zu diesem Zweck spezifische XMPP-Erweiterungen, die auch die Anbindung anderer kontextsensitiver Systeme vereinfachen.

Ein wesentliches Element der Kommunikationsinfrastruktur innerhalb von CAKE bildet ein bestimmter Nachrichtentyp, der *Intent*. Die Intents von CAKE, inspiriert von den gleichnamigen Nachrichten im Android-Betriebssystem für mobile Geräte, erlauben es einem Funktionsmodul, Anfragen nach bestimmten Diensten oder Funktionen an das übrige System zu richten. Module, die diese Anfrage bedienen können, bieten diese Funktionalität daraufhin an. Ihr Vorhandensein muss dem anfragenden Modul aber nicht im Vorhinein bekannt sein.

Die adaptive Kommunikation mittels Intents, entsprechend der jeweils gegebenen Konfiguration der CAKE-Umgebung, sowie die Möglichkeit, andere lokale und entfernte CAKE-Umgebungen flexibel anzubinden, erlauben die Anpassung an inhaltlich und strukturell dynamische Anwendungsdomänen zur Laufzeit des Systems.

### 7.3.5 Grafische Benutzungsschnittstelle

Das GUI-Modul der prototypischen CAKE-Implementierung ist webbasiert und kommuniziert über eine Schnittstelle des Kommunikationsmo-

## 7 Systementwicklung

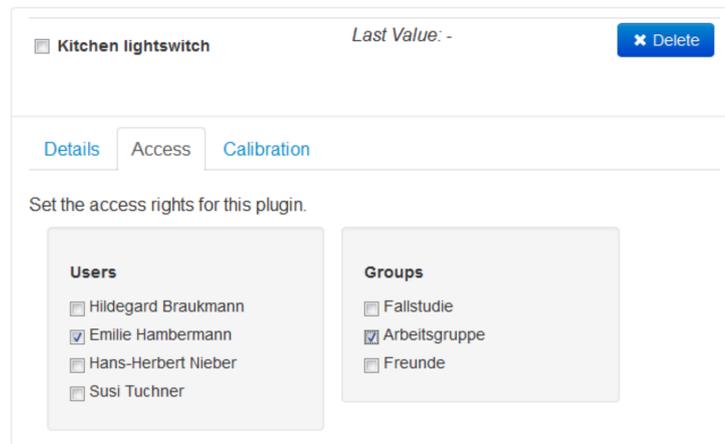


Abbildung 7.6: Steuerung der Zugriffsrechte auf ein CAKE-Plugin in der web-basierten grafischen Benutzungsoberfläche (Bouck-Standen u. a., 2013).

duls nach dem *REST-Paradigma* (*Representational State Transfer*) mit den übrigen Komponenten. Es stellt den Anwendern des Systems grundlegende Konfigurationsoptionen wie Benutzer- und Gruppenverwaltung, Management der installierten Plugins (vgl. Abb. 7.6) und Interaktion mit installierten Kontext-Reasonern (z. B. dem Produktionsregelsystem) zur Verfügung. Der Grundgedanke hinter dieser Konzeption ist, dass CAKE-basierte Systeme ähnlich wie DSL-Router oder Speicherlösungen für kleine Computernetzwerke ausgeliefert werden könnten, nämlich als eigenständige *Appliances*, die vom Benutzer selbst installiert, konfiguriert und betrieben werden.

### 7.4 CASi

Um unsere Awareness-Plattformen testen und weiterentwickeln zu können, ohne zwingend auf zeitlich und finanziell aufwändige Installationen mit realer Hardware und deren längerfristige Nutzung durch reale Benutzer angewiesen zu sein, entstand die Idee eines *Context-Awareness-Simulators* (*CASi*), mit dessen Hilfe die Backend-Komponenten unserer Systeme mit künstlich erzeugten Sensordaten versorgt und ihre Ausgaben von künst-

lichen Aktuatoren verwertet werden könnten. Auch bei CASi wurde auf einen hohen Abstraktionsgrad der Architektur geachtet, um einzelne Komponenten möglichst unabhängig an die zu testenden Systeme anpassen zu können. Im Folgenden werden Architektur und Funktionsweise von CASi nur überblicksartig beschreiben. Für eine detailliertere Darstellung vgl. Cassens u. a. (2012).

Die Welt besteht in CASi aus einer Sammlung von Objekten, die zur Beschreibung einer ambient angereicherten Umgebung benötigt werden. Die wichtigsten dieser Objekte sind Räume (dies müssen nicht zwangsläufig Zimmer sein, vgl. Abschnitt 2.3.1), innerhalb derer sich Agenten bewegen und verhalten können. Außerdem enthält die Welt Sensoren, Aktuatoren und andere Objekte, die frei im Raum platziert werden können.

Sensoren in CASi können nur einen begrenzten Bereich der Welt überwachen und werden von Agenten und deren Handlungen außerhalb dieses Bereichs nicht beeinflusst. Agenten sind virtuelle Personen, die sich autonom in der Welt bewegen und dabei einerseits Sensoren und andere Agenten beeinflussen, andererseits selbst von anderen Agenten und von Aktuatoren beeinflusst werden können. Jeder Agent besitzt eine Repräsentation seiner eigenen Handlungsziele und Mechanismen der Handlungssteuerung.

Alle übrigen Strukturen stellt das zu testende ambiente System selbst zur Verfügung. Abb. 7.7 zeigt diese Arbeitsteilung. CASi wurde ursprünglich für MACK entwickelt und später im Rahmen einer Bachelorarbeit an die neue Architektur und die Kommunikationsprotokolle von CAKE angepasst (Thomsen, 2013). Die Elemente einer Simulation werden in einer XML-artigen Sprache beschrieben, um den Benutzer vom Umgang mit JAVA-Quellcode zu entlasten. Detaillierte Protokolle zum Ablauf der Simulation schreibt CASi in Log-Dateien (vgl. Listing 7.1), die die Grundlage der anschließenden Analyse bilden. Eine einfache grafische Benutzungsschnittstelle (siehe Abb. 7.8) dient nur zur Visualisierung des Simulationsablaufs.

## 7 Systementwicklung

```
13.03.13 13:53:49 - INFO DoorSensor @ casi_rudi_random (OPEN):
  changed state to OPEN
13.03.13 13:53:49 - INFO DoorSensor @ casi_rudi_random (CLOSED):
  changed state to CLOSED
13.03.13 13:53:49 - INFO casi_rudi_random arrived at officeRudi
13.03.13 13:53:49 - INFO Desktop @ casi_rudi_random (P: unknown, F:
  inactive) now working active with unknown
13.03.13 13:53:49 - INFO casi_rudi_random starting
  WorkOnDesktop[NORMAL, RAW, Dur: 300,S: null, D: null, P: 5, use
  unknown with active]
```

Listing 7.1: Ausschnitt aus einem CASi-Simulationslog.

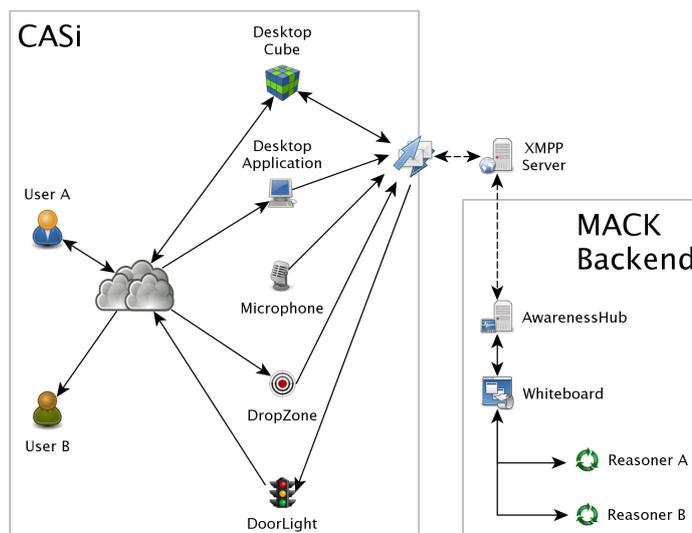


Abbildung 7.7: Architektur des Context-Awareness-Simulators CASi (Illustration von Jörg Cassens).

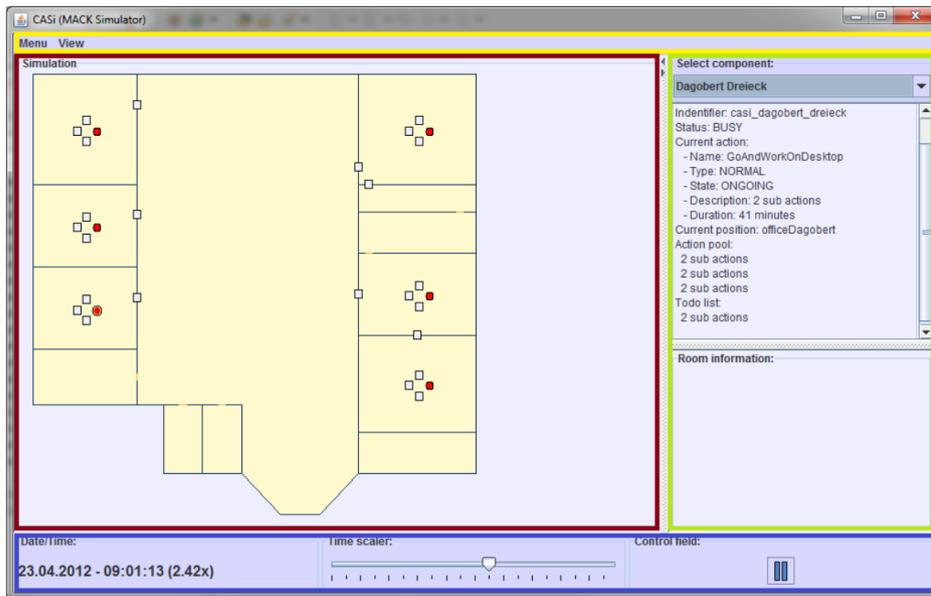


Abbildung 7.8: Die *SimpleGUI* des Context-Awareness-Simulators CASi (Illustration aus Cassens u. a., 2012).

## 7.5 FAZIT

In diesem Kapitel wurde herausgearbeitet, wie ein Framework zum Bau intelligenter ambienter Computersysteme beschaffen sein muss, um die sich aus den vorangegangenen theoretischen Erwägungen ergebenden Anforderungen erfüllen zu können.

In dieser Beschreibung des am IMIS konstruierten Frameworks CAKE wird deutlich, an welchen Stellen seiner Architektur und in welcher Form diese Software die Flexibilität und Adaptivität unterstützt, die für die Systementwicklung in einem so komplexen Umfeld benötigt wird. Diese Eigenschaften werden insbesondere durch zwei Merkmale der Architektur gewährleistet. Einerseits ist dies das Plugin-Modul mit seinem flexiblen API und den separaten Schnittstellentreibern. Andererseits handelt es sich um das Logik-Modul mit seinem Whiteboard, das in Abhängigkeit von den konkret implementierten Reasonern die Arbeit auf Wissensrepräsen-

## 7 Systementwicklung

tationen unterschiedlicher Abstraktionsgrade und die inkrementelle Optimierung von Reasoning-Ergebnissen ermöglicht. Der Simulator CASi erleichtert die Arbeit, indem er den Bedarf an zeitlich und monetär teuren Testinstallationen verringert.

Die Kombination aus CAKE und CASi eignet sich nicht nur für den Bau tatsächlicher Anwendungssysteme, sondern auch für die Konstruktion von Experimentalsystemen, mit deren Hilfe die Entwicklung und Prüfung wissenschaftlicher Hypothesen über die Interaktion zwischen intelligenten ambienten Systemen und ihren Benutzern weiter vorangetrieben werden können.

In der Einleitung zur vorliegenden Arbeit wurde als ihr Ziel postuliert, sie solle „den Benutzer und grundlegende Mechanismen seines Umgangs mit ambienten Computersystemen [...] stärker sichtbar“ machen (S. 3). Daraus ergibt sich die Frage nach den Voraussetzungen für erfolgreiche Interaktion zwischen ambienten Systemen und ihren Benutzern als forschungsleitendes Motiv. Im Vordergrund stand dabei die Kongruenz und Korrespondenz zwischen den mentalen Modellen der Benutzer und den Modellen, die im System vorhanden sind, insbesondere unter Beachtung der spezifischen „Unsichtbarkeit“ ambienter Systeme.

Schwerpunkt der Auseinandersetzung mit diesen Fragen war die Aufarbeitung der theoretischen Grundlagen des Verhältnisses von intelligenten ambienten Systemen und den mentalen Modellen ihrer Benutzer. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit war die Entwicklung konsistenter Begriffe. Diese sind nötig, um in diesem Forschungsfeld, das sich überhaupt nur aus einem interdisziplinären Blickwinkel erschließen lässt, unter Forschenden unterschiedlicher Fachrichtungen wie Informatik, Psychologie oder Soziologie effektiver und effizienter kommunizieren zu können. Insofern kann die vorliegende Arbeit einen wichtigen Beitrag zur weiteren Erforschung der Benutzerinteraktion mit ambienten Systemen leisten.

Ausgehend von den Begrifflichkeiten und den auf dieser Basis formulierten theoretischen Konzepten mentaler Modelle und unterschiedlicher Interaktionsebenen können erst Systeme entwickelt werden, die über die ingenieurwissenschaftliche Anreicherung der Anwendungswelt um ambiente Funktionalität hinausgehen. Die in der vorliegenden Arbeit erweiterte theo-

retische Basis ermöglicht auch die Entwicklung und das Testen von Hypothesen über die spezifischen Eigenheiten der Interaktion zwischen dieser noch recht neuen Systemgattung und ihren Benutzern.

Zu Beginn dieser Arbeit wurden die Veränderungen unserer Lebenswelt umrissen, die sich aus deren zunehmender Durchdringung mit neuartigen technischen Systemen ergeben, die nicht mehr selbst als Artefakte in Erscheinung treten, sondern in anderen Artefakten eingebettet sind. Zu diesem Zweck wurden zunächst die wesentlichen Charakteristika des Begriffs „System“ herausgearbeitet. Die Interaktion zwischen diesen speziellen Systemen und ihren Benutzern findet implizit, d. h. durch das umhüllende Artefakt vermittelt statt. In der Verschränkung des daraus resultierenden Interaktionsraums und des umgebenden physischen Raums entsteht der ambiente Raum, der das Bezugssystem für die Interaktion zwischen dem ambienten System und dem Benutzer bildet.

Zur näheren Bestimmung des Begriffs „intelligentes ambientes System“ wurden zunächst seine drei Bestandteile unabhängig voneinander untersucht, um daraus eine Arbeitsdefinition abzuleiten. Nach dieser Definition ist ein intelligentes ambientes System eines, dessen scheinbare Intelligenz sich auf ein phänomenologisches Konzept von Smartness zurückführen lässt, während seine Ambienz sich aus denjenigen Interaktionen mit seinen Benutzern ergibt, die implizit ablaufen, und sein Systemcharakter durch die Dynamik der zugrunde liegenden Vernetzungslogik und der infolgedessen verschwimmenden Systemgrenzen geprägt ist. Schließlich wurden drei grundlegende Funktionsmodi der hier untersuchten Systeme identifiziert, der ambiente, der kommunikativ-assistive und der werkzeughaft-extensionale Modus.

Der Begriff des mentalen Modells ist in unterschiedlichen Forschungstraditionen unterschiedlich definiert. Davon ausgehend wurde ein einheitliches, mehrstufiges Konzept entwickelt. Einem analog-bildhaften Modell in der Tradition der Kognitionspsychologie, das vor allem die Topologie eines ambienten Systems abbildet, wird in einem Modellinduktion genannten Prozess sukzessive abstraktes Faktenwissen hinzugefügt, sodass ein kausales Modell der Funktionszusammenhänge des Systems entsteht, wie es

von der Ingenieurpsychologie postuliert wird. Um die implizite Interaktion zwischen dem System und seinen Benutzern aufrechtzuerhalten, muss das System sich kontextabhängig an unterschiedliche mentale Modelle anpassen können.

Geeignete Begriffe von Kontext, Kontext-Awareness und Kontextsensitivität wurden anschließend erarbeitet. Kontext als Klassifikation einer Situation ermöglicht erst den Abruf geeigneter Modelle zur praktischen Bewältigung dieser Situation. Dies gilt für das System und seine Benutzer gleichermaßen. Beide müssen die semantisch relevanten Elemente der Situation identifizieren und in Bezug zu ihren vorhandenen Modellen setzen können, um auf deren Grundlage die Interaktionssituation beschreiben, Erklärungen derselben generieren und mögliche Folgezustände abschätzen zu können.

Nachdem die grundlegenden Begrifflichkeiten zur Beschreibung der Interaktion zwischen einem intelligenten ambienten System und seinen Benutzern herausgearbeitet wurden, konnten auf dieser Grundlage die Rahmenbedingungen für das Gelingen dieser Interaktion formuliert werden. Etablierte Ebenenmodelle der Mensch-Maschine-Interaktion, insbesondere das von Herczeg (2006b), wurden auf den Gegenstand dieser Arbeit angewandt. Die drei Funktionsmodi ambienter Systeme konnten unterschiedlich abstrakten Beschreibungsebenen innerhalb dieser Modelle zugeordnet werden. Unterschiedliche Benutzer ebenso wie derselbe Benutzer in unterschiedlichen Kontexten können sich unterschiedlicher mentaler Modelle eines Systems bedienen. Die Interaktion kann jeweils nur dann gelingen, wenn sie seitens des Benutzers und seitens des Systems auf korrespondierenden Abstraktionsebenen modelliert ist. Da die mentalen Modelle des Benutzers nicht kurzfristig adaptier- und korrigierbar sind, muss das System folglich ebenfalls über mehrere Modelle des Benutzers und des Interaktionskontexts verfügen.

Das ambiente Funktionieren des Systems, die implizite Mensch-Maschine-Interaktion, ist davon abhängig, dass der Benutzer in seiner Modellierung dieser Interaktion die intentionale Ebene nicht verlassen muss. Die internen Modelle des Systems müssen entsprechend leistungsfähig sein, um

den Großteil der Anpassungsleistung zwischen den Beteiligten zu gewährleisten. Falls dies misslingt, muss im Modus des kommunikativen Assistenten die Interaktion zusätzlich auf der pragmatischen und der semantischen Ebene, wie sie in Herczogs Ebenenmodell erscheinen, definiert sein. In diesem Modus kann das System sich einerseits beim Benutzer rückversichern, um seine internen Modelle zu justieren, und andererseits dem Benutzer Informationen anbieten, die dieser im Zuge der Modellinduktion zur Adaption seiner mentalen Modelle nutzen kann. Sofern auch in diesem Modus keine Korrespondenz der Modellierungsebenen auf beiden Seiten erzielt werden kann, bleibt die Adaptionarbeit ganz dem Benutzer überlassen, während sich das Systems als klassische Werkzeugextension mit wenigen, fest eingeschriebenen Interaktionsmodellen präsentiert.

Am IMIS wurden in den Jahren 2009 bis 2013 verschiedene Versuche unternommen, ein vereinheitlichtes, möglichst universelles Software-Framework für den Bau intelligenter ambienter Computersysteme zu konzipieren und prototypisch zu implementieren. Das vorläufige Ergebnis dieser Bemühungen ist CAKE, das Context Aware and Knowledge-based Environment. CAKE bietet eine hochgradig modulare Architektur, die es ermöglicht, weitgehend unabhängig von spezifischen Anwendungsdomänen und umgebenden Ökosystemen ambiente Systeme in einem standardisierten Framework umzusetzen, während die eigentliche Funktionslogik des resultierenden Systems mit möglichst geringen Einschränkungen angebunden werden kann. Aufgrund dieser Offenheit und Flexibilität eignet sich CAKE auch zum Bau von Forschungssystemen, die helfen können, das Verhältnis zwischen intelligenten ambienten Systemen und ihren Benutzern weiter zu untersuchen.

Man kann fragen, wieso es nötig war, die zeitlich nachgelagerte theoretische Arbeit zu leisten, wenn die praktische Arbeit am IMIS doch schon ohne diese besondere Grundlage gelungen ist. Der Grund liegt in der Notwendigkeit, diese und andere praktische Arbeiten empirisch zu validieren. Sowohl für die methodologische Fundierung als auch für die Interpretation dieser Validierung sind die in der vorliegenden Arbeit unternommenen Begriffsklärungen und Konzeptionierungen eine wichtige Vorausset-

zung. Sie bilden damit gleichzeitig die Grundlage für die Formulierung und Projektierung weiterer Forschungsschritte. Außerdem können sie als Ausgangspunkt für eine wissenschaftliche Debatte über die Notwendigkeit stärkerer begrifflicher und konzeptioneller Einheitlichkeit in diesem interdisziplinären Forschungsfeld dienen.

Mögliche Forschungsprojekte, die sich der vorliegenden Arbeit anschließen können, umfassen die Implementierung eines Systems, an dem sich die Wechsel der Abstraktions- und Interaktionsebenen empirisch erforschen lassen. Hinzu kommt die Untersuchung der Frage, hinsichtlich welcher Eigenschaften sich mentale Modelle innerhalb von Benutzergruppen ähneln bzw. wie anhand dieser Gemeinsamkeiten Benutzergruppen gebildet werden können und welche Elemente eines mentalen Modells im Gegensatz dazu stets idiosynkratisch sind.

Die Akteur-Netzwerk-Theorie (ANT) wurde im Rahmen dieser Arbeit nur deskriptiv zur Diagnose des (unbewussten) Verhandlungscharakters der Ebenenkorrespondenz verwendet. Ich halte sie darüber hinaus für geeignet, auch als Basis für die analytische Untersuchung des Hybridisierungsprozesses im Vollzug impliziter Mensch-Technik-Interaktion zu dienen und in diesem Zuge die menschliche Seite im soziotechnischen Netzwerk weiter hervorheben zu helfen. Möglicherweise lässt sich aus ihr sogar ein Modell zur prospektiven Konzeption ambienter Systeme ableiten.

Die Anwendung einer techniksoziologischen Theorie auf ambiente Computersysteme weist jedoch wesentlich über die Betonung des menschlichen Anteils an impliziter Mensch-Computer-Interaktion hinaus. Auch die Erforschung der Auswirkungen, die die Verfügbarkeit und ubiquitäre Nutzung solcher Techniken auf gesellschaftlicher Ebene mit sich bringen, wird in Zukunft eine noch weit größere Rolle spielen als bisher.

Hier schließt sich der Kreis zu der in der Einleitung gestellten Diagnose, dass die psychologischen und sozialen Fragen neuer Technologien häufig erst nach Bewältigung der grundlegenden technischen Herausforderungen die ihnen gebührende wissenschaftliche Beachtung erhalten. Nach den Fortschritten, die in der Vergangenheit hinsichtlich der technischen Herausforderungen beim Bau ambienter Systeme erzielt wurden, kann die For-

## *8 Resümee und Ausblick*

schung sich nun, auch mithilfe des in der vorliegenden Arbeit erschlossenen Instrumentariums, diesen „weichen“ Fragen zuwenden.

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [Aarts und Encarnaç o 2006] AARTS, Emile ; ENCARNAÇ O, Jos e: Into Ambient Intelligence. In: AARTS, Emile (Hrsg.) ; ENCARNAÇ O, Jos e (Hrsg.): *True Visions. The Emergence of Ambient Intelligence*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006, S. 1–16
- [Anderson 2001] ANDERSON, John R.: *Kognitive Psychologie*. 3. Heidelberg, Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 2001
- [Atkinson und Shiffrin 1968] ATKINSON, Richard C. ; SHIFFRIN, Richard M.: Human Memory: A Proposed System and Its Control Processes. In: *The Psychology of Learning and Motivation* 2 (1968), S. 89–195
- [Atzori u. a. 2010] ATZORI, Luigi ; IERA, Antonio ; MORABITO, Giacomo: The Internet of Things: A Survey. In: *Computer Networks* 54 (2010), Nr. 15, S. 2787–2805. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>. – ISSN 1389-1286
- [Baddeley 2000] BADDELEY, Alan D.: The episodic buffer. A new component of working memory? In: *Trends in Cognitive Sciences* 4 (2000), Nr. 11, S. 418–423
- [Bainbridge 1979] BAINBRIDGE, Lianne: Verbal Reports as Evidence of the Process Operator’s Knowledge. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 11 (1979), Nr. 4, S. 411–436
- [Baldauf u. a. 2007] BALDAUF, Matthias ; DUSTDAR, Schahram ; ROSENBERG, Florian: A survey on context-aware systems. In: *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing* 2 (2007), Nr. 4, S. 263–277

Literaturverzeichnis

- [Baudrillard 1994] BAUDRILLARD, Jean: *Simulacra and Simulation*. University of Michigan Press, 1994
- [Baudrillard 2007] BAUDRILLARD, Jean: *Das System der Dinge. Über unser Verhältnis zu den alltäglichen Gegenständen*. Frankfurt am Main : Campus Verlag, 2007
- [Belliger und Krieger 2006a] BELLIGER, Andréa ; KRIEGER, David J.: *Anthology: Ein einführendes Handbuch zur Akteur-Netzwerk-Theorie*. Bielefeld : transcript Verlag, 2006
- [Belliger und Krieger 2006b] BELLIGER, Andréa ; KRIEGER, David J.: Einführung in die Akteur-Netzwerk-Theorie. Siehe (Belliger und Krieger, 2006a), S. 13–50
- [Böckler 2013] BÖCKLER, Kevin: *Erweiterung der Reasoning-Fähigkeiten des Context-Awareness-Frameworks CAKE*, Universität zu Lübeck, Bachelorarbeit, 2013
- [Bouck-Standen u. a. 2013] BOUCK-STANDEN, David ; DUBBELS, Tim ; EBERHARDT, Bjørn ; JEHLÉ, Eva ; KOCK, Sandro ; SCHULZE, Alexander ; WILKEN, Daniel: *Dokumentation zur Fallstudie Context Aware Knowledge- and Sensor-based Environment*, Universität zu Lübeck, Projektdokumentation, 2013
- [Brézillon 2007] BRÉZILLON, Patrick: Context Modeling: Task Model and Practice Model. In: (Kokinov u. a., 2007), S. 122–135. – URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74255-5\\_10](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74255-5_10). – ISBN 978-3-540-74254-8
- [Brézillon und Pomerol 1999] BRÉZILLON, Patrick ; POMEROL, Jean-Charles: Contextual knowledge sharing and cooperation in intelligent assistant systems. In: *Le Travail Humain* 62 (1999), Nr. 3, S. 223–246
- [Carlson und Schrader 2012] CARLSON, Darren ; SCHRADER, Andreas: Dynamix: An open plug-and-play context framework for android. In: *3<sup>rd</sup> International Conference on the Internet of Things (IOT)*, IEEE Computer Society, 2012, S. 151–158

- [Caruso und Xavier 1996] CARUSO, Francisco ; XAVIER, Roberto M.: Sources for the History of Space Concepts in Physics from 1845 to 1995 / Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Rio de Janeiro, 1996 (CBPF-NF-084/96). – Forschungsbericht
- [Carver und Lesser 1994] CARVER, Norman ; LESSER, Victor: Evolution of Blackboard Control Architectures. In: *Expert Systems with Applications* 7 (1994), Nr. 1, S. 1–30
- [Cassens u. a. 2012] CASSENS, Jörg ; SCHMITT, Felix ; MENDE, Tobias ; HERCZEG, Michael: CASi – A Generic Context Awareness Simulator for Ambient Systems. In: PATERNÒ, F. (Hrsg.): *AmI 2012 – International Joint Conference on Ambient Intelligence*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2012, S. 421–426. – URL [http://www.imis.uni-luebeck.de/publikationen/AmI-2012-CASi\\_Poster-Springer.pdf](http://www.imis.uni-luebeck.de/publikationen/AmI-2012-CASi_Poster-Springer.pdf)
- [Choi u. a. 2008] CHOI, Ahyoung ; OH, Yoosoo ; PARK, Goeun ; Woo, Woontack: Stone-Type Physiological Sensing Device for Daily Monitoring in an Ambient Intelligence Environment. In: AARTS, Emile (Hrsg.) ; CROWLEY, James L. (Hrsg.) ; RUYTER, Boris de (Hrsg.) ; GERHÄUSER, Heinz (Hrsg.) ; PFLAUM, Alexander (Hrsg.) ; SCHMIDT, Janina (Hrsg.) ; WICHERT, Reiner (Hrsg.): *Ambient Intelligence European Conference, AmI 2008, Proceedings*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008, S. 343–359
- [Coelingh u. a. 2010] COELINGH, Erik ; EIDEHALL, Andreas ; BENGTSOON, Mattias: Collision Warning with Full Auto Brake and Pedestrian Detection – A Practical Example of Automatic Emergency Braking. In: *13<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Sept 2010, S. 155–160. – ISSN 2153-0009
- [Corkill 1991] CORKILL, Daniel D.: Blackboard Systems. In: *AI Expert* 6 (1991), Nr. 9, S. 40–47
- [Craik 1963] CRAIK, Kenneth J. W.: *The Nature of Explanation*. Cambridge : Cambridge University Press, 1963

- [de Kleer und Brown 1983] DE KLEER, Johan ; BROWN, John S.: Assumptions and Ambiguities in Mechanistic Mental Models. In: (Gentner und Stevens, 1983), S. 155–190. – ISBN 0-89859-242-9
- [Doyle 1999] DOYLE, Patrick: When Is a Communicative Agent a Good Idea? In: *Workshop on Communicative Agents: The Use of Natural Language in Embodied Systems, 3<sup>rd</sup> International Conference on Autonomous Agents*, 1999
- [Ducatel u. a. 2001] DUCATEL, Ken ; BOGDANOWICZ, Marc ; SCAPOLO, Fabiana ; LEIJTEN, Jos ; BURGELMAN, Jean-Claude: ISTAG Scenarios for Ambient Intelligence in 2010 / IST Advisory Group. 2001. – Forschungsbericht
- [Dutke 1994] DUTKE, Stephan: *Mentale Modelle: Konstrukte des Wissens und Verstehens*. Göttingen : Verlag für Angewandte Psychologie, 1994 (Arbeit und Technik 4)
- [Ehn und Kyng 1986] EHN, Pelle ; KYNG, Morten: A Tool Perspective on Design of Interactive Computer Support for Skilled Workers. In: *DAIMI Report Series 14* (1986), Nr. 190
- [Einstein 1926] EINSTEIN, Albert: *Space-Time*. In: *Encyclopædia Britannica*, URL <http://preview.britannica.co.kr/spotlights/classic/eins1.html>. – Zugriffsdatum: 28.03.2015, 1926
- [Endsley 2000a] ENDSLEY, Mica R.: Situation Models: An Avenue to the Modeling of Mental Models. In: *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Triennial Congress of the International Ergonomics Association and the 44<sup>th</sup> Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* Bd. 44, 2000, S. 61–64
- [Endsley 2000b] ENDSLEY, Mica R.: Theoretical Underpinnings of Situation Awareness: A Critical Review. In: ENDSLEY, Mica R. (Hrsg.) ; GARLAND, Daniel J. (Hrsg.): *Situation Awareness Analysis and Measurement*. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 2000, S. 3–32
- [Endsley u. a. 2003] ENDSLEY, Mica R. ; BOLTÉ, Betty ; JONES, Debra G.:

- Designing for Situation Awareness. An Approach to User Centered Design.*  
Taylor & Francis, 2003. – ISBN 0-748-40967-X
- [Estrin u. a. 2002] ESTRIN, Deborah ; CULLER, David ; PISTER, Kris ; SUKHATME, Gaurav: Connecting the Physical World with Pervasive Networks.  
In: *Pervasive Computing* 1 (2002)
- [Faye 2014] FAYE, Jan: *Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics.* In: ZALTA, Edward N. (Hrsg.): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, URL <http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/qm-copenhagen/>. – Zugriffsdatum: 28.03.2015, 2014
- [Fischermann 2012] FISCHERMANN, Thomas: *Tschüs, Handy! Hallo, Lampe! Der Stardesigner Mark Rolston glaubt, dass Computer bald nicht mehr sichtbar sind.* 2012. – URL <http://www.zeit.de/2012/42/Designer-Mark-Rolston-Computer-Zukunft>. – Zugriffsdatum: 28.03.2015
- [Flusser 1991] FLUSSER, Vilém: Räume. In: SEBLATNIG, Heidemarie (Hrsg.): *außenräume innenräume. Der Wandel des Raumbegriffs im Zeitalter der elektronischen Medien.* Wien : WUV Universitätsverlag, 1991, S. 75–83
- [Flusser 1992] FLUSSER, Vilém: Wände. In: *ARCH+* (1992), Nr. 111. – URL <http://www.archplus.net/home/archiv/artikel/46,989,1,0.html>. – Zugriffsdatum: 01.10.2013
- [Fogarty u. a. 2004] FOGARTY, James ; HUDSON, S. E. ; LAI, J.: Examining the robustness of sensor-based statistical models of human interruptibility. In: DYKSTRA-ERICKSON, Elizabeth (Hrsg.) ; TSCHELIGI, Manfred (Hrsg.): *CHI 2004: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, 2004, S. 207–214
- [Frahm 2011] FRAHM, Olof-Joachim: *MATe-Kommunikationsframework zur Einbindung multipler Reasoner*, Universität zu Lübeck, Masterarbeit, 2011

- [Gentner und Gentner 1983] GENTNER, Dedre ; GENTNER, Donald R.: Flowing Waters or Teeming Crowds: Mental Models of Electricity. In: (Gentner und Stevens, 1983), S. 99–129. – ISBN 0-89859-242-9
- [Gentner und Stevens 1983] GENTNER, Dedre (Hrsg.) ; STEVENS, Albert L. (Hrsg.): *Mental Models*. Hillsdale, New Jersey : Lawrence Erlbaum Associates, 1983. – ISBN 0-89859-242-9
- [GI 2014] GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIK E.V.: *Die Grand Challenges der Informatik*. Broschüre. 2014. – URL [https://www.gi.de/fileadmin/redaktion/Download/GI-Grand\\_Challenges-Brosch%C3%BCre2014.pdf](https://www.gi.de/fileadmin/redaktion/Download/GI-Grand_Challenges-Brosch%C3%BCre2014.pdf)
- [Gick und Holyoak 1980] GICK, Mary L. ; HOLYOAK, Keith J.: Analogical problem solving. In: *Cognitive Psychology* 12 (1980), Nr. 3, S. 306–355
- [Glaser 2007] GLASER, Peter: *Sofortness*. 2007. – URL <http://www.heise.de/tr/blog/artikel/Sofortness-273180.html>. – Zugriffsdatum: 01.10.2013
- [Hall u. a. 2009] HALL, Mark ; FRANK, Eibe ; HOLMES, Geoffrey ; PFAHRINGER, Bernhard ; REUTEMANN, Peter ; WITTEN, Ian H.: The WEKA Data Mining Software: An Update. (2009)
- [Helmers u. a. 1998] HELMERS, Sabine ; HOFFMANN, Ute ; HOFMANN, Jeanette: Internet... the final frontier: Eine Ethnographie. Schlußbericht des Projekts Interaktionsraum Internet. Netzkultur und Netzwerkorganisation / ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft. Berlin, 1998 (FS II 98-112). – WZB Discussion Paper
- [Henricksen u. a. 2005] HENRICKSEN, Karen ; INDULSKA, Jadwiga ; MCFADDEN, Ted ; BALASUBRAMANIAM, Sasitharan: Middleware for Distributed Context-Aware Systems. In: MEERSMAN, Robert (Hrsg.) ; TARI, Zahir (Hrsg.): *On the Move to Meaningful Internet Systems 2005: CoopIS, DOA, and ODBASE* Bd. 3760. Berlin, Heidelberg : Springer, 2005, S. 846–863
- [Herczeg 2006a] HERCZEG, Michael: Differenzierung mentaler und konzeptueller Modelle und ihrer Abbildungen als Grundlage für das Cogni-

- tive Systems Engineering. In: GRANDT, M. (Hrsg.): *DGLR-Bericht 2006-02 – Cognitive Systems Engineering in der Fahrzeug- und Prozessführung*. Bonn : Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V., 2006
- [Herczeg 2006b] HERCZEG, Michael: *Interaktionsdesign. Gestaltung interaktiver und multimedialer Systeme*. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006
- [Herczeg 2009] HERCZEG, Michael: *Software-Ergonomie. Theorien, Modelle und Kriterien für gebrauchstaugliche interaktive Computersysteme*. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009
- [Herczeg 2010] HERCZEG, Michael: The Smart, the Intelligent and the Wise: Roles and Values of Interactive Technologies. In: *Proceedings of the First International Conference on Intelligent Interactive Technologies and Multimedia*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (IITM '10), S. 17–26. – URL <http://doi.acm.org/10.1145/1963564.1963567>. – ISBN 978-1-4503-0408-5
- [Hudson u. a. 2003] HUDSON, S. E. ; FOGARTY, James ; ATKESON, C. G. ; AVRAHAMI, D. ; FORLIZZI, J. ; KIESLER, S. ; LEE, J.C. ; YANG, J.: Predicting Human Interruptibility with Sensors: A Wizard of Oz Feasibility Study. In: COCKTON, G. (Hrsg.) ; KORHONEN, Panu (Hrsg.): *CHI 2003: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, 2003, S. 257–264
- [International Telecommunication Union 1994] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION: *ISO/IEC 7498-1: Information Technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model*. 1994. – URL <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=2820>
- [ISO 9241-110 2008] : *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Grundsätze der Dialoggestaltung*. 2008

- [Jarz 1997] JARZ, Ewald M.: *Entwicklung multimedialer Systeme. Planung von Lern- und Masseninformatiionssystemen*. Wiesbaden : Gabler-Verlag, Deutscher Universitäts-Verlag, 1997
- [Johnson-Laird 1983] JOHNSON-LAIRD, Philip N.: *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*. Cambridge, MA : Harvard University Press, 1983
- [Ju und Leifer 2008] JU, Wendy ; LEIFER, Larry: The Design of Implicit Interactions: Making Interactive Systems Less Obnoxious. In: *Design Issues* 24 (2008), Nr. 3, S. 72–84
- [Kameas u. a. 2005] KAMEAS, Achilles ; MAVROMMATI, Irene ; MARKOPOULOS, Panos: Computing in Tangible: Using Artifacts as Components of Ambient Intelligence Environments. In: RIVA, G. (Hrsg.) ; VATALARO, F. (Hrsg.) ; DAVIDE, F. (Hrsg.) ; ALCAÑIZ, M. (Hrsg.): *Ambient Intelligence. The Evolution of Technology, Communication and Cognition Towards the Future of Human-Computer Interaction*. Amsterdam : IOS Press, 2005, S. 121–142
- [Kindsmüller 2006] KINDSMÜLLER, Martin C.: *Trend Literacy. Zur Interpretation von Kurvendarstellungen in der Prozessführung.*, Humboldt-University Berlin, Dissertation, 2006
- [Kluwe 1990] KLUWE, Rainer H.: *Gedächtnis und Wissen*. S. 115–187. In: SPADA, Hans (Hrsg.): *Lehrbuch allgemeine Psychologie*. Bern : Verlag Hans Huber, 1990
- [Kofod-Petersen und Cassens 2007] KOFOD-PETERSEN, Anders ; CASSENS, Jörg: Explanations and Context in Ambient Intelligent Systems. In: (Kokinov u. a., 2007), S. 303–316. – URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74255-5\\_23](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74255-5_23). – ISBN 978-3-540-74254-8
- [Kokinov u. a. 2007] KOKINOV, Boicho (Hrsg.) ; RICHARDSON, Daniel C. (Hrsg.) ; ROTH-BERGHOFER, Thomas R. (Hrsg.) ; VIEU, Laure (Hrsg.): *Modeling and Using Context – CONTEXT 2007*. Bd. 4635. Roskilde, Denmark : Springer, 2007. (Lecture Notes in Computer Science)

- [Koschorke 1999] KOSCHORKE, Albrecht: Die Grenzen des Systems und die Rhetorik der Systemtheorie. In: KOSCHORKE, Albrecht (Hrsg.): *Widerstände der Systemtheorie. Kulturtheoretische Analysen zum Werk von Niklas Luhmann*. Berlin : Akademie-Verlag, 1999, S. 49–60
- [Lafuente-Rojo u. a. 2007] LAFUENTE-ROJO, Alberto ; ABASCAL-GONZÁLEZ, Julio ; CAI, Yan: Ambient Intelligence: Chronicle of an Announced Technological Revolution. In: *UPGRADE VIII* (2007), Nr. 4, S. 8–12
- [Laplace 1932] LAPLACE, Pierre-Simon ; MISES, R. v. (Hrsg.): *Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit*. Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft, 1932
- [Lawson 2010] LAWSON, Clive: Technology and the Extension of Human Capabilities. In: *Journal for the Theory of Social Behaviour* 40 (2010), Nr. 2, S. 207–223. – URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-5914.2009.00428.x>. – ISSN 1468-5914
- [Leont'ev 1978] LEONT'EV, Aleksei N.: *Activity, Consciousness, and Personality*. Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice Hall, 1978
- [Lobo 2011] LOBO, Sascha: *Digitale Ungeduld*. 2011. – URL <http://www.spiegel.de/netzwelt/web/a-774110.html>. – Zugriffsdatum: 01.10.2013
- [Luhmann 1973] LUHMANN, Niklas: *Gesellschaft*. S. 137–153. In: *Soziologische Aufklärung. Aufsätze zur Theorie sozialer Systeme*. Opladen : Leske & Budrich, 1973
- [McCloskey 1983] MCCLOSKEY, Michael: Naive Theories of Motion. In: (Gentner und Stevens, 1983), S. 299–324. – ISBN 0-89859-242-9
- [McLuhan 1994] MCLUHAN, Marshall: *Understanding Media: The Extensions of Man*. MIT Press, 1994
- [de la Mettrie 2009] METTRIE, Julien O. de la: *Die Maschine Mensch*. Felix Meiner Verlag, 2009

Literaturverzeichnis

- [Nardi 1996] NARDI, Bonnie A.: Studying Context. In: NARDI, Bonnie A. (Hrsg.): *Context and Consciousness*. Cambridge, MA : MIT Press, 1996, S. 69–102
- [Newell u. a. 1959] NEWELL, Allen ; SHAW, John C. ; SIMON, Herbert A.: Report on a General Problem-solving Program. In: *IFIP Congress, 1959*, S. 256–264
- [Norman 1983] NORMAN, Donald A.: Some Observations on Mental Models. In: (Gentner und Stevens, 1983), S. 7–14. – ISBN 0-89859-242-9
- [Norman 1986] NORMAN, Donald A.: Cognitive Engineering. In: *User Centered System Design. New Perspectives on Human-Computer Interaction*. Hillsdale, NJ, USA : Lawrence Erlbaum Associates, 1986, S. 31–61
- [Norman 1999] NORMAN, Donald A.: *The Invisible Computer*. Cambridge, MA : The MIT Press, 1999
- [Oberauer u. a. 2006] OBERAUER, Klaus ; MAYR, Ulrich ; KLUWE, Rainer H.: *Gedächtnis und Wissen*. S. 115–195. In: SPADA, Hans (Hrsg.): *Lehrbuch allgemeine Psychologie*. Bern : Verlag Hans Huber, 2006
- [Pousman und Stasko 2006] POUSMAN, Zachary ; STASKO, John: A Taxonomy of Ambient Information Systems: Four Patterns of Design. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2006 (AVI '06), S. 67–74. – URL <http://doi.acm.org/10.1145/1133265.1133277>. – ISBN 1-59593-353-0
- [Prinz 1990] PRINZ, Wolfgang: *Wahrnehmung*. S. 25–114. In: SPADA, Hans (Hrsg.): *Lehrbuch allgemeine Psychologie*. Bern : Verlag Hans Huber, 1990
- [Ranganathan und Campbell 2003] RANGANATHAN, Anand ; CAMPBELL, Roy H.: A Middleware for Context-Aware Agents in Ubiquitous Computing Environments. In: ENDLER, Markus (Hrsg.) ; SCHMIDT, Douglas (Hrsg.): *Middleware 2003* Bd. 2672. Berlin, Heidelberg : Springer, 2003, S. 143–161

- [Rao und Minakakis 2003] RAO, Bharat ; MINAKAKIS, Louis: Evolution of Mobile Location-based Services. In: *Communications of the ACM* 46 (2003), Dezember, Nr. 12, S. 61–65. – URL <http://doi.acm.org/10.1145/953460.953490>. – ISSN 0001-0782
- [Rasmussen 1983] RASMUSSEN, Jens: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 13 (1983), Nr. 3, S. 257–266
- [Rasmussen und Goodstein 1985] RASMUSSEN, Jens ; GOODSTEIN, L. P.: Decision Support in Supervisory Control / Risø National Laboratory. Roskilde, 1985 (RISØ-M-2525). – Forschungsbericht
- [Rasmussen u. a. 1994] RASMUSSEN, Jens ; PEJTERSEN, Annelise M. ; GOODSTEIN, L. P.: *Cognitive Systems Engineering*. New York : John Wiley & Sons, 1994
- [Reese-Schäfer 1999] REESE-SCHÄFER, Walter: *Niklas Luhmann zur Einführung*. Hamburg : Junius Verlag, 1999
- [Rouse und Morris 1986] ROUSE, William B. ; MORRIS, Nancy M.: On looking into the black box: Prospects and limits in the search for mental models. In: *Psychological Bulletin* 100 (1986), Nr. 3, S. 349–363
- [Ruge 2010] RUGE, Lukas: *CoRAL – Context Reasoning and Adaptive Learning*, University of Lübeck, Diplomarbeit, 2010
- [Rumpe 2011] RUMPE, Bernhard: *Modellierung mit UML. Sprache, Konzepte und Methodik*. 3. Berlin, Heidelberg : Springer, 2011
- [Russell und Norvig 2002] RUSSELL, Stuart J. ; NORVIG, Peter: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 2. Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice Hall, 2002
- [Sadri 2011] SADRI, Fariba: Ambient Intelligence: A Survey. In: *ACM Computing Surveys (CSUR)* 43 (2011), Oktober, Nr. 4, S. 36:1–36:66. – URL <http://doi.acm.org/10.1145/1978802.1978815>. – ISSN 0360-0300

- [Saha und Mukherjee 2003] SAHA, Debashis ; MUKHERJEE, Amitava: Pervasive Computing: A Paradigm for the 21<sup>st</sup> Century. In: *Computer* 36 (2003), Nr. 3, S. 25–31. – ISSN 0018-9162
- [Salces u. a. 2006] SALCES, Fausto J. S. ; BASKETT, Michael ; LLEWELLYN-JONES, David ; ENGLAND, David: Ambient Interfaces for Elderly People at Home. In: CAI, Yang (Hrsg.) ; ABASCAL, Julio (Hrsg.): *Ambient Intelligence in Everyday Life*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006, S. 256–284
- [Schmalt und Heckhausen 1990] SCHMALT, Heinz-Dieter ; HECKHAUSEN, Heinz: *Motivation*. S. 451–494. In: SPADA, Hans (Hrsg.): *Lehrbuch allgemeine Psychologie*. Bern : Verlag Hans Huber, 1990
- [Schmitt u. a. 2010] SCHMITT, Felix ; CASSENS, Jörg ; KINDSMÜLLER, Martin C. ; HERCZEG, Michael: Mental Models of Disappearing Systems: Challenges for a Better Understanding. In: CASSENS, Jörg (Hrsg.) ; KOFOD-PETERSEN, Anders (Hrsg.) ; ZACARIAS, Marielba (Hrsg.) ; WEGENER, Rebekah (Hrsg.): *Proceedings of the Sixth International Workshop on Modelling and Reasoning in Context* Bd. 618. Lisbon, Portugal : CEUR-WS.org, August 2010, S. 61–72. – URL <http://ceur-ws.org/Vol-618/paper6.pdf>. – ISSN 1613-0073
- [Schmitt u. a. 2011] SCHMITT, Felix ; CASSENS, Jörg ; KINDSMÜLLER, Martin C. ; HERCZEG, Michael: Mental Models of Ambient Systems: A Modular Research Framework. In: BEIGL, Michael (Hrsg.) ; CHRISTIANSEN, Henning (Hrsg.) ; ROTH-BERGHOFER, Thomas (Hrsg.) ; KOFOD-PETERSEN, Anders (Hrsg.) ; COVENTRY, Kenny (Hrsg.) ; SCHMIDTKE, Hedda (Hrsg.) u. a.: *Proceedings of the CONTEXT '11 : the 7<sup>th</sup> International and Interdisciplinary Conference on Modeling and Using Context 2011* Bd. 6967, Springer, 2011, S. 278–291. – ISBN 978-3-642-24278-6
- [Stachowiak 1973] STACHOWIAK, Herbert: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York : Springer, 1973
- [Stahl und Roth-Berghofer 2008] STAHL, Armin ; ROTH-BERGHOFER, Thomas R.: Rapid Prototyping of CBR Applications with the Open Source

- Tool myCBR. In: *Advances in Case-Based Reasoning*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008, S. 615–629
- [Stengel 1993] STENDEL, Robert F.: Toward Intelligent Flight Control. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 23 (1993), Nov, Nr. 6, S. 1699–1717. – ISSN 0018-9472
- [Thomsen 2013] THOMSEN, Kevin: *Erweiterung des Context-Awareness-Simulators CASi um eine Simulationsbeschreibungssprache und Anbindung an das Context-Awareness-Framework CAKE*, Universität zu Lübeck, Bachelorarbeit, 2013
- [Turner 1998] TURNER, Roy M.: Context-mediated behavior for intelligent agents. In: *Int. J. Human-Computer Studies* 48 (1998), S. 307–330
- [Turoff 1997] TUROFF, Murray: Virtuality. In: *Communications of the ACM* 40 (1997), September, Nr. 9, S. 38–43. – URL <http://doi.acm.org/10.1145/260750.260761>. – ISSN 0001-0782
- [van Dijk und Kintsch 1983] VAN DIJK, Teun A. ; KINTSCH, Walter: *Strategies of Discourse Comprehension*. New York, NY : Academic Press, 1983
- [Virilio 1995] VIRILIO, Paul: *Die Informationsbombe. Paul Virilio und Friedrich Kittler im Gespräch*. November 1995. – URL <http://hydra.humanities.uci.edu/kittler/bomb.html>. – Zugriffsdatum: 29.03.2015. – Ausgestrahlt im deutsch-französischen Kulturkanal ARTE
- [Wachsmuth 2008] WACHSMUTH, Ipke: 'I, Max' – Communicating With an Artificial Agent. In: WACHSMUTH, Ipke (Hrsg.) ; KNOBLICH, Günther (Hrsg.): *Modeling Communication with Robots and Virtual Humans*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008, S. 279–295
- [Weiser 1991] WEISER, Mark: The Computer for the 21<sup>st</sup> Century. In: *Scientific American* (1991), September, S. 94–104
- [Weiser 1993] WEISER, Mark: Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing. In: *Communications of the ACM* 36 (1993), Juli, Nr. 7,

*Literaturverzeichnis*

S. 75–84. – URL <http://doi.acm.org/10.1145/159544.159617>. – ISSN 0001-0782

[Weizenbaum 1966] WEIZENBAUM, Joseph: ELIZA – A Computer Program For the Study of Natural Language Communication Between Man And Machine. In: *Communications of the ACM* 9 (1966), Nr. 1, S. 36–45

[Wilken 2012] WILKEN, Daniel: *Identifikation der Benutzeraktivität im MATE-System*, Universität zu Lübeck, Bachelorarbeit, 2012

[Wilson und Rutherford 1989] WILSON, John R. ; RUTHERFORD, Andrew: Mental models: theory and application in human factors. In: *Human Factors* 31 (1989), Nr. 6, S. 617–634. – ISSN 0018-7208