

Diss

Stefan Oppl

8. Mai 2009

Inhaltsübersicht

I. Grundlagen	I
1. Articulation Work	3
2. Mentale Modelle	13
II. Unterstützung	15
3. Grundlagen der Implementierung	17
4. Eingabe und Interpretation	27
5. Ausgabe	93
6. Persistierung	127
III. Evaluierung	155
7. Konzeptuelle Evaluierung	157
8. Untersuchungsdesign	163
9. Untersuchungsergebnisse	167
Verzeichnisse	III

Inhaltsübersicht

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Stichwortverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Bildquellen	X
Literaturverzeichnis	XIII

Inhaltsverzeichnis

I. Grundlagen	I
I. Articulation Work	3
I.1. Begriffsbestimmung	3
I.2. Kontext	5
I.3. Arten von Articulation Work	5
I.4. Systematisierung von Articulation Work	6
I.4.1. Systematik nach Fjuk, Smørdal und Nurminen	7
I.4.2. Systematik nach Hampson und Junor	7
I.5. Unterstützung von Articulation Work	7
I.5.1. Papertitel / Titel des Forschungsprojekts	9
I.5.2. Work and the Division of Labor	9
I.5.3. Gegenüberstellung und Zusammenfassung	10
I.6. Fazit	10
2. Mentale Modelle	13
2.1. Begriffsbestimmung	13
2.1.1. Entwicklung des Begriffs	13
2.1.2. Veränderung mentaler Modelle	13
2.2. Mentale Modelle und Articulation Work	13
2.3. Methoden zur Externalisierung mentaler Modelle	14
2.3.1. Überblick	14
2.3.2. Concept Mapping	14
2.3.3. Strukturlegetechniken	14
2.4. Herausforderungen bei der Anwendung	14
2.4.1. Kollaborative Anwendbarkeit	14
2.4.2. Nachhaltige Verwendung der Information	14
2.4.3. Zusammenführung	14
II. Unterstützung	15

3. Grundlagen der Implementierung	17
3.1. Entwicklung von Tangible Interfaces	18
3.1.1. Ubiquitous Computing	18
3.1.2. Augmented Reality	18
3.2. Konzeptualisierung und Einteilung von Tangible Interfaces	18
3.2.1. Graspable User Interfaces	19
3.2.2. Tangible Bits	19
3.2.3. Containers, Tokens und Tools	19
3.2.4. Tangible Objects Meaning	22
3.2.5. Das MCRpd Interaktions-Modell	22
3.2.6. Degree of Coherence	22
3.2.7. Tokens und Constraints nach Shaer et al.	22
3.2.8. Einteilung nach Klemmer, Li, Lin und Landay	22
3.2.9. Taxonomie nach Fishkin	22
3.2.10. Tokens und Constraints nach Ullmer et al.	24
3.2.11. Tangible Bits: Beyond Pixels	25
3.2.12. Zusammenfassung	25
3.3. Tangible Interfaces in kooperativer Verwendung	25
3.4. Tabletop Interfaces	25
3.4.1. Historische Entwicklung	25
3.5. Tangible Interfaces zur Modellbildung	25
3.5.1. Aktuelle verwandte Ansätze	25
4. Eingabe und Interpretation	27
4.1. Möglichkeiten zur Erfassung von Benutzerinteraktion	27
4.1.1. In Frage kommende technologische Ansätze	28
4.1.2. In Frage kommende Frameworks	35
4.1.3. Technologieentscheidung	44
4.2. Konzeption und Umsetzung der Hardwarekomponenten	50
4.2.1. Überblick	51
4.2.2. Tokens und Input-Werkzeuge	52
4.2.3. Input auf der Tischoberfläche	62
4.3. Benutzerinteraktion mit dem Werkzeug	64
4.3.1. Hinzufügen und Verändern von Modellelementen	65
4.3.2. Benennen von Modellelementen	66
4.3.3. Verbinden von Modellelementen	67
4.3.4. Löschen von Elementen und Verbindungen	69
4.3.5. Einbettung von Zusatzinformation	69
4.3.6. Kontrolle der Modellierungshistorie	71
4.4. Erfassung der Benutzerinteraktion durch Software	73
4.4.1. Interpretation der Rohdaten	73

4.4.2.	Stabilisierung der Erkennungsleistung	76
4.4.3.	Erkennung von Markierungen und Verbindungen	81
4.4.4.	Erkennung von geöffneten Tokens	83
4.4.5.	Benennung von Modellementen	86
4.4.6.	Festlegung der Bedeutung von Modellementen	88
4.4.7.	Tracking des Modellzustandes	88
4.4.8.	Verteilung des Modellzustandes	91
4.5.	Zusammenfassung	91
5. Ausgabe		93
5.1.	Auszugebende Information	93
5.2.	Technologische Grundlage der Ausgabe	94
5.2.1.	Ansätze zur kohärenten Ausgabe	95
5.2.2.	Ansätze zur entkoppelten Ausgabe	98
5.2.3.	Technologie-Entscheidung	100
5.2.4.	Frameworks zur Ausgabe	102
5.3.	Ausgabe von Information	105
5.3.1.	Konzept	105
5.3.2.	Architektonik	107
5.3.3.	Ausgabe von Information zum Modell	108
5.3.4.	Ausgabe zur Kontrolle des Systems	113
5.4.	Umsetzung der Ausgabe mit Software	118
5.4.1.	Ausgabe des Modellzustands	120
5.4.2.	Ausgabe der Modellierungshistorie	122
5.4.3.	Umsetzung der Wiederherstellungsunterstützung	122
5.5.	Zusammenfassung	124
6. Persistierung		127
6.1.	Möglichkeiten der Persistenzsicherung	127
6.2.	Topic Maps	128
6.2.1.	Topics, Subjects, Topic Names und Variants	129
6.2.2.	Associations und Roles	132
6.2.3.	Occurrences und Datatypes	133
6.2.4.	Metamodellierung in Topic Maps	133
6.2.5.	Statements und Scopes	137
6.2.6.	Reification	138
6.2.7.	Merging	139
6.3.	Abbildung von Modellen auf Topic Maps	139
6.3.1.	Grundlegende Abbildung	140
6.3.2.	Abbildung des Metamodells	141
6.3.3.	Abgrenzung von Submodellen	144

6.3.4. Flexibilisierung der Abbildung	146
6.4. Technische Umsetzung der Persistierung von Modellen	147
6.4.1. Topic Map Engine	147
6.4.2. Dynamische Metamodelle	150
6.4.3. Persistierung	150
6.5. Export graphischer Repräsentationen	150
6.5.1. Ausgabeformen	150
6.5.2. Technische Umsetzung des graphischen Exports	154
6.6. Zusammenfassung	154
 III. Evaluierung	 155
 7. Konzeptuelle Evaluierung	 157
7.1. Einordnung in das Ordnungssystem von Holmquist et al.	157
7.1.1. Abbildung	157
7.1.2. Bewertung	158
7.2. Einordnung in die Taxonomie von Fishkin	158
7.2.1. Abbildung	158
7.2.2. Bewertung	161
7.3. Zusammenfassung	162
 8. Untersuchungsdesign	 163
8.1. Frage 1 – Unterstützung von Articulation Work	163
8.2. Frage 2 – Beitrag und Verwendung der Teilwerkzeuge	164
8.3. Untersuchungsablauf	165
8.3.1. Phase 1 – Verwendbarkeit	165
8.3.2. Phase 2 – Lehr- und Lern-Szenarien	165
8.3.3. Phase 3 – Unternehmenseinsatz	165
 9. Untersuchungsergebnisse	 167
9.1. Erhobene Daten	167
9.1.1. Phase 1	167
9.1.2. Phase 2	167
9.1.3. Phase 3	167
9.2. Auswertung & Interpretation	167
 Verzeichnisse	 III
 Abbildungsverzeichnis	 III

Tabellenverzeichnis	IV
Stichwortverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Bildquellen	X
Literaturverzeichnis	XIII

Teil I.

Grundlagen

I. Articulation Work

In diesem Kapitel wird das Konzept „Articulation Work“ dargestellt und in den Kontext von menschlicher Arbeit an sich gestellt. Der zweite Teil des Kapitels widmet sich den Aktivitäten, die „Articulation Work“ ausmachen, den Merkmalen, an denen sich gute „Articulation Work“ zeigt, sowie den Möglichkeiten der Unterstützung von „Articulation Work“ durch organisationale und technische Maßnahmen.

I.I. Begriffsbestimmung

Das Konzept der "Articulation Work" wurde als Erklärungsmodell für einen bestimmten Typus von menschlicher Arbeit Mitte der 1980er Jahre von Strauss (1985) im Kontext von Fallstudien aus der Krankenhaus-Organisation eingeführt. "Articulation Work" ist dabei jener Anteil an menschlicher Arbeit, der der Abstimmung mit anderen Individuen dient. Diese Abstimmung ist notwendig um das eigentliche Arbeitsziel erreichen zu können. Arbeit wird als inhärent kooperative Prozess gesehen, der immer auf Interaktion mit anderen Menschen basiert bzw. diese bedingt (Strauss formuliert diese Annahme in Bezugnahme auf Hughes (1971) prägnant mit der Aussage „*work rests ultimately on interaction*“). Diese Annahme erscheint insoweit als zulässig, als dass selbst Arbeitsabläufe, die selbst keine Kooperation mit anderen Menschen bedingen, zumindest auf den Ergebnissen anderer Arbeitsabläufe aufbauen oder als Grundlage weiterer Arbeitsabläufe dienen. Interaktion tritt also in jedem Arbeitsprozess zumindest zu Beginn und am Ende in unmittelbarer oder mittelbarer¹ Form auf.

Abbildung, in der kooperative Arbeitsprozesse und solche mit mittelbarer und unmittelbarer Interaktion zu Beginn oder am Ende dargestellt werden

Jener Teil von Arbeit, der der eigentlichen Zielerreichung dient, wird im hier vorgestellten Erklärungsmodell als „Production Work“ bezeichnet (Fujimura, 1987). „Production Work“ ist komplementär zu „Articulation Work“ zu sehen und umfasst

¹Unter "mittelbar" ist hier Interaktion zu verstehen, die nicht im direkten Kontakt zwischen Individuen abläuft sondern lediglich indirekt durch die Ergebnisse eines Arbeitsprozesses (Materialien, Dokumente, ...) vermittelt wird.

1. Articulation Work

alle Aktivitäten, die der „Wertschöpfung“ im wörtlichen Sinn, also der Schaffung jener Werte (oder Ergebnisse), die durch den Arbeitsablauf erreicht werden sollten. Wenn hier von Arbeit bzw. Arbeitsabläufen die Rede ist, so ist darunter eine Kette von Aktivitäten zu verstehen, die der Erreichung einer vorab gewählten Ziels dient².

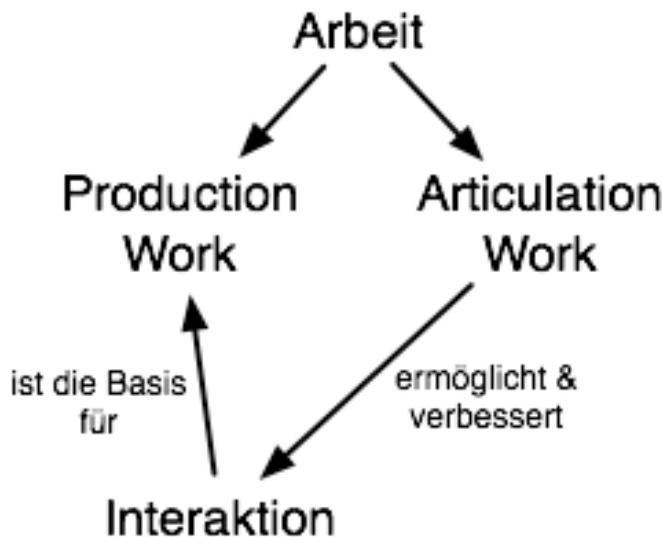


Abbildung 1.1.: Struktur von Arbeitsabläufen

Teile eines Arbeitsablaufs dienen also der Zielerreichung an sich („Production Work“). Andere Teile dienen der Abstimmung zwischen den involvierten Akteuren, um ein gemeinsames Verständnis über die jeweiligen Schnittstellen – also die Be-rührungs punkte zwischen den Tätigkeiten – zu entwickeln. Diese „Koordination“ ist kritisch für den Erfolg von kooperativer Arbeit (Strauss, 1993) und wird als „Articulation Work“ bezeichnet.³ „Articulation Work“ ist damit ein Enabler für funktio-nierende Kommunikation und Koordination im eigentlichen Arbeitsprozess⁴.

²siehe dazu etwa die Definition von Arbeit durch Semmer und Udris (2004): „Arbeit ist zielge-richtete menschliche Tätigkeit zum Zwecke der Transformation und Aneignung der Umwelt auf-grund selbst- oder fremddefinierter Aufgaben, mit gesellschaftlicher, materieller oder ideeller Bewer-tung, zur Realisierung oder Weiterentwicklung individueller oder kollektiver Bedürfnisse, Ansprüche und Kompetenzen.“

³„Without an understanding of articulation, the gap between requirements and the actual work process in the office will remain inaccessible to analysis. That is, it will be possible to describe tasks in an idealized form but not to describe actual situations.“(Gerson und Star, 1986)

⁴„Reconciling incommensurate assumptions and procedures in the absence of enforceable standards is the essence of articulation. Articulation consists of all the tasks involved in assembling, scheduling, monitoring, and coordinating all of the steps necessary to complete a production task.“(Gerson und Star, 1986)

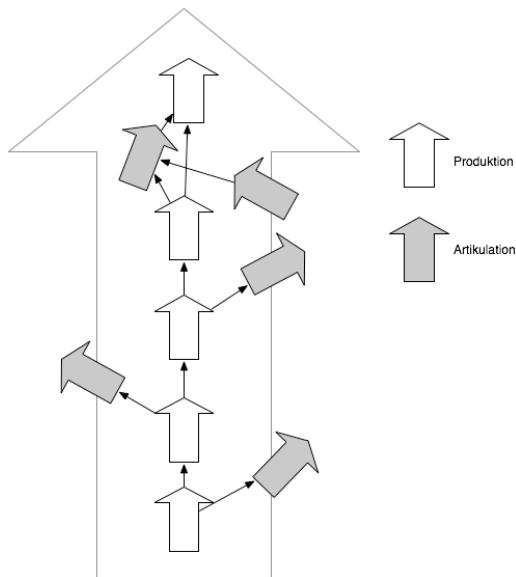


Abbildung 1.2.: Konzeptualisierung von „Arbeit“ nach (Strauss, 1985) und (Fujimura, 1987)

Der Begriff „Articulation Work“ ist im Englischen zweideutig und von Strauss bewusst so gewählt. Einerseits wird damit ausgedrückt, dass *Arbeit* ("Work") artikuliert wird, andererseits zeigt der Begriff, dass die *Artikulation*, selbst ebenfalls Arbeit ist (also Zeit und Ressourcen in Anspruch nimmt) und auch also solche wertgeschätzt werden muss (Fujimura, 1987). „Articulation Work“ ist kein klar abgegrenztes und strukturiertes Konzept – sie tritt je nach Arbeitssituation in unterschiedlichen Spielarten auf. Die Unterscheidung dieser Arten von „Articulation Work“ ist für die Unterstützung derselben relevant und wird daher im folgenden Abschnitt genauer betrachtet.

I.2. Kontext

Arc of Work, Due Process,...

I.3. Arten von Articulation Work

Strauss argumentiert, dass Artikulation immer passieren muss (und passiert), wo Menschen zusammenarbeiten, um zu vermeiden, dass unbekannte Aspekte Probleme bei der Durchführung der Arbeit verursachen (Strauss, 1988). „Articulation

Work“ ist kein revolutionäres Konzept, sondern fasst Tätigkeiten unter einem Begriff zusammen, die seit jeher Teil jeder Zusammenarbeit zwischen Menschen sind. Grundsätzlich geht Strauss davon aus, dass Artikulation immer abläuft, egal wie einfach oder kompliziert, wie eingespielt oder neuartig eine (Zusammen-)Arbeit ist (Strauss, 1988). Sehr wohl existieren jedoch Unterschiede in der Qualität der Arbeit, die sich auf die Form der Artikulation auswirken, die zu deren Abstimmung notwendig ist: „*A useful fundamental distinction between classes of interaction is between the routine and the problematic. Problematic interactions involve 'thought', or when more than one interactant is involved then also 'discussion'.*“ (Strauss, 1993). Dieses Zitat zeigt im Übrigen auch, dass „Interaction“ im Sinne von Strauss nicht unbedingt ein kollektives Phänomen ist, sondern auch individuell (im Bezug auf die (unbelebte) Umgebung) auftreten kann.

Je komplexer („problematic“) eine Interaktion ist, desto notwendiger wird laut Strauss eine explizite Beschäftigung mit dem Vorgang der Artikulation. Bei einfachen, eingespielten („routine“) Interaktionen bleibt die Artikulation zumeist implizit, verborgen und informell (Hampson und Junor, 2005) (entsprechend der „Sozialisation“ in Nonaka & Takeuchis SECI-Zyklus (Nonaka und Takeuchi, 1995)). Ein grundlegendes Problem, dass Artikulation für jeden noch so einfach erscheinend Arbeitsvorgang potentiell relevant macht, spricht Strauss mit den Worten von Hughes unmittelbar nach der Definition von „problematic interaction“ an: „*[O]ne man's routine of work is made up of the emergencies of other people*“ (Hughes, 1971) zitiert nach (Strauss, 1993).

„Articulation Work“ tritt also in zwei Qualitäten auf. Ist der Bedarf zur Abstimmung bekannt und werden Tätigkeiten zur Abdeckung dieses Bedarf bewusst durchgeführt, so spricht man von *expliziter* „Articulation Work“ (Strauss, 1988)(Fjuk et al., 1997). Die Abstimmung von Tätigkeiten, die ständig während der Zusammenarbeit unbewusst ausgeführt wird, bezeichnet man als *implizite* „Articulation Work“. Letztgenannte Art ist es auch, die von den Arbeitenden „automatisch“ zur Anwendung gebracht wird, sobald Änderungen in der Arbeitsumgebung oder Probleme auftreten (Strauss, 1988). Implizite „Articulation Work“ stößt aber an ihre Grenzen, wenn die Arbeitssituation als „problematisch“ (Strauss, 1988) oder „komplex“ (Schmidt, 1990, S. 23f) wahrgenommen wird. Es wird dann notwendig, dezidierte Abstimmungs-Aktivitäten anzustoßen, also *explizite* „Articulation Work“ durchzuführen.

I.4. Systematisierung von Articulation Work

Fjuk (Vergleich mit Activity Theory) Hampson (Vergleich mit Wissensspirale?)

Neben der Unterscheidung zwischen impliziter und expliziter Articulation Work anhand der Komplexität der zugrundeliegenden Interaktion führt Strauss keine systematische Betrachtung von Articulation Work hinsichtlich deren Ausprägungen durch. Offensichtlich wird in seinen Text jedoch, dass es Articulation Work als einzigartiges, beobachtbares und eindeutig also solche identifizierbares Phänomen nicht gibt. Abhängig vom betrachteten Arbeitsablauf, der Arbeitsumgebung und den beteiligten Personen zeigt sich Articulation Work in unterschiedlichen Formen. Um eine strukturierte, differenzierte Betrachtung zu ermöglichen und in der Folge Unterstützungsmaßnahmen ableiten zu können, ist eine Einführung einer Systematik sinnvoll.

In der Literatur existieren zwei Ansätze zur Differenzierung zwischen unterschiedlichen Arten von Articulation Work. Fjuk (REF) stellen Articulation Work der Activity Theory (REF) gegenüber und unterscheiden so verschiedene Ebenen. Hampson (REF) führen ein Raster ein, das Articulation Work hinsichtlich der Art des Arbeitsprozesses unterscheidet, in dem sie zur Anwendung kommt. Beide Ansätze werden in der Folge im Detail beschrieben und bezüglich ihrer Implikationen für diese Arbeit betrachtet.

I.4.1. Systematik nach Fjuk, Smørdal und Nurminen

Fjuk et al. (1997) betrachten Articulation Work im Kontext von CSCW⁵ und versuchen ein konzeptuelles Framework zu entwickeln, das die Rolle von Computersystemen im Kontext individueller und kollektiver Tätigkeiten erklärt – sie entwickeln also ein Erklärungsmodell für die Funktionsweise sozio-technischer Systeme (REF). Ansatzpunkt ist dabei die Betrachtung von Computersystemen als Arbeitsgegenstände. Arbeitsgegenstände als solche werden von Strauss jedoch nicht explizit in seinen Ausführungen berücksichtigt, so dass sich hier eine konzeptuelle Lücke ergibt. Diese versuchen die Autoren mit der Einführung der Activity Theory (REF) zu schließen.

I.4.2. Systematik nach Hampson und Junor

I.5. Unterstützung von Articulation Work

Nach den ersten Arbeiten von Strauss zum Thema „Articulation Work“ wurde das Konzept rasch als Erklärungsmodell für die Vorgänge im Zuge kooperativer Arbeit aufgenommen und darauf basierend Maßnahmen zur Unterstützung derselben ab-

⁵Computer Supported Cooperative Work

geleitet. Anhand der historischen Entwicklung von Mitte der 1980er-Jahre bis Ende des ersten Jahrzehntes des neuen Jahrtausends werden im Folgenden diese Maßnahmen beschrieben, in den jeweiligen Anwendungskontext gesetzt und auch hinsichtlich des zu unterstützenden Verständnisses von „Articulation Work“ betrachtet. Hierbei werden alle Arbeiten berücksichtigt, die sich direkt auf den von Strauss geprägten „Articulation Work“-Begriff beziehen.

Zur strukturierten Umsetzung der Betrachtung der historischen Entwicklung von „Articulation Work“ wird ein einheitlicher Raster angewandt, anhand dessen die aus unterschiedlichen Forschungsgebieten stammenden und in unterschiedlichen Anwendungsdomänen angewandten Arbeiten einander gegenüber gestellt werden können. Neben den eigentlichen Unterstützungsmaßnahmen ist zur Bewertung derselben auch Kontextinformation notwendig, die die unterschiedlichen Ansätze offenlegt. Folgende Merkmale einer Arbeit werden dazu betrachtet:

Forschungsdomäne Forschungsgebiet aus dem das Konstrukt "Articulation Work" betrachtet wird bzw. in dessen Kontext es zur Anwendung gebracht wird.

Untersuchungsdomäne Abstraktes oder konkretes Problemfeld, in dem "Articulation Work" als Analysedimension oder zur Ableitung von Maßnahmen angewandt wird.

Verständnis von Articulation Work Bei der Betrachtung der Untersuchungsdomäne zur Anwendung gebrachte Definition von "Articulation Work" (ggf. auch in Abgrenzung zu anderen Arten von Arbeit).

Auftretende Phänomene Tätigkeiten und/oder Handlungsweisen, die im Zuge von "Articulation Work" auftreten und ggf. unterstützt werden können

Unterstützung Konkrete oder abstrakte Maßnahmen oder Werkzeuge, die zur Unterstützung von "Articulation Work" vorgeschlagen und/oder umgesetzt werden.

Auftretende Effekte Tatsächliche oder vermutete Auswirkungen der Unterstützung auf die durchgeführte "Articulation Work"

Die als relevant betrachteten Publikationen sind methodisch höchst unterschiedlich ausgerichtet. Ein großer Anteil beschreibt rein empirisch-deskriptiv ein beobachtetes Phänomen und zieht Schlüsse hinsichtlich möglicher bzw. notwendiger Ausprägungen von "Articulation Work" in bestimmten Anwendungsdomänen. Ein anderer Teil fokussiert auf die organisationale und/oder technische Unterstützung von "Articulation Work", zum Teil ohne auf eigene empirische Ergebnisse aufzubauen oder diese zu erheben. Aus diesem Grund kann das oben angegebene Raster nicht immer vollständig gefüllt werden. Wo hinsichtlich einer bestimmten Dimension keine Information vorhanden ist, wird explizit im Text darauf hingewiesen. Wo mehrere Publikation eines Autors oder einer Gruppe zum gleichen Forschungsge-

genstand existieren, wurden diese in einem Abschnitt zusammengefasst und in der jeweiligen Einleitung auf die der Beschreibung zugrundeliegenden Publikationen verwiesen.

I.5.1. Papertitel / Titel des Forschungsprojekts

Angabe der zugrundeliegenden Publikation sowie einer kurzen Zusammenfassung des Inhalts

Forschungsdomäne

Untersuchungsdomäne

Verständnis von Articulation Work

Auftretende Phänomene

Unterstützung

Auftretende Effekte

I.5.2. Work and the Division of Labor

In dieser Publikation (Strauss, 1985) beschreibt Strauss zum ersten Mal sein Konzept „Articulation Work“. Er motiviert seine Forschung mit Erklärungs-Lücken, die in der Konzeptualisierung von kooperativer Arbeit bzw. Arbeitsteilung bestehen. Ziel ist es, mit den entwickelten Ansätzen nicht nur Arbeit(steilung) erklären zu können sondern auch weitergehende Forschung zu ermöglichen bzw. dieser als Leitprinzipien zugrunde zu liegen.

Forschungsdomäne Strauss' Hintergrund, auf Basis dessen die hier betrachtete Publikation geschrieben wurde, ist die Soziologie (im konkreten Artikel die Medizinsoziologie (vgl. Siegrist, 2005)). Methodisch wendet er den von ihm mitgeprägten „Grounded Theory“-Ansatz (Glaser und Strauss, 1977) an, mithilfe dessen aus Feldbeobachtungen und deren systematischer, qualitativer Auswertung Theorien abzuleiten, die das Verhalten und die Interaktion der beobachteten Akteure erklärt.

Untersuchungsdomäne Neben einer konzeptuellen Erörterung der kooperativen Arbeit zugrunde liegenden Denkmodelle und Betrachtungsmuster (siehe Abschnitt 1.2) werden

Verständnis von Articulation Work

Auftretende Phänomene

Unterstützung

Auftretende Effekte

1.5.3. Gegenüberstellung und Zusammenfassung

1.6. Fazit

hier muss eine zusammenfassende Tabelle der in der Literatur verfügbaren Information rein

Die Zielsetzung von „Articulation Work“ formulieren die Proponenten des Ansatzes - allen voran Strauss - klar aus. Offen bleiben jedoch bei allen Autoren direkten Aussagen zum eigentlichen Gegenstand von „Articulation Work“ – also Allem was von den beteiligten Individuen zu artikulieren ist – und den notwendigen Leistungen der Individuen im Prozess der Artikulation. Aussagen zu diesen Aspekten sind aber für die Entwicklung von Ansätzen zur Unterstützung von expliziter „Articulation Work“ notwendig.

Strauss ist sich dieser Auslassung bewusst⁶, und beschäftigt sich in späteren Arbeiten (Strauss, 1993) auch mit jenen kognitiven Vorgängen, die von ihm als „thought processes“ oder „mental activities“ bezeichnet werden und die untrennbar mit jeder Art von Tätigkeit und Interaktion verbunden sind⁷ und diese beeinflussen⁸.

⁶ „[...] many social scientist pay almost no attention to interior activity: ignoring it, taking it for granted, but leaving it unexamined, or giving it the kind of abstract but not very detailed analysis [...]“ (Strauss, 1993, S. 131)

⁷ „These {thought processes} accompany visible action, as well as precede and follow in conditional and consequential modes“ (Strauss, 1993, S. 146)

⁸ „Even well-grooved, routine action and interaction may be accompanied by thought [...] directly relevant to the work at hand. As I vacuum the house, barely noticing my movements, still I give myself commands [...]“ (Strauss, 1993, S. 132)

Im Kontext der Abstimmung von Tätigkeiten kommt den „thought processes“ der Individuen große Bedeutung zu, da sie den sichtbaren individuellen Handlungen zugrunde liegen bzw. diese beeinflussen. „Articulation Work“ wirkt sich also auf die „thought processes“ der beteiligten Individuen aus. „Thought processes“ umfassen „*images, imaginations, projections of scenes, [...] flashes of insight, rehearsals of action, construction and reconstruction of scenarios, the spurting up of metaphors or comparisons, the reworking and reevaluating of past scenes and one's actions within them, and so on and on*“ (Strauss, 1993, S. 130) - also im Wesentlichen alle kognitiven Vorgänge, die unmittelbar oder mittelbar im Zusammenhang mit den sichtbaren Arbeitsaspekten, insbesondere den Tätigkeiten zur Zielerreichung und der wahrgenommenen Arbeitsumgebung, stehen. Strauss interessiert sich allerdings ausschließlich für die dynamischen Aspekte der Interaktion zwischen Individuen, nicht aber für die Ausgangspunkte und Ergebnisse der zugrunde liegenden „thought processes“.⁹ Wie bereits oben erwähnt sind aber die Repräsentationen, auf den „thought processes“ beruhen und operieren, für die Unterstützung von „Articulation Work“ von Interesse. Die kognitions-wissenschaftlichen Ansätze zu Schemata ((Rumelhart und Norman, 1978) (vgl. nach Hanke, 2006)) und mentalen Modellen ((Seel, 1991, vgl.)) sind ein Erklärungsansatz für diese Lücke.

⁹ „I use the gerund 'ing' after 'symbol' [bei der Beschreibung von 'symbolizing', Anm.] to signify that my principal interest is, again, in interaction rather than its products, for symbols are precipitates of interaction“ (Strauss, 1993, S. 149)

2. Mentale Modelle

In diesem Kapitel wird das Konzept der mentalen Modelle eingeführt, das in dieser Arbeit als Erklärungsansatz für jene Aspekte von "Articulation Work" verwendet wird, die die nicht sichtbaren, kognitiven Beiträge eines beteiligten Individuums betreffen. Nach einer Einführung in die Begriffswelt der mentalen Modelle wird die Argumentation aus dem letzten Kapitel nochmals aufgegriffen und die mögliche Rolle mentaler Modelle für "Articulation Work" erörtert. In der Folge werden Methoden eingeführt mit denen mentale Modelle externalisiert und kommuniziert werden können. Basierend auf diesen Beschreibungen wird im letzten Teil des Kapitels untersucht, welche Herausforderungen sich bei der Anwendung dieser Methoden im Kontext von "Articulation Work" ergeben können.

2.1. Begriffsbestimmung

Der Begriff der Mentalen Modelle

2.1.1. Entwicklung des Begriffs

2.1.2. Veränderung mentaler Modelle

Assimilation vs. Akkommodation

2.2. Mentale Modelle und Articulation Work

Argumentation mit Wissensspirale (Nonaka & Takeuchi)

2.3. Methoden zur Externalisierung mentaler Modelle

2.3.1. Überblick

2.3.2. Concept Mapping

2.3.3. Strukturlegetechniken

2.4. Herausforderungen bei der Anwendung

2.4.1. Kollaborative Anwendbarkeit

pro Strukturlegetechniken

2.4.2. Nachhaltige Verwendung der Information

pro Concept Mapping

2.4.3. Zusammenführung

Offenheit des Conceptmapping

Strukturlegetechniken mit IT-Unterstützung

Nicht SLT in den Computer sondern Computer zur Unterstützung von SLT

Teil II.

Unterstützung

3. Grundlagen der Implementierung

Wie im Kapitel "Design" gefordert, wurde zur Umsetzung des Werkzeugs ein "Tangible Tabletop Interface" verwendet. Tabletop Interface zeichnen sich im Generellen dadurch aus, dass im Gegensatz zu handelsüblichen Rechnern nicht nur die Software sondern auch die Hardware applikationsspezifisch ist und nicht generisch eingesetzt werden kann. Die Hardware bildet dabei einen Teil oder die gesamte Benutzungsschnittstelle ab. Im speziellen Fall eines "Tangible Tabletop Interfaces" basiert der Benutzerinteraktion auf der Verwendung physischer Bausteine ("Tokens"), die auf der physischen Oberfläche des Interfaces manipuliert werden. Dieses Paradigma wird ergänzt von Tabletop Interfaces, die die Benutzerinteraktion ausschließlich auf Gesten bzw. Berührungen der Oberfläche abbilden (horizontal verbaute "Touch-" bzw. "Multi-Touch-Displays").

REFs!!! Die Entwicklung von Tabletop Interfaces begann Mitte der 1990er Jahren mit den Arbeiten von Ishii & Ullmer. Auch die erste Anwendung, die sich mit Modellierungs-Ansätzen mit Hilfe von Tabletop Interfaces konzentriert, stammt aus dieser Zeit. Mit dem fortschreiten der technologischen Entwicklung ist heute ein Status erreicht, in dem mit Hilfe generischer Identifikations-Frameworks schnell und ohne großen Aufwand Applikationen mit "tangiblen" Inputkanälen erstellt werden können. Zur Zeit noch im Prototypenstatus befinden sich Ansätze, die sich mit generischen Möglichkeiten des tangiblen Informationsoutputs beschäftigt. Der Rückkanal vom Rechner zum Benutzer wird heute zumeist mit der Projektion von Inhalten auf die Arbeitsoberfläche umgesetzt.

In den folgenden Abschnitten wird die historische Entwicklung von Tabletop Interfaces sowie der aktuelle Stand der Entwicklung im Anwendungsbereich dieser Arbeit betrachtet. Es werden dabei die grundlegenden Konzepte und Eigenschaften der jeweiligen Arbeiten betrachtet und das Potential hinsichtlich der Umsetzung von in Kapitel XY identifizierten Anforderungen an das hier entwickelte Werkzeug betrachtet.

3.1. Entwicklung von Tangible Interfaces

Der Begriff der Tangible bzw. Graspable Interfaces – also der "berührbaren" oder "begreifbaren" Benutzungsschnittstellen — stammt aus der Mitte der neunziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts. Fitzmaurice et al. (1995) werden im Allgemeinen als die ersten betrachtet, die den Begriff des "Graspable User Interfaces" prägen und damit die Manipulierbarkeit digitaler Information durch physische Mittel beschreiben. Fitzmaurice (1996) präzisiert später den Begriff durch die Abgrenzung zwischen (herkömmlichen, maus-, tastatur- und bildschirmbasierenden) zeitlich gemultiplexten Schnittstellen, bei denen der Informationsaustausch zwischen Benutzer und System über einen Kanal zeitlich hintereinander erfolgt und den (neuartigen, berührbaren) räumlich gemultiplexten Schnittstellen, bei denen mehrere Kanäle gleichzeitig zur Interaktion zwischen Benutzer und System verwendet werden können.

Der Begriff des "Tangible User Interfaces" wurde kurz danach bzw. parallel dazu von Ishii und Ullmer (1997) eingeführt. Ishii und Ullmer verfolgen dabei bei der Definition den umgekehrten Weg und sprechen von einer "Augmentation der realen Welt durch eine Kopplung von digitaler Information and physische Objekte".

3.1.1. Ubiquitous Computing

3.1.2. Augmented Reality

3.2. Konzeptualisierung und Einteilung von Tangible Interfaces

Die Entwicklung des Forschungsgebiets der "Tangible Interfaces" wurde von mehreren konzeptuellen Arbeiten maßgeblich beeinflusst. Die dort vorschlagenen Erklärungsmodelle definieren das Gebiet und grenzen es gegenüber anderen Forschungsbereichen ab. Sie dienen außerdem als Grundlage für Erklärung und Konzeption konkreter Tangible Interfaces. Im Folgenden wird die historische Entwicklung dieser konzeptuellen Modelle beschrieben und auf deren Spezifika eingegangen.

Zur strukturierten Betrachtung von Tangible Interfaces ist es außerdem notwendig, jene Dimensionen zu identifizieren, an denen sich einzelne Tangible Interfaces einordnen und unterscheiden lassen. Die Ausprägungen dieser Dimensionen liefern kombiniert ein Begriffssystem, dass bei der Aufbereitung von unterschiedlichen An-

"augment the real physical world by coupling digital information to everyday physical objects and environments"(Ishii und Ullmer, 1997)

sätzen im Bereich der Tangible Interface sowie deren Vergleich helfen kann. Die hier vorgestellten Ansätze tragen unterschiedlich detailliert und aus unterschiedlichen Gesichtspunkten zu dieser Thematik bei. Die einzelnen Ansätze werden hier dargestellt und in Kapitel XY auf das in dieser Arbeit entwickelte System angewandt um so das System-Design aus konzeptueller Sicht zu reflektieren und potentielle Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten zu identifizieren.

Allgemein ist anzumerken, dass eine Vielzahl von Ausdrücken im sich entwickelnden Forschungsgebiet mehrfach belegt wurden und/oder nicht eindeutig definiert sind. Im Folgenden werden die Ausdrücke der jeweiligen Autoren übernommen, eine Interpretation bzw. Abbildung auf die Terminologie anderer Autoren wird nur vorgenommen, wo sie im jeweiligen Artikel explizit angeführt wurde. In der Zusammenfassung dieses Abschnitts wird versucht, die unterschiedlichen Terminologien nochmals zusammenzufassen und einen Satz an Ausdrücken festzulegen, der im Folgenden für diese Arbeit Anwendung findet.

– evtl. Kurzüberblick (definition list) über die Ansätze, die jetzt kommen –

3.2.1. Graspable User Interfaces

Fitzmaurice legt in jener Arbeit, in der es den Begriff des "Graspable User Interfaces" prägt (Fitzmaurice, 1996), auch Eigenschaften fest, anhand deren sich die "Graspability" einer Benutzungsschnittstelle zeigt und beurteilen lässt. Diese Beurteilung erfolgt auf einer generischen Skala mit Ausprägungen von "niedrig" bis "hoch", wobei "hohe" Werte in mehreren Eigenschaften auf eher hohe "Graspability" hinweist.

Space Multiplexing

Concurrency

Physical Form

Spatially aware

Spatial reconfigurability

3.2.2. Tangible Bits

(Ishii und Ullmer, 1997)

3.2.3. Containers, Tokens und Tools

3. Grundlagen der Implementierung

Holmquist et al. (1999) legen ihre Arbeit als konzeptuelle Betrachtung von interaktiven Systemen an, in denen physische Objekte verwendet werden, um auf digitale Information zuzugreifen bzw. diese zu manipulieren. Das Einteilungsschema, das die Autoren vorschlagen, basiert auf der Art und Weise, in der Information an diese physischen Objekte gebunden ist. Grundsätzlich unterscheiden sie zwischen *Containern*-, *Tokens* und *Tools*, wobei eine exakte Abgrenzung bzw. eindeutige Zuordnung zu einer Kategorie nicht immer möglich und sinnvoll ist.

Der hier vorgestellte Ansatz fokussiert auf die physische Interaktion als Eingabemedium, auf den Aspekt der Informationsausgabe wird nicht eingegangen. Dies ist für das Verständnis der folgenden Beschreibungen im Kontext der späteren historischen Entwicklung wichtig und muss bei der Anwendung dieses Ansatzes berücksichtigt werden.

Containers

Als Container werden alle jene Objekte bezeichnet, an die beliebige digitale Information gebunden werden kann. Eine Container ist also ein unspezifisches physisches Objekt in einem Tangible User Interface. Sein Aussehen oder andere physische Eigenschaften lässt keine Aussage über die Art der angebundenen Information bzw. die Information selbst zu.

Beliebige physische Objekte können als Container agieren, sofern sie die Möglichkeit bieten, Information in bzw. auf ihnen abzulegen oder von einer Infrastruktur eindeutig identifizierbar sind, so dass Information über die eindeutige Identifikation an sie gebunden werden kann. Container agieren somit ausschließlich als physische Informationsträger und können als solche verwendet werden, um Information zwischen Systemen zu transportieren.

Ein typisches Beispiel ist die Verwendung eines Füllfederhalters als Container, an den beliebige Information gebunden werden kann, um diese von einem Ort zum anderen transportieren zu können. Der Füllfederhalter steht in keinem direkten Zusammenhang mit der angebundenen Information, aus seinem Erscheinungsbild oder seinen Eigenschaften kann nicht auf die angebundene Information geschlossen werden.

Tokens

Tokens sind physische Objekte, deren äußeres Erscheinungsbild bzw. deren Eigenschaften in irgendeiner Weise mit der durch sie repräsentierten Information zusammenhängen. Das physische Objekte und die angebundene Information sind nicht mehr voneinander unabhängig sondern stehen in einer konzeptuellen Zusammen-

hang. Die äußere Form oder andere physische Eigenschaften dienen oft als Hinweis auf die angebundenen Informationsart oder stehen sogar in Zusammenhang mit der konkret angebundenen Information.

Ein typisches Beispiel für ein Token wäre ein Buch, an das über eine eindeutige Identifikation (etwa ein RFID²-Tag) der jeweilige Text oder Zusatzmaterial gebunden wird. Das physische Buch steht dabei in direktem Zusammenhang mit der angebundenen digitalen Information.

Tools

Tools sind physische Elemente, die nicht Information, sondern Funktionen repräsentieren. Die Anwendung von Tools hat dabei nicht unbedingt physische Auswirkungen, jene digitalen, virtuellen Objekte, auf die das Tool angewandt wird, werden aber entsprechend der Funktion des Tools manipuliert.

Beispiele für Tools sind physische Objekte, die zur Auswahl digitaler Objekte dienen oder Objekte wie Linsen, deren Anwendung zusätzliche Information zu anderen Containern oder Tokens abruft.

Zugriff auf und Interaktion mit Tokens und Containern

Der Zugriff auf die Information, die an ein Token oder einen Container gebunden ist, erfolgt über *Information Faucets* (also "Informations-Zapfhähne" oder "-Armaturen"). Diese Faucets sind aktive Komponenten (im Gegensatz zu Tokens und Containern, die im Allgemeinen passive Komponenten sind, also keine dedizierte Elektronik enthalten), deren Aufgabe darin besteht, aus Tokens oder Containern, die in deren Reichweite gelangen, die angebundene Information zu extrahieren und auszugeben. Faucets können auch dazu verwendet werden, den Zugriff auf Information einzuschränken. So kann die Ausgabe von Information an eine bestimmte Kombination von Tokens oder Containern gebunden werden oder von einem bestimmten Aufenthaltsort abhängig gemacht werden.

Die Anbindung von Information an ein Token oder einen Container kann ebenfalls eingeschränkt sein, bzw. ist im Fall von Tokens per Definition durch den notwendigen Zusammenhang zwischen physischem Element und Information eingeschränkt. Neben dieser konzeptuell notwendigen Einschränkung können auch weitere Regeln geprüft werden oder z.B. die Bindung zwischen Objekt und Information statisch (d.h. unveränderbar) gespeichert werden.

²Radio Frequency Identification

3.2.4. Tangible Objects Meaning

(Underkoffler und Ishii, 1999)

3.2.5. Das MCRpd Interaktions-Modell

(Ullmer und Ishii, 2000)

3.2.6. Degree of Coherence

(Koleva et al., 2003)

3.2.7. Tokens und Constraints nach Shaer et al.

(Shaer et al., 2004)

3.2.8. Einteilung nach Klemmer, Li, Lin und Landay

(Klemmer et al., 2004)

3.2.9. Taxonomie nach Fishkin

Fishkin (2004) versucht in seiner Arbeit, den Begriff des Tangible User Interfaces zu definieren und ein Kategorienschema zu schaffen, in das sich auf tangibler Interaktion beruhende Systeme einordnen lassen. Sein Ziel ist es, ein Framework zur Verfügung zu stellen, auf Basis dessen sich Systeme vergleichen lassen und das das Design von Tangible Interfaces unterstützen kann.

Fishkin fasst den Begriff des Tangible Interfaces sehr breit und definiert ein Interaktives System mit tangiblem Interface als eines, in dem die Eingabe über die Manipulation (im wörtlichen Sinn, also mit den Händen) von physischen Objekten vorgenommen wird und die Ausgabe die physische Natur eines Objektes verändert. Diese Definition umfasst auch Systeme mit "herkömmlichen" Interfaces.

Nach dieser umfassenden Definition strukturiert Fishkin den Raum möglicher Tangible Interfaces durch die Einführung zweier Analysedimensionen, anhand derer er seine Taxonomie aufspannt. Diese beiden Dimensionen sind "Embodiment" und "Metaphor". Sie sind orthogonal zueinander und hohe Wert dieser beiden Dimensionen bezeichnen "tangiblere" Systeme. "Hohe Tangibilität" ist jedoch kein Quali-

tätskriterium sondern lediglich eine Eigenschaft, die ein System für einen bestimmten Anwendungsfall besser oder schlechter geeignet machen kann.

Embodiment

Die Dimension "Embodiment" beschreibt, wie eng die Eingabe am Interface mit der Ausgabe gekoppelt ist. Das Kriterium zu Einordnung ist hier der Ort der Wahrnehmbarkeit des Systemzustandes und der Systemaktivität. Je kohärenter die Ausgabe- und Eingabe-Kanäle sind, je näher sich die Informationsausgabe also bei der Eingabe befindet, desto höher ist die Ausprägung dieser Dimension. Fishkin unterscheidet hier vier Ausprägungen:

Full Bei "full Embodiment" ist das Ausgabegerät gleichzeitig das Eingabegerät. Der Zustand des Geräts ist direkt in seinen physischen Eigenschaften abgebildet.

Nearby "Nearby Embodiment" tritt auf, wenn die Ausgabe nahe dem Eingabeobjekt auftritt und eng an dieses gebunden ist, also in direktem, unmittelbaren Zusammenhang steht.

Environmental "Environmental Embodiment" ist gegeben, wenn die Ausgabe im unmittelbaren Umfeld des auftritt aber sich nicht unmittelbar am tangiblen Eingabeobjekt manifestiert. Typische Vertreter dieser Ausprägung sind akustische Ausgabekanäle.

Distant Von "distant Embodiment" spricht man, wenn sich Ein- und Ausgabekanäle vollständig raumlich entkoppeln sind, der Fokus der Aufmerksamkeit der Benutzer also nicht gleichzeitig auf Ein- und Ausgabekanal liegen kann.

Metaphor

Die Dimension "Metaphor" bildet die Eigenschaft von Tangible Interfaces ab, auf eine Benutzerinteraktion so zu reagieren, wie die reale Welt auf eine entsprechende Aktion reagieren würde. Die Ausprägung in "Metaphor" ist also dann hoch, wenn das System analog zu realem, physikalisch begründbarem Verhalten reagiert. Hier sind grundsätzlich zwei Kategorien zu unterscheiden, in denen der Bezugspunkt der "Metaphor" verschieden ist. "Metaphor" kann sich entweder auf das Aussehen des jeweiligen Objektes beziehen oder auf die Bewegung des Objektes Bezug nehmen. Im ersten Fall spricht Fishkin von "Metaphor of Noun", im zweiten Fall von "Metaphor of Verb". Die Ausprägungen auf der "Metaphor"-Dimension gruppieren sich dann wie Folgt:

None Die Interface-Objekte zeigen weder in Form noch Funktion eine Analogie zur Realität

3. Grundlagen der Implementierung

Noun Diese Analogie ist gegeben, wenn am Interface Objekte existieren, die eine reale Entsprechung haben, aber nicht wie diese manipuliert werden können. Ein klassisches Beispiel aus traditionellen interaktiven Systemen ist die "Fenster"- oder "Schreibtisch"-Metapher (sind analog zu realen Fenstern bzw. Schreibtischen ausgelegt, bieten aber andere Interaktionsmöglichkeiten). Bei Tangible User Interfaces ist diese Zuordnung dann gegeben, wenn ein Eingabeobjekt so aussieht wie ein Objekt der realen Welt, aber keine weiteren Eigenschaften mit diesem teilt.

Verb Eine Zuordnung zu dieser Kategorie erfolgt, wenn die Interaktion mit einem Objekt eine reale Entsprechung hat, dieses jedoch selbst keine Analogie zur realen Welt bildet. Diese Ausprägung tritt bei TUIs³ unter anderem bei Gestensteuerung von Systemen auf.

Noun and Verb Hier hat das betreffende Objekt selbst eine Entsprechung in der realen Welt und auch dessen Verwendung ist analog zu jener der realen Entsprechung. Die Objekte sind dennoch nach wie vor unterschiedlich, das reale Objekt kann nicht im Tangible Interface eingesetzt werden, umgekehrt bietet das TUI-Objekt nicht die reale Funktionalität des realen Objektes.

Full In der höchsten Ausprägung existiert kein Unterschied zwischen TUI-Objekt und realem Objekt - es gibt keine Analogie mehr, weil die Objekte identisch sind. Dieser Zustand ist erreicht, wenn Benutzer das TUI-Objekt manipulieren und sich die reale Welt entsprechend verändert. Beispiele für Systeme auf dieser Stufe sind zum Beispiel digital augmentierte Whiteboards, wo mit elektronischen Markern auf eine Oberfläche "geschrieben" wird, wobei die hinterlassene "Tinte" simultan projiziert wird.

Anwendung der Taxonomie

Fishkin wendet seine Taxonomie auf die oben bereits beschriebenen Ansätze von (Holmquist et al., 1999) und (Underkoffler und Ishii, 1999) an und zeigt, dass sich diese einordnen lassen. Er ordnet nach einer umfassenden Literaturstudie außerdem über 60 konkrete Tangible Interfaces in seine Taxonomie ein und stellt diese anhand deren Ausprägungen gegenüber. Ein offener Punkt ist die Verbindung zum MCRpd-Framework (Ullmer und Ishii, 2000), dass Fishkin als komplementär bezeichnet und das auf einer anderen Abstraktionsstufe operiere.

3.2.10. Tokens und Constraints nach Ullmer et al.

(Ullmer et al., 2005)

³Tangible User Interfaces

3.2.11. Tangible Bits: Beyond Pixels

(Ishii, 2008)

3.2.12. Zusammenfassung

– Grafik mit den Zusammenhängen und Bezugnahmen zwischen den einzelnen Arbeiten –

Ansätze, die in der Folge zur Beurteilung des konkreten Systems herangezogen werden.

3.3. Tangible Interfaces in kooperativer Verwendung

(Hornecker, 2004)

3.4. Tabletop Interfaces

Grundlagen

3.4.1. Historische Entwicklung

Sensetable

Der Sensetable (Patten et al., 2001)

BUILD-IT

(Fjeld, 2001)

3.5. Tangible Interfaces zur Modellbildung

3.5.1. Aktuelle verwandte Ansätze

- Historische Entwicklung von Tabletop Interfaces

3. Grundlagen der Implementierung

- Senstable
- Morten Fjeld
- ReacTable
- Eva Hornecker
- Historische Entwicklung von Tangible Interfaces zur Modellbildung
 - Senstable Modeling Application
 - Designer's Outpost (Klemmer)
- Aktuelle verwandte Ansätze
 - Antle (TEI Mail-Pointer)
 - Sun (TEI Demo)

4. Eingabe und Interpretation

In diesem Kapitel wird jener Teil des Werkzeuges beschrieben, in dem die Interaktion der Benutzer mit dem Werkzeug erfasst und interpretiert wird. Der erste Abschnitt behandelt grundlegende Möglichkeiten zur Erfassung der Benutzerinteraktion auf tisch-basierten Benutzungsschnittstellen und endet mit der Identifikation der im konkreten Anwendungsfalls am besten geeignet erscheinenden Technologie. Diese wird durch die Beschreibung von dafür verfügbaren Frameworks konkretisiert, was letztendlich in der Entscheidung für ein konkretes Produkt mündet.

- Einordnungsgrafik (Kontext - Vorgelagerte und nachfolgende Kapitel)

Basierend auf dieser Entscheidung wird in den folgenden beiden Abschnitten auf das Design der Hard- und Softwarekomponenten eingegangen, die unmittelbar der Eingabe von Information durch Benutzer dienen. Der Ausgabeaspekt wird hier bewusst ausgeklammert und im nächsten Kapitel beschrieben. Dieses Kapitel endet mit einer Beschreibung der Interpretationsroutinen, die aus den durch das Framework gelieferten Rohdaten höherwertige, anwendungsspezifische Information extrahieren und diese den nachgeordneten Software-Modulen zur Verfügung stellen.

4.1. Möglichkeiten zur Erfassung von Benutzerinteraktion

Im Gegensatz zu Systemen mit dezidierten Eingabegeräten (wie Tastatur oder Maus) ist die Informationseingabe bei Tangible Interfaces unmittelbar an physische Tokens gebunden, die unabhängig voneinander und gegebenenfalls auch simultan manipuliert werden können. Diese Manipulation wird von einer vorhandenen Infrastruktur erfasst und im Sinne von Eingabedaten interpretiert. Der wesentliche Unterschied zu dezidierten Eingabegeräten besteht darin, dass die Manipulation des physischen Artefakts selbst für den Benutzer bedeutungstragend ist und nicht nur dem Zweck einer Zustandsänderung des digitalen Informationsraums dient. Dies impliziert, dass der Zustand der verwendeten Tokens bzw. der aktuelle Wert deren relevanten Parameter (z.B. Position, Rotation, Form, ...) erfasst werden kann, ohne die Bedeutung der Tokens noch deren Manipulierbarkeit in der realen Welt zu beeinflussen. Je nach Anwendungsfall kommen dafür mehrere unterschiedliche tech-

4. Eingabe und Interpretation

nologische Ansätze in Frage. Die Beurteilungskriterien die dabei zu berücksichtigen sind, liegen nicht nur in den zu erhebenden Parametern begründet sondern umfassen auch die notwendige Erfassungsrate des Zustandes der Tokens sowie die Anzahl der simultan zu erfassenden Tokens bzw. Eigenschaften.

Im konkreten System muss – wie in Kapitel XY beschrieben – die planare Position von mehreren Tokens in Echtzeit (d.h. mehrmals pro Sekunde mit für den Benutzer nicht wahrnehmbaren Verzögerungen) erfasst werden. Neben der Position ist noch die Rotation eines Tokens als Raumparameter von Interesse. Bezuglich des Zustands eines Tokens muss erfasst werden können, ob es geöffnet oder geschlossen ist und ob es eingebettete Objekte enthält oder nicht. Mit diesen Anforderungen wird in den folgenden Unterabschnitten ein technologischer Ansatz zur Umsetzung der Interaktionserkennung ausgewählt.

4.1.1. In Frage kommende technologische Ansätze

Bei der Auswahl möglicher technologischer Ansätze zur Erfassung der Benutzerinteraktion müssen die zu erfassenden Parameter unterschiedlich behandelt werden. Konkret werden hier Ansätze zur Erfassung der Raumparameter (Position, Rotation) und Ansätze die Zustandsänderungen des Tokens erfassbar machen unterschieden.

Raumparameter

Zur Erfassung von Raumparametern von Tokens bieten sich mehrere technologische Ansätze an. In Frage kommen für das konkrete – tisch-basierte System – nur Technologien, die eine Erfassung dieser Parameter mit einer Genauigkeit im Zentimeter bis Millimeter-Bereich ermöglichen, da eine niedrigere Raumauflösung zu zu großen Ungenauigkeiten in der Positionsbestimmung führen würden, die einen Einsatz für das hier vorgestellte Werkzeug nicht erlauben würden. Im Folgenden werden die in Frage kommenden Technologien in ihren Grundzügen beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung für das konkrete System bewertet.

Optisch Optische Positionsbestimmung erfolgt immer mit Hilfe von Kamera-Systemen und Methoden der digitalen Bildverarbeitung. Die Kamera erfasst dabei die zu identifizierenden Tokens, dass resultierende Bild wird mit in Software umgesetzten Algorithmen ausgewertet, wodurch zumindest Identität und Position, zumeist aber auch weitere Raumparameter (wie Rotation) aller im Kamerabild befindlichen Tokens ermittelt werden können. Die Erkennung ist dabei auf den Erfassungsbereich der Kamera beschränkt. Neben diesem Einflussfaktor bestimmen

zudem die Auflösung der Kamera sowie die Größe der Tokens die letztendlich erfassbare Fläche. Optische Systeme sind generell bei schlechten oder wechselnden Lichtverhältnissen eher fehleranfällig und nicht robust gegen Verdeckungen von Tokens (etwa durch Gliedmaßen oder andere Tokens).

Hinsichtlich des Identifikationsansatzes können zwei Arten von Systemen unterschieden werden. *Codebasierte* Systeme verwenden zur Identifikation eines Tokens einen von der Kamera erfassbaren Code (etwa einen „Barcode“), der eindeutig einem Token zugeordnet werden kann. *Featurebasierte* Systeme identifizieren ein Token aufgrund seiner äußereren Eigenschaften, zumeist über dessen Form (Schattenriss). Letztere bieten den Vorteil, dass ein Token nicht durch das Anbringen eines zusätzlichen Codes optisch verändert werden muss. Der größte Nachteil besteht in der Eigenschaft, dass nur Token mit unterschiedlichen Formen eindeutig identifiziert werden können. Die eindeutige Identifikation von mehreren Tokens einer Bauart ist bei featurebasierten Systemen nicht möglich. Codebasierte Systeme verwenden zumeist nicht herkömmliche Barcodes sondern robustere Systeme, bei denen eine Erkennung auch unter widrigen Beleuchtungsbedingungen oder niedrigen Bildauflösungen möglich ist und die zum Teil auch die Extraktion zusätzliche Information über weitere Raumparameter (wie Rotation, teilweise auch Parameter der dritten Dimension wie Neigung oder Entfernung) ermöglichen.

Codebasierte Systeme können hinsichtlich der Art der Codierung der Identitätsinformation wiederum in zwei Klassen unterschieden werden. Eine Gruppe von Ansätzen integriert die eigentliche Nutzinformation, also im Wesentlichen die tokenspezifische Identifikationsnummer, direkt in den Code und ermöglicht so ein direktes Auslesen der Information (z.B. bei QRCode (ISO JTC1/SC31, 2006)). Die zweite Gruppe verwendet eine indirekte Zuordnung zwischen Token-ID und Code. Bei derartigen Ansätzen muss die Identität eines Tokens in einem Zwischenschritt über eine Mapping-Tabelle abgebildet werden, im Gegenzug ist die Ausgestaltung des Codes flexibler, im Allgemeinen kann dabei eine höhere Robustheit bei der Erkennung erreicht werden (z.B. ARToolkit (Kato et al., 2000)).

Kapazitiv Kapazitive Ansätze basieren auf der Änderung der Kapazität von Leiterbahnen, die durch deren Berührung mit leitfähigem Material verursacht wird. Ursprünglich wurde die Technologie zur Umsetzung von berührungssensitiven Oberflächen entwickelt, kann jedoch auch zum Tracking von Tokens verwendet werden. Im Gegensatz zu druckempfindlichen Oberflächen (klassischen „Touchscreens“) ist keine Druckausübung zur Erkennung notwendig, es können außerdem auch mehrere Tokens (bzw. Finger) gleichzeitig erkannt werden.

Technologisch bedingt müssen bei kapazitiven Ansätzen alle zu identifizierenden Objekte die Oberfläche des Systems berühren. In dieser Oberfläche ist ein Metall-

4. Eingabe und Interpretation

gitter eingebettet, zwischen dessen Adern eine elektrische Kapazität gemessen werden kann. Diese Kapazität verändert sich, sobald diese Adern berührt werden (wobei die Token in einen entsprechend geeigneten Material ausgeführt sein müssen). Durch die lokale Änderung der Kapazität kann die Position einer Berührung festgestellt werden. Die Genauigkeit ist dabei durch die Rasterweite des Metallgitters eingeschränkt. Der größte Nachteil eines kapazitiven Ansatzes ist in diesem Kontext aber, dass die Identität einer Tokens nicht direkt festgestellt werden kann (die Kapazitätsänderung ist für alle Token identisch). Zudem ist die Extraktion weiterer Raumparameter (wie Rotation) nicht bzw. nur mit zusätzlichen Aufwand möglich. Die Vorteile von kapazitiven Systemen liegen in der hohen Robustheit der Erkennung auch bei widrigen Umgebungseinflüssen (Lichtverhältnisse, Schmutz) sowie der prinzipiell beliebig großen und beliebig geformten Oberfläche, die zur Erkennung verwendet werden kann.

Kapazitive Systeme eignen sich also zur Positionsbestimmung, nicht aber zur Identifikation von Tokens. Dies macht sie für den konkreten Anwendungsfall nur in Kombination mit einer anderen Technologie geeignet.

Elektromagnetisch Die Ausstattung von Tokens mit elektromagnetisch erfassbaren Einheiten (z.B. RFID-Chips) ermöglicht ebenfalls die Erfassung von Raumparametern. Vorrangig eignet sich diese Technologie jedoch zur Identifikation von Tokens, die Positionsbestimmung kann nur mit erheblichem technischen Aufwand durchgeführt werden.

RFID-Chips (als Beispiel für einen elektromagnetischen Ansatz) sind passive Bauteile, die bei Energieversorgung durch ein elektrisches Feld aktiv werden und ihrerseits eine eindeutige Identifikationsnummer senden (im einfachsten Fall, komplexere Varianten sind möglich, werden hier aber nicht betrachtet). Historisch stammt die Technologie aus der Logistik und Warenwirtschaft und dient der Identifikation von Gütern und nicht der exakten Positionsbestimmung. Diese ist somit auch nur mittels erweiterter Infrastruktur möglich. Zum Auslesen eines RFID-Chips wird ein Lesegerät mit Antenne benötigt. Aus der Feldstärke, mit der diese Antenne die Antwort des Chips empfängt, kann auf die Entfernung des Chips von der Antenne geschlossen werden. Durch Kreuzpeilung mit mindestens zwei Antennen, deren Position bekannt ist, kann somit auf die ungefähre Position des Chips (und damit des Tokens, in das dieser eingebaut ist) geschlossen werden. Durch den Einsatz von „Antennenarrays“ (matrixförmig angeordneten Antennen) mit geringer Reichweite ist so eine verhältnismäßig exakte (Größenordnung einige cm) Positionsbestimmung möglich. Die Feststellung der Ausrichtung eines Tokens (Rotation) ist auf diesem Wege allerdings nicht möglich. Die Identifikation eines Tokens ist jedoch unabhängig von Sichtkontakt und unmittelbarer Berührung und somit äußerst robust gegen Umgebungseinflüsse.

Elektromagnetische Systeme eignen sich wegen des hohen technischen Aufwandes bei gleichzeitig beschränkter Genauigkeit nur bedingt zur Feststellung von Raumparametern. Durch die Ausrichtung auf Extraktion der Identitätsinformation ist der Ansatz jedoch gut zur Kombination mit anderen Technologien wie kapazitiven Ansätzen geeignet, die ihre Stärken in der Bestimmung der Raumparameter haben.

Akustisch Akustische Ansätze zur Positionsbestimmung basieren im Generellen auf der Laufzeitmessung von Ultraschallwellen im Raum. Mit entsprechender Infrastruktur ist damit in einem begrenzten Bereich eine hochexakte Feststellung der Raumparameter in drei Dimensionen (Genauigkeit im mm-Bereich) sowie die Identifikation von Tokens möglich.

Ultraschallbasierte Techniken zur Positionsbestimmung basieren auf dem Einsatz von Bakensendern an bekannten Positionen. Diese Sender werden zumeist an der Zimmerdecke montiert und senden periodisch einen Ultraschallimpuls aus. Dieser Impuls wird von den Tokens (die in diesem Fall aktive Bauteile mit Stromversorgung sind) empfangen, die daraufhin einen sie identifizierenden Impuls zurücksenden. Aus der Laufzeit zwischen Absetzen des Sendeimpuls und Empfangen des Antwortimpulses bei verschiedenen Baken lässt sich so die Position des Tokens im Raum feststellen. Problematisch ist hierbei jedoch die durch den auf sequentieller Zeitmessung basierenden Ansatz beschränkte Anzahl von verfolgbaren Tokens, wenn Echtzeit-Ansprüche gestellt werden. Zudem ist der Ansatz nicht robust gegen (akustisch) verdeckte Tokens. Eine Anfälligkeit gegenüber anderen Störeinflüssen besteht nicht.

Für die Feststellung von Raumparametern sind ultraschall-basierte Systeme generell ausgezeichnet geeignet. Auch die Identifikation von Tokens ist prinzipiell möglich. Bei der Bewertung hinsichtlich des Einsatzes für tisch-basierte Systeme ist jedoch zu bedenken, dass eine drei-dimensionale Positionierung nicht zu den allgemeinen Anforderungen zählt und nur in speziellen Anwendungsfällen sinnvoll sein kann. Zudem kann die Notwendigkeit von stromversorgten Tokens einen Nachteil bzw. ein Hindernis beim Einsatz darstellen.

Bewertung Im konkreten Anwendungsfällen ist die Feststellung der Identität sowie der planaren Position und Rotation von mehreren Tokens in hoher Genauigkeit sowie in Echtzeit gefordert. Aus oben genannten Gründen sind kapazitive und elektromagnetische Systeme im Einzeleinsatz nur bedingt geeignet. Akustische Systeme erscheinen für den Anwendungsfällen als zu aufwändig und unflexibel und stoßen außerdem bei der Anzahl der simultan zu verfolgenden Tokens an ihre Grenzen.

Die Kombination von kapazitiven und elektromagnetischen Systemen ist grundsätzlich eine Möglichkeit, die in Betracht gezogen werden könnte. Auch optische

4. Eingabe und Interpretation

Systeme genügen den Anforderungen und kommen damit in Frage. Der kombinierte Ansatz ist im Vergleich mit optischen Systemen als robuster gegen Störeinflüsse aus der Umgebung zu betrachten. Für optische Systeme sprechen hingegen die weitaus geringeren Aufwände für Infrastruktur und Tokens sowohl bei Anschaffung als auch bei Wartung und Betrieb. Durch die geringere Komplexität des Systems sind auch weniger potentielle Fehlerquellen vorhanden, was bei der Erstellung des Werkzeug-Prototypen hilfreich ist. Aufgrund dieser Aspekte und einer vergleichbaren zur erwartenden Erkennungsleistung wurde für die hier vorgestellten Anwendungsfalls die Entscheidung getroffen, ein optisches System zur Bestimmung der Positionsparameter sowie der Identität der Tokens einzusetzen.

Tokenzustand

Hinsichtlich des Tokenzustands sind im Kontext des hier vorgestellten Anwendungsfalls Informationen zu erheben, die den Inhalt des Tokens betreffen. Wie in Kapitel XY beschrieben sind die Modellierungs-Tokens als Container ausgeführt, die geöffnet und geschlossen werden können und in die kleiner Tokens als Träger von Zusatzinformation hineingelegt werden können. Die Auswahl eines Ansatzes, der die Identifikation des Öffnungs-Zustandes eines Tokens sowie dessen Inhalt erlaubt, ist Gegenstand dieses Abschnitts. Dazu wird grundlegend zwischen dem Einsatz von passiven Tokens und aktiven Tokens unterschieden. Passive Tokens besitzen keine zusätzliche Elektronik, die geforderten Informationen können lediglich durch die bereits vorhandene (optische) Infrastruktur festgestellt werden. Aktive Tokens werden hingegen mit zusätzlicher Elektronik zur Zustandsbestimmung ausgestattet, was allerdings eine Energieversorgung jedes Tokens bedingt.

Passive Token Bei passiven Tokens muss sichergestellt werden, dass die bereits vorhandene Infrastruktur die Zustandsänderungen eines Tokens erfassen kann. Da die vorhandene Infrastruktur auf optischen Technologien basiert, müssen sich alle Zustandsänderungen im äußeren – durch die Kamera erfassbaren – Erscheinungsbild eines Tokens wieder spiegeln.

Der Öffnungszustand eines Tokens kann durch Kameras einfach erfasst werden, wenn sich – je nach eingesetzter Technologie – durch das Öffnen der Umriss des Tokens verändert oder ein weiterer Code sichtbar wird bzw. der bestehende Code modifiziert wird. Diese Anforderung kann also durch passive Tokens erfüllt werden.

Zur Erfassung des Inhalts eines Container-Tokens sind zwei Ansätze denkbar. Einseitig kann der Inhalt eines Tokens zu einem bestimmten Zeitpunkt erfasst werden, andererseits ist auch eine Erfassung der Änderung des Tokeninhalts möglich (Erfassung des Vorgangs von Hineinlegen und Herausnehmen). Diese beiden Mög-

lichkeiten sind hinsichtlich der Umsetzbarkeit mit passiven Token unterschiedlich zu beurteilen. Eine Erfassung des aktuellen Tokeninhalts ist mit optischen Systemen nur schwer möglich. Die einzige sich bietende Möglichkeit ist die von transparenten Teilbereichen der Außenfläche eines Tokens. Damit ist es grundsätzlich möglich, den Inhalt eines Tokens mit einer externen Kamera zu erfassen, sowohl bei feature- als auch code-basierten Ansätzen sind jedoch Verdeckungen, Verzerrungen oder zu geringe Kameraauflösung potentiell problematisch und lassen diesen Ansatz für den praktischen Einsatz als ungeeignet erscheinen.

Die Erfassung der Änderung des Tokeninhalts lässt sich mit optischen Systemen einfach implementieren. So kann der Vorgang des Hineinlegens als auch des Herausnehmens von einer Kamera erfasst werden. Die größte Herausforderung hierbei ist die Identifikation des Tokens, das eingebettet wird. Hier kann es wiederum durch Verdeckungen zu Erkennungsschwierigkeiten führen, was in diesem Fall einen permanent fehlerhaften Modellzustand zur Folge hat, der sich im Falle wiederholter Fehlerkennungen sogar inkrementell verschlimmern kann. Diesem Umstand kann lediglich durch eine explizite Aktion des Benutzers Rechnung getragen werden, der das betreffende einzubettende Token ins Sichtfeld der Kamera halten muss, bis das System Feedback über eine erfolgreiche Erkennung gibt. Diese Lösung erscheint allerdings hinsichtlich der Anforderung, die Technologie für den Benutzer vollkommen in den Hintergrund treten zu lassen, als eher suboptimal.

Aktive Token Aktive Tokens beinhalten zusätzliche Sensorik, die die Erfassung des Tokenzustands ermöglicht. Derartige Tokens benötigen allerdings eine Energieversorgung und müssen über eine Möglichkeit zur Datenübertragung verfügen, um den Tokenzustand an das System zu übermitteln. Weiters ist im Allgemeinen eine Steuereinheit notwendig, um die Sensoren zu kontrollieren, die Daten zu aggregieren und letztendlich zu übertagen.

Im konkreten Fall einer optisch arbeitenden Infrastruktur bietet sich eine (ggf. aufladbare) Batterie als Energiequelle an, um im Kamerabild Verdeckungen durch ansonsten eventuell zu verwendende Kabel zu vermeiden. Eine Stromversorgung über die Oberfläche (wie z.B. im Pin & Play System (Van Laerhoven et al., 2003) vorgestellt) scheidet hier aus, da die Blöcke dann mit Krafteinsetz auf die Oberfläche gesetzt werden müssten und nicht verschoben werden können.

Als Steuerungseinheit bietet sich neben selbst auf der Basis von Mikrocontrollern wie dem PIC oder 8051 (James, 1997) konzipierten Systemen auch Plattformen an, die explizit für den Anwendungszweck der Ansteuerung von Sensoren oder Aktuatoren und der Kommunikation mit einem Basissystem gefertigt werden. Exemplarisch kann hier die Smart-ITs-Plattform Gellersen et al. (2004) angeführt werden, die neben der flexiblen Ansteuerbarkeiten von unterschiedlichen Sensoren bereits

4. Eingabe und Interpretation

Module zur Vernetzung untereinander und mit zentralen Diensten in der Infrastruktur anbietet.

Aus den eben angeführten Gründen erscheint zur Datenübertragung eine drahtlos arbeitende Technologie am geeignetsten. Aufgrund der geringen benötigten Reichweite und der Anforderung, möglichst energieeffizient zu arbeiten, bieten sich die Technologien „Bluetooth“ (Bluetooth SIG, 2007) und „ZigBee“ (ZigBee Alliance, 2007) an. Bluetooth erreicht höhere Übertragungsraten, ist aber in der Anzahl der gleichzeitig verwendbaren Geräte (max. 7) für den hier vorgestellten Anwendungsfall zu beschränkt. Ein ZigBee-Netz kann mit bis zu 255 Geräten gleichzeitig arbeiten und ist außerdem im Einsatz energiesparender. Für den gegebenen Anwendungsfall erschien also ZigBee als geeignete Technologie (und wurde auch bereits in (Ferscha et al., 2008) in einem ähnlichen Anwendungsfall erfolgreich eingesetzt).

Zur Feststellung des Öffnungsstatus eines Container-Tokens bieten sich bei aktiven Sensortechnologien mehrere Möglichkeiten an. Der Einsatz eines Schaltelements, das beim Öffnen den Kontakt herstellt oder unterbricht, erscheint als eine nahe liegende Lösung. Auch der Einsatz eines Drehelements am Angelpunkt des Öffnungsschaniers, dessen elektrische Eigenschaften (z.B. Widerstand oder Kapazität) mit dem Öffnungswinkel ändern, kann angedacht werden. Damit ist nicht nur eine Unterscheidung zwischen „offen“ oder „geschlossen“ sondern auch die Identifikation von Zwischenzuständen möglich.

Der Inhalt eines Container-Tokens kann ebenfalls mit unterschiedlichen Technologien erfasst werden. Die Zielsetzung ist hier nicht der Positionsbestimmung der eingebetteten Tokens sondern lediglich die Feststellung derer Identität. Naheliegend ist hierzu der Einsatz von elektromagnetischen Ansätzen wie oben beschrieben. Durch das Anbringen von z.B. RFID-Chips an den einzubettenden Tokens sowie eines Lesegeräts im Container-Token kann die Identifikation robust durchgeführt werden. Alternativ bieten sich Systeme an, die auf Gewichtsmessung basieren. Über einen in das Containertoken eingebauten Sensor wird dabei das Gesamtgewicht der eingebetteten Tokens bestimmt. Bei entsprechender Konzeption der einzubettenden Tokens (unterschiedliche Gewichte) kann aus dem Gesamtgewicht auf die tatsächlich enthaltenen Tokens geschlossen werden. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist die beschränkte Anzahl von Tokens und die notwendige exakte Fertigung jedes einzelnen Tokens, da es bei Gewichtsabweichungen zu Fehlerkennungen kommt.

Bewertung Hinsichtlich der erreichbaren Flexibilität und zu erwartenden Servicequalität wäre in diesem Abschnitt eine Entscheidung zugunsten aktiver Tokens zu treffen. Im Gesamtkontext betrachtet und unter Berücksichtigung der Entscheidung für optische Systeme zur Bestimmung der Positionsparameter ist diese Wahl

jedoch zu relativieren. Wie oben beschrieben, erlaubt eine auf optischen Systemen beruhende Infrastruktur grundlegend die Umsetzung der geforderten Funktionalität. Gleichzeitig wird die Komplexität des Systems massiv reduziert und die Erstellung zusätzlicher Tokens vereinfacht (da keine zusätzliche Elektronik notwendig ist). Der Wegfall von Energieversorgung und Sensorlogik in den Token reduziert deren Gewicht und ermöglicht gleichzeitig mehr Platz für einzubettende Tokens.

Für den hier beschriebenen Anwendungsfalls bzw. die prototypische Umsetzung des Werkzeugs wird deshalb auf aktive Tokens verzichtet und der Einsatz von passiven Tokens bevorzugt. Der Mehraufwand in Erstellung und Wartung des Systems beim Einsatz aktiver Tokens wiegt in der Gesamtheit betrachtet die zu erwartende höhere Erkennungsqualität nicht auf.

4.1.2. In Frage kommende Frameworks

Unter Anbetracht der im vorherigen Abschnitt getroffenen grundlegender Technologieentscheidung zugunsten optischer Erkennungstechnologie mit passiven Tokens werden nun unterschiedliche Frameworks betrachtet, die die Umsetzung dieses Ansatzes erlauben. Es sind dabei zwei Klassen von Frameworks zu unterscheiden. *Generische Frameworks für Tangible Interfaces* beschäftigen sich generell mit dem zur Verfügung stellen von Services, die Kopplung von Sensoren und Aktuatoren mit Interpretations-Logik und letztendlich konkreten Applikationen erlauben. Sie gehen dabei nicht auf konkrete Sensortechnologie (wie die hier verwendeten optischen Ansätze) ein sondern versuchen eine Abstraktionsebene einzuführen, die die Applikationen von der konkreten Technologie entkoppelt und damit flexibler macht. *Frameworks für video-basierten Input für Tangible Interfaces* sind hochspezialisierte Produkte, die konkret für die Umsetzung von optischen Ansätzen zur Eingabe von Daten bei Tangible Interfaces entwickelt werden. Ihr Vorteil liegt im durch die Spezialisierung im Allgemeinen geringeren Aufwand zur Einrichtung und auch während des Betriebs. Echtzeit-Anforderungen sind oft nur mit spezialisierten Frameworks zu erfüllen. Eine Kombinationsmöglichkeit zwischen Produkten der beiden Kategorien ergibt sich beim Einsatz eines spezialisierten Frameworks als Eingabe-Modul für eine generische Framework. Durch diesen Ansatz kann die einfache Inbetriebnahme spezialisierter Frameworks mit der Flexibilität generischer Frameworks zusammengeführt werden.

Generische Frameworks

Generische Frameworks zur Behandlung von Input und Output bei Tangible Interfaces sind historisch nicht exakt von anderen Frameworks abzugrenzen, die im Umfeld des Ubiquitous bzw. Pervasive Computing (Weiser, 1991) entwickelt wurden.

4. Eingabe und Interpretation

Derartige Ansätze wurden erstmals im Zusammenhang mit „Context-aware Computing“ (Schilit et al., 1994) erwähnt, um Applikationen eine generische Möglichkeit zu bieten, Information aus der Umgebung über beliebige Sensoren zu erfassen und diese zu aggregieren und zu interpretieren. Aufbauend auf dieser Interpretation sollen Aussagen über den aktuellen Zustand der Umgebung (den „Kontext“) getroffen werden können, die diese Applikationen zur Adaption benutzen können. Der Rückkanal, also die Ansteuerung von Aktuatoren, wurde erst in späteren Entwicklungen berücksichtigt. Die meisten Systeme dienen explizit nicht der Erstellung von marktreifen Applikationen sondern widmen sich eher der Umsetzung von „Rapid Prototyping“-Ansätzen im Bereich der Tangible Interfaces. Begründet wird dies mit der oft suboptimalen Ressourcen-Ausnutzung, die mit der Generalisierung und Flexibilisierung des Frameworks einhergeht.

Die Aufzählung der hier beschriebenen Frameworks erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es wurde eher darauf geachtet, historische bzw. für den konkreten Anwendungsfall geeignete Ansätze aufzunehmen und in ihren wesentlichen Eigenschaften zu beschreiben.

Context Toolkit Das Context Toolkit (Dey et al., 2001) ist das historisch erste Framework, das versucht, die starre Verbindung zwischen Sensoren und Applikationslogik aufzubrechen und eine konfigurierbare Schicht einzuziehen, die eine schnellere, generischere Applikationsentwicklung ermöglicht und die Wiederverwendbarkeit einmal entwickelter Komponenten erhöht.

Konzeptuell existieren im Framework drei Arten von Komponenten: „Context Widgets“, „Context Interpreters“ und „Context Aggregators“. Context Widgets implementieren die Ansteuerung beliebiger Software- und Hardwaresensoren und sind für das Sammeln von Information über die Umgebung zuständig. Sie vermitteln zwischen der physischen Umgebung und den konzeptuell höher liegenden Komponenten indem sie die unverarbeiteten Kontextdaten mittels einer geeigneten Schnittstelle kapseln und bestimmte Funktionen zur ersten Auswertung der Rohdaten ausführen. Eine Anwendung kann diese Daten verwenden, ohne dass sie Detailkenntnisse über die zugrunde liegenden Sensortechnologien haben muss. Context Interpreter aggregieren die Sensordaten zu komplexeren Kontextinformationen d.h. sie konvertieren und interpretieren die Daten mehrerer Context Widgets und versuchen diese zu einheitlichen Clustern zusammenzufassen. Context Aggregators dient der Zusammenführung verschiedener Kontextinformationen die für bestimmte Anwendungen relevant sind. Context Aggregators bilden damit die Schnittstelle zu den eigentlichen Applikationen.

Das Context Toolkit bietet nicht nur eine Softwareschnittstelle zu physischen Sensoren, es trennt auch die Akquisition und Repräsentation von der Auslieferung der Daten an kontextsensitive Applikationen.

SiLiCon Context Framework Das SiLiCon Context Framework (Beer et al., 2003) ist ein Vertreter jener Klasse von Frameworks, deren Verhalten zur Laufzeit dynamisch konfigurierbar sind. Dies bedeutet im konkreten Fall, dass Applikationen die auf Basis des SiLiCon Context Framework erstellt wurden ihr Verhalten und ihren Aufbau aufgrund eintretender Ereignisse verändern können. Dies betrifft sowohl das Aktivieren und Deaktivieren von Input- und Output-Kanälen also auch die Interpretation der eingehenden Information und die Reaktion darauf. Das Framework wurde entworfen, um Szenarien zu beschreiben, in denen interaktive Systeme kontextsensitiv – d.h. abhängig vom aktuellen Zustand ihrer Umwelt – reagieren müssen.

Die grundlegenden Bausteine des SiLiCon Context Framework sind „Entitäten“, die Objekte der realen Welt konzeptuell abbilden. Diese „Entitäten“ besitzen „Attribute“, also Eigenschaften, mit Hilfe derer die Entität näher beschrieben wird. Über „Attribute“ kann die Wahrnehmung einer Entität von deren Umwelt sowie deren Interaktionsmöglichkeiten mit derselben beschrieben werden. Mit Hilfe von „ECA“-Regeln (Event-Condition-Action) wird beschrieben, auf welche Wahrnehmung der Umwelt (Event) eine Entität unter welchen Bedingungen (Condition, formuliert auf Basis des internen Zustands der Entität) mit welchen Aktivitäten (Action) reagiert. Diese Regeln können zur Laufzeit dynamisch verändert und nachgeladen werden. Außerdem ist es möglich, in „Actions“ das Nachladen von Entitäten oder das Hinzufügen oder Entfernen einzelner Attribute durchzuführen (Oppl, 2004, S. 90).

Das SiLiCon Context Framework abstrahiert durch seine konzeptionelle Struktur mit dem Einsatz von „Entitäten“ und „Attributen“ nicht so stark von der realen Welt wie der Context Toolkit Ansatz – die Abbildung ist im ersten Schritt „direkter“ und muss erst im zweiten Schritt technisch konkretisiert werden, ein klassischer Softwareengineeringprozess (im Sinne von „Analyse – Design – Implementierung“) wird damit vollständiger (auch in den ersten Phasen) durch das Framework abgebildet und unterstützt.

Papiermaché Papiermaché (Klemmer et al., 2004) ist eines der ersten Rapid Prototyping Frameworks, die dezidiert zur Entwicklung von Tangible Interfaces entworfen wurden. Es konzentriert sich auf die Anbindung von Inputtechnologien für passive Objekte (RFID oder optische Ansätze) und stellt Applikationen eine abstrahierte Sicht auf die reale Welt zur Verfügung (in Form einer Repräsentation der erfassten Objekte als „Phobs“ – Physical Objects –, die die für die jeweilige

4. Eingabe und Interpretation

Applikation relevanten Daten kapseln). Andere Eingabekanäle sind in der zur Verfügung stehenden Implementierung nicht vorgesehen – die Einordnung als generisches Framework ist aufgrund der übrigen Architektur trotzdem gerechtfertigt. Der Benachrichtigungsmechanismus erfolgt wie im Context Toolkit ereignisgesteuert – d.h. jede Änderung der erfassten Umgebung generiert ein Ereignis im Framework, das an die weiterverarbeitende Applikation weitergeleitet wird.

Im Sinne des Rapid Prototyping stellt Papiermaché als einziges hier betrachtetes Framework eine Art Entwicklungs- und Laufzeitumgebung für Tangible Interfaces zur Verfügung. Mittels dieser können Applikationsentwickler etwa Eingabekanäle auswählen und die Interpretation der Rohdaten konfigurieren. Die Umgebung macht die zugrundeliegende Hardware für den Entwickler dabei transparent, er muss sich also nicht um die Details der technischen Anbindung kümmern, ist dafür auf die bereits vorimplementierten Hardware-Schnittstellen beschränkt. Die Interpretation der Daten beschreibt der Entwickler in Source Code, der über definierte Schnittstellen in das Framework eingebunden wird. Über eine Monitoring-Interface kann die Arbeit des Frameworks zur Laufzeit beobachtet werden um so z.B. Fehlverhalten oder ineffiziente Konfigurationen aufzudecken.

Papiermaché versucht, mittels der Integration von vorgegebenen Eingabekanälen, die konfiguriert werden können, einen Teil der Komplexität bei der Entwicklung von Tangible Interface abzumildern. Der übrige konzeptuelle Aufbau ähnelt dem Context Toolkit – Interpretation der Daten und Verwendung in einer Applikation sind konzeptuell getrennt. Papiermaché ist in seiner Ausrichtung auf den Einsatz für Tangible Interfaces ausgelegt, die auf der Manipulation von einzelnen physischen Objekten und der Beziehungen zwischen diesen beruht. Es ist damit nicht so flexibel einsetzbar wie die anderen betrachteten Frameworks, erscheint aber für den hier vorgestellten Anwendungsfall grundsätzlich durchaus geeignet.

TUIpist Das TUIpist-Framework (Furtmüller, 2007) wurde im Zusammenhang mit der hier vorgestellten Arbeit entwickelt(Furtmüller und Oppl, 2007). TUIpist verfolgt einen ähnlich modularen Ansatz wie die anderen hier vorgestellten Frameworks, setzt jedoch zur Koordination der Module untereinander einen daten-zentrierten Ansatz – auf dem LINDA-Konzept (Carriero und Gelernter, 1989) beruhende Tuplespaces – ein. Die konzeptionelle Modulstruktur ist ähnlich der Aufteilung, die bereits von Dey et al. (2001) im Context Toolkit vorgeschlagen wurde.

Die grundlegenden Module, die im Framework verwendet werden, sind „Sensoren“, „Aggratoren“ und „Anwendungen / Aktuatoren“ (siehe Abbildung 4.1). „Sensor“-Module binden externe Datenquellen an das Framework an. Sie enthalten dazu eine sensor-spezifische Komponente, die die Schnittstelle zur jeweiligen Hard- bzw. Software bildet. Über diese Schnittstelle gelieferte Daten werden in einer zweiten

4.1. Möglichkeiten zur Erfassung von Benutzerinteraktion

Komponente vorverarbeitet und soweit abstrahiert, dass die Datenrepräsentation unabhängig von der die Daten liefernden Sensortechnologie ist (z.B. Abbildung von GPS¹-Koordinaten auf logische Positionsinformation, die auch aus anderen Quellen stammen könnte). „Aggregatoren“ fassen die Information mehrerer „Sensor“-Module zusammen und interpretieren ggf. einander ergänzende oder auch widersprechende Information. Sie werden immer aktiv, wenn neue Sensordaten zur Verfügung stehen und aktualisieren dabei die Information über den Gesamtzustand der den Framework bekannten Umwelt. „Anwendungen / Aktuatoren“ bilden letztendlich die Schnittstelle zu konkreten Applikationen, die ihr Verhalten an den aktuellen Umweltzustand anpassen bzw. diesen darstellen oder Aktuatoren, die basierend auf dem aktuellen Umweltzustand Aktionen in dieser setzen. „Anwendungen / Aktuatoren“ filtern dabei wieder den von „Aggregatoren“ gelieferten Gesamtzustand der bekannten Umwelt und liefern nur die für die Applikation relevanten Daten aus. Dabei kann erneut eine Nachverarbeitung der Daten, z.B. im Sinne einer Anpassung an eine externe Schnittstelle, erfolgen.

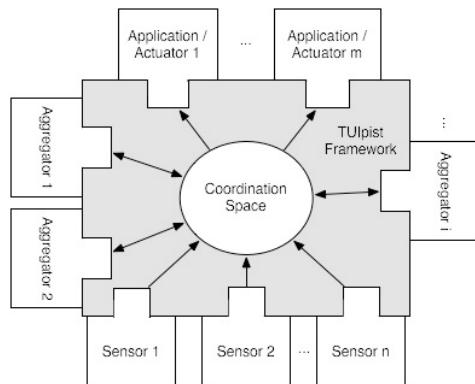


Abbildung 4.1.: Architektur des TUIpist-Framework (Furtmüller und Oppl, 2007)

Die Verbindung der Komponenten erfolgt wie erwähnt mittels einem datenzentrierten Ansatz. Eine wesentliche Eigenschaft dieses Ansatzes ist, dass keine explizite Verknüpfungen einzelner Module definiert werden. Die Zuordnung erfolgt vielmehr indirekt durch die Daten selbst. Jedes Modul kann Datensätze („Tuple“) in einem definierten Format generieren und in einen gemeinsam genutzten Datenraum – den Tuplespace – stellen. Andere Module können nun Anfragen an den Tuplespace stellen, ob Daten, deren Struktur oder Inhalt gewissen Kriterien entspricht, vorhanden sind. Ist dies der Fall, können diese Daten aus dem Tuplespace entnommen werden und nach erfolgter Verarbeitung in modifizierter Form wieder eingestellt werden (siehe Abbildung 4.2). Das Tuplespace-Konzept erlaubt auch eine dynamische

¹Global Positioning System

4. Eingabe und Interpretation

Erweiterung bzw. Veränderung sowohl der Ein- und Ausgabekanäle als auch der internen Datenverarbeitung zur Laufzeit, indem zusätzlich Module am Tupelspace registriert werden. Durch die lose Koppelung der Module muss keine zusätzliche Konfiguration an anderen Modulen oder am Tupelspace selbst vorgenommen werden.

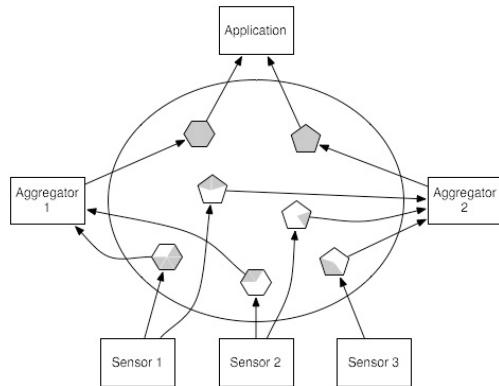


Abbildung 4.2.: Zusammenspiel der Komponenten in TUIpist (Furtmüller und Oppl, 2007)

Die Implementierung von TUIpist auf Basis des Java Jini-Frameworks (Arnold et al., 1999) ermöglicht eine Verteilung der einzelnen Module einer Applikation auf unterschiedliche Rechner (im Sinne eines „verteilten Systems“ (Stary, 1994)) ohne zusätzlich vom Implementierer zu leistenden Koordinationsaufwand. Es können damit auch (räumlich) entfernte Sensoren oder Webapplikationen angebunden werden und der ggf. auftretende Rechenaufwand zur Aggregation oder Interpretation von Daten auf mehrere Rechner verteilt werden.

Frameworks für video-basierten Input

Im Gegensatz zu den eben beschriebenen generischen Frameworks wurden die hier vorgestellten Frameworks explizit für die Behandlung von video-basiertem Input entwickelt. Wie oben bereits erwähnt stehen die beschriebenen Frameworks mit obigen insofern in Zusammenhang, also dass sie zumeist als Sensor-Komponente in generischen Ansätzen eingesetzt werden können. In ihrer grundlegenden Ausrichtung sind Sie jedoch für den unmittelbaren Einsatz in einer Endanwendung konzipiert.

Die hier vorgestellten Systeme implementieren den Ansatz des code-basierten optischen Trackings. Feature-basierte Ansätze kommen im konkreten Anwendungsfall nicht in Frage, da zur Modellierung eine Vielzahl von gleichartigen Objekten ein-

gesetzt wird, die sich in ihrem äußerem Erscheinungsbild nicht unterscheiden und damit in feature-basierten Ansätzen nicht eindeutig identifiziert werden können.

Wie bereits im letzten Abschnitt erhebt auch die hier angeführte Aufzählung keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Neben der Darstellung der historischen Entwicklung des Feldes und der Beschreibung von in Forschung und Praxis relevanten Ansätzen wurde bei der Auswahl vor allem auf freie Verwendbarkeit und Zugriff auf den Source-Code der Erkennungsroutine geachtet, da die Notwendigkeit applikationsspezifischer Anpassungen nicht auszuschließen war (etwa um benötigte aber nicht direkt unterstützte Parameter zu extrahieren).

AR Toolkit Das AR Toolkit („Augmented Reality Toolkit“) (Kato et al., 2000) ist historisch das erste in breitem Rahmen eingesetzte Framework zur optischen Identifikation von Elementen in der realen Welt. Das AR Toolkit verwendet zur Identifikation Marker, die selbst keine Information beinhalten und eine Mapping-Tabelle zur Verknüpfung mit digitaler Information verwenden. Die Marker des AR Toolkit (siehe Abbildung 4.3) werden durch Mustererkennung identifiziert und weisen bis auf den schwarzen Rahmen, der einen Marker begrenzt, keine verpflichtenden Elemente auf. Die Form der Marker ist also vorgegeben, ihr Inhalt kann frei gestaltet werden, zur Identifikation ist es aber notwendig, dass die zu erkennenden Marker im Vorhinein beim Framework registriert werden.



Abbildung 4.3.: AR Toolkit Marker (Quelle: www.hitl.washington.edu/ar toolkit/)

Das AR Toolkit ist auf die Verwendung in Anwendungen im Bereich der Augmented Reality ausgelegt und liefert die aus dem Bild extrahierte Information in einer Form, die eine Weiterverarbeitung mittels Frameworks aus dieser Domäne möglich macht. Konkret werden Raumparameter als Transformationsmatrizen ausgegeben, die eine direkte Umsetzung der Information in eine Darstellung mittels OpenGL ermöglichen. Die Anbindung von Kameras an das Framework wird über plattformspezifische Treiber realisiert, das AR Toolkit selbst empfängt einen Bildstrom, den es auswertet. Die Erkennungssoftware ist in C implementiert, bietet aber Wrapper für andere Programmiersprachen (unter anderem Java). Sie wird als Bibliothek in die eigentliche Applikation eingebunden.

4. Eingabe und Interpretation

Visual Codes Das Visual Codes System (Rohs, 2005) ist ein Vertreter der direkt codierenden Ansätze, d.h. dass die Nutzinformation ohne Zwischenschritt direkt aus dem Code extrahiert werden kann. Im Gegensatz zu den standardisierten und kommerziell genutzten Code-Formate QR-Code (ISO JTC1/SC31, 2006) oder Datamatrix (GSI, 2008), die eine Kapazität von bis zu einigen hundert Byte haben, bietet das Visual Code System lediglich 83 Bits an Nutzinformation an (siehe Abbildung 4.4), was dazu führt, dass in vielen Anwendungsfällen ein Mapping durch die Anwendung durchgeführt wird, um die zu verwaltende Information abbilden zu können.

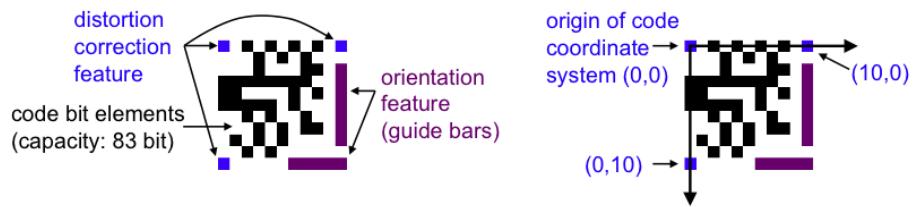


Abbildung 4.4.: Visual Codes – Aufbau und Features (übernommen von Rohs und Gfeller (2004))

Der Vorteil des Visual Code Systems liegt in seiner mächtigen Auswertbarkeit bei gleichzeitig geringem Bedarf an Rechenkapazität. In der Standardimplementierung werden neben der Position und der Rotation in der Ebene auch die Neigungsparameter im Raum extrahiert. Der Erkennungsalgorithmus läuft dabei in Echtzeit und kann unverändert sogar auf Java-fähigen Mobiltelefonen ausgeführt werden. Durch die relativ geringe Datendichte der Codes reichen dementsprechend auch verhältnismäßig niedrig auflösende Bilder (z.B. 320 x 240 Bildpunkte) für eine Erkennung aus. Wie alle anderen optischen Ansätzen leidet das Visual Code System unter Erkennungsproblemen bei wechselnden Lichtverhältnissen und insbesondere bei schlechtem Kontrast. Diese Verhalten kann in der vorliegenden Implementierung auch nicht durch Anpassung der Kameraparameter (Bildverstärkung o.ä.) korrigiert werden.

Das Visual Code System muss von auf ihm aufbauenden Applikationen direkt auf Source-Code-Ebene eingebunden werden, eine vorgegebene externe Schnittstelle existiert nicht. Anbindungs Routinen für Kameras existieren nur für Mobiltelefonen und müssen für andere Plattformen ggf. neu erstellt werden.

ReacTIVision ReacTIVision (Kaltenbrunner und Bencina, 2007) ist ein frei verfügbares Framework zu optischen Erkennung von Codes in Echtzeit. ReacTIVision arbeitet mit proprietären Codes (siehe Abbildung 4.5), in denen die Information nicht an bestimmte Positionen sondern im Wesentlichen in die Anzahl und

Schachtelung der Schwarz-Weiß-Übergänge codiert ist. Die Mächtigkeit der Informationscodierung direkt in den Code ist damit beschränkt, es wird deswegen ein Mapping-Ansatz verwendet, um die eigentliche Nutzinformation auf Codes abzubilden. Grundsätzlich wäre jedoch die direkte Codierung eine beschränkten Anzahl von Bits möglich, ist aber nicht unmittelbar vorgesehen.

Durch die Art der Informationscodierung ist die Erkennungsleistung von ReacTIVision auch unter schlechten Lichtbedingungen oder bei verzerrtem Eingangsbildern akzeptabel bis sehr gut. Die Form der Codes ist außerdem nicht vorgegeben, sie kann frei gewählt werden. Sogar händisch gezeichnete Codes können erkannt werden, da ausschließlich eine geschlossene Außenlinie und entsprechende Schwarz-Weiß-Übergänge innerhalb dieser Linie erfassbar sein müssen.



Abbildung 4.5.: ReacTIVision Code

Die ReacTIVision-Software ist plattformübergreifend für Windows, Linux und Mac OS X verfügbar. Sie greift über plattformspezifische Schnittstellen auf angeschlossene Kamera zu und wertet das empfangene Bild in Echtzeit aus. Dabei sind bei einer Kameraauflösung von 1024 x 68 Bildpunkten Bildraten von 15-20 Bildern pro Sekunde erreichbar. Diese Leistung wird auch durch eine höhere Anzahl von gleichzeitig im Bild vorhandenen Codes nicht merklich geringer.

Neben der Position der Codes wird auch deren aktuelle Rotation sowie die erste Ableitung dieser drei Parameter (also ein Maß für die Bewegung) extrahiert. Zudem können Finger, die die Oberfläche berühren erkannt und deren Position extrahiert werden. Dies ist auch für mehrere Finger möglich, wobei eine eindeutige Zuordnung über die Zeit erhalten bleibt und so rudimentäre Multitouch-Funktionen umgesetzt werden können.

Als problematisch stellt sich wie auch bei allen anderen betrachteten optischen Ansätzen die Abhängigkeit der Erkennungsqualität von der Umgebungsbeleuchtung bzw. deren Änderung dar. ReacTIVision arbeitet mit adaptiven Filteralgorithmen zur Aufbereitung des Bildes, was jedoch nur leichte Beleuchtungsschwankungen ausgleichen kann. Die Software kann händisch an die Beleuchtungsverhältnisse angepasst werden (Einstellung der Blendenöffnung und der Bildverstärkung), bei sich ändernden Lichtverhältnissen muss jedoch regelmäßig eine manuelle Nachführung der Parameter vorgenommen werden.

Die aus dem Bilderstrom gewonnenen Daten werden im Falle einer Änderung zu mindest eines Wertes über ein Netzwerkschnittstelle (UDP-basiert) in einem proprietären Protokoll zur Verfügung gestellt. Zu diesem Protokoll werden Schnittstellen und Referenzimplementierungen in unterschiedlichen Programmiersprachen, unter anderem C(++) und Java, zur Verfügung gestellt. Applikationen können diese Schnittstelle implementieren und werden sie mittels insgesamt sechs zu implementierenden Methoden an die Erkennungsroutinen angebunden (3 für Code- und 3 für Fingertracking).

4.1.3. Technologieentscheidung

Auf Basis der Anforderungen, die im Anwendungsfall an das Werkzeug gestellt werden, ist nun nach der grundsätzlichen Entscheidung für ein auf optischen Ansätzen basierenden System die Entscheidung für ein konkretes Framework zu treffen.

Vergleich der Frameworks für videobasierten Input

Für die Anbindung von videobasiertem Input wurde drei Frameworks vorgestellt. Diese Frameworks sind nun hinsichtlich mehrere Aspekte zu vergleichen, die sich aus den Anforderungen der zu erstellenden Applikation sowie der Forderung nach möglichst einfacher (im Sinne von weniger aufwendig) Einbindung des Frameworks ergeben. Im Einzelnen sind dies

- die Unterstützung bei der Einbindung von Kameras, eine Schnittstelle zur Programmiersprache Java,
- eine stabile und in Echtzeit ablaufende Bilderkennung,
- eine ausreichende Anzahl von Codes (Größenordnung 100),
- die Extraktion von Position und Rotationsinformation für Codes im Erfassungsbereich der Kamera,
- die Art der Kopplung von Framework und darauf aufbauender Applikation sowie
- die technische und lizenzierte Möglichkeit, die Frameworks an die eigenen Anforderungen anzupassen.

ReacTIVision bietet die umfassendste Unterstützung zur Einbindung unterschiedlicher Videoquellen und ist zur Anwendungsseite hin durch die Netzwerkschnittstelle am flexibelsten einsetzbar. Alle drei Ansätze bieten Schnittstellen bzw. Konnektoren für die Programmiersprache Java an. Die Frameworks selbst sind in C(++) oder Java erstellt und können auf den gängigen Plattformen (Windows, Linux, Mac

OS x) ausgeführt werden. Eine Verteilung der Applikation auf mehrere Rechner wird nur von ReacTIVision explizit unterstützt.

Hinsichtlich der eigentlichen Bilderkennungs-Routinen sind die Ansätze in ihrer Leistung und Geschwindigkeit vergleichbar, leiden aber alle unter der Abhängigkeit von der Umgebungsbeleuchtung. ReacTIVision bietet hier als einziger Ansatz die Möglichkeit, Kameraparameter zur Laufzeit nachzuführen und so Schwankungen der Umgebungshelligkeit auszugleichen.

Durch den eingesetzten Mapping-Ansatz sind AR Toolkit und ReacTIVision hinsichtlich Form und Inhalt der Codes flexibler als direkt codierende Ansätze wie Visual Codes. Dies ist im konkreten Anwendungsfall relevant, da aufgrund der Token-Form und deren beschränkter Größe eine ideale Platzausnutzung erfolgen muss, um ausreichende Erkennungsleistung zu gewährleisten.

Die Extraktion der Raumparameter (Neigungsinformation,...), die von AR Toolkit und Visual Codes ermöglicht wird, ist bei tisch-basierten Werkzeugen wie dem hier vorgestellten nicht notwendig – die Erhebung planarer Parameter (Position und Rotation) ist ausreichend. AR Toolkit liefert aufgrund seiner Ausrichtung auf Augmented Reality-Anwendung die Parameter in Form einer Transformationsmatrix, die für die Verarbeitung in 3D-Umgebungen wie OpenGL direkt geeignet ist, im hier verfolgten Ansatz jedoch einer zusätzlich Umrechnung auf die geforderten Parameter unterzogen werden müsste.

Die Anzahl der verfügbaren und zuverlässig unterscheidbaren Codes muss für die hier vorgeschlagene Anwendung in der Größenordnung 100 liegen. Visual Codes und ReacTIVision erfüllen diese Anforderung, AR Toolkit bietet im Lieferumfang weniger Codes an, diese können jedoch erweitert werden und bieten auch in der geforderten Anzahl noch ausreichend Unterscheidungsmerkmale für eine zuverlässige Unterscheidung (Wagner und Schmalstieg, 2003).

Das AR Toolkit und Visual Codes müssen direkt über eine Einbindung von Bibliotheken in die eigene Applikation integriert werden. ReacTIVision ist hier flexibler und wird über einen Netzwerkport mit der Zielapplikation verbunden. Dies kommt dem hier verfolgten Ansatz entgegen, da ein verteilter Betrieb aufgrund der hohen Rechenanforderungen oder im Betrieb mit mehreren Ausgabegeräten notwendig werden kann.

Von AR Toolkit und ReacTIVision steht der Source-Code zur Verfügung. Lizenzrechtlich erlauben das AR Toolkit und ReacTIVision explizit eine Veränderung des Sourcecodes unter der GNU Public Licence² bzw. der Lesser GNU Public Licence³. AR Toolkit verfolgt dabei einen Dual Licensing Ansatz, der einen kommerziellen

²<http://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html>

³<http://www.gnu.org/licenses/lGPL-3.0.html>

4. Eingabe und Interpretation

Einsatz kostenpflichtig macht. Zu Visual Codes sind keine Lizenzinformationen erhältlich, auch der Sourcecode steht nicht zum Download bereit.

Auf Basis der in Tabelle 4.1 angegeben Gegenüberstellung ist erkennbar, dass das ReacTIVision-Framework für den hier verfolgten Ansatz am besten geeignet erscheint. Betrachtet man die funktionalen Anforderungen, erscheinen zwar alle Frameworks grundsätzlich geeignet, die nicht-funktionalen Anforderungen – vor allem die plattform-übergreifende Einsetzbarkeit, die Möglichkeit zum verteilten Betrieb und die gute Unterstützung beliebiger Kameras sowie deren Konfigurierbarkeit – sprechen für die ReacTIVision-Plattform. Diese wird deshalb zur Umsetzung des Werkzeugs verwendet. Der zusätzliche Einsatz eines generischen Frameworks zur Flexibilisierung der Applikationsstruktur ist damit nach wie vor möglich und wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

Vergleich der generischen Frameworks

Der Einsatz eines generischen Frameworks ist im konkreten Anwendungsfall für die Modularisierung der Interpretations- und Output-Module denkbar. Eine weitere Anwendung von generischen Frameworks ist die Anforderung nach der Skalierbarkeit der Anzahl der Ausgabemodule ggf. auch während des Betriebs der Applikation (um z.B. weitere Viewer-Module zur Beobachtung des Modellierungsvorganges während der Laufzeit zuschalten zu können). Die Aspekte die beim Vergleich der vorgestellten Ansätze berücksichtigt werden müssen, sind deshalb

- die Unterstützung von modularen funktionalen Einheiten sowie
- die Möglichkeit diese zur Laufzeit zu laden und entfernen und
- die Konfigurierbarkeit der Verknüpfungen dieser Module.
- Daneben sind nicht-funktionale Anforderungen wie Skalierbarkeit,
- Effizienz bei der Weiterleitung und Verteilung der Anwendungsdaten und
- die Lizenzbestimmungen des Frameworks

zu berücksichtigen.

Die Modularisierung der Applikation wird von allen vier vorgestellten Frameworks unterstützt. Das Context Toolkit, Papiermaché und TUIpist unterscheiden dabei konzeptuell zwischen unterschiedlichen Arten von Modulen (im Wesentlichen „Input“, „Verarbeitung“ und „Output“), das SiLiCon Context Framework unterscheidet nicht zwischen unterschiedlichen Modultypen, dort wird die Rolle eines Moduls ausschließlich über seine Attribute (also die nach außen sichtbaren funktionalen Einheiten) definiert.

4.1. Möglichkeiten zur Erfassung von Benutzerinteraktion

	AR Toolkit	Visual Codes	ReacTIVision
Kamera-unterstützung	nativ auf allen unterstützten Plattformen (Interfaces & Features treiber-abhängig)	nativ nur für Mobiltelefone	nativ auf allen unterstützten Plattformen
Plattformen	Windows, Linux, Mac OS X	Java-basiert auf allen Plattformen	Windows, Linux, Mac OS X
Schnittstelle zu Java	via Dritt-Software	nativ	ja
Stabilität der Bilderkennung	abhängig von den verwendeten Markern	eher hoch	hoch
Kompensations-möglichkeit bei schlechten Lichtbedingungen	nein	nein	ja
Geschwindigkeit der Bilderken-nung	> 10 fps	> 10 fps	> 10 fps
Anzahl von gleichzeitig erkennbaren Codes	keine Einschrän-kung	keine Einschrän-kung	keine Einschrän-kung
Erkennung von Position	implizit	ja	ja
Erkennung von Rotation	implizit	ja	ja
Kopplung von Framework und Applikation	eng	eng	lose
Source-Code verfügbar	ja	nein	ja
Lizenz	GPL, alternativ kommerziell	unbekannt	GPL, LGPL

Tabelle 4.1.: Gegenüberstellung der Frameworks für video-basierten Input

4. Eingabe und Interpretation

Eine Erweiterbarkeit der Applikation zur Laufzeit ist nur beim SiLiCon Context Framework und bei TUIpist möglich. DAs SiLiCon Context Framework arbeitet hier mit eigens erstellten Java-Classloadern, die das Nachladen von Klassen (Modulen) und deren Integration in die Infrastruktur erlauben. TUIpist verwendet die inhärent dynamische Erweiterbarkeit des Java Jini Frameworks (Arnold et al., 1999), auf Basis dessen es implementiert wurde. Das Context Toolkit und Papiermaché erlauben kein Nachladen oder Entfernen funktionaler Einheiten während der Laufzeit.

Die Konfiguration der Verbindungen zwischen den Modulen ist bei allen Frameworks möglich, konzeptuell jedoch unterschiedlich ausgeführt. Im Context Toolkit und in Papiermaché muss die Verbindung direkt im Programmcode codiert werden und wird im wesentlichen auf Methodenaufrufe abgebildet. Das SiLiCon Context Framework verwendet ereignisbasierte Regeln, um Module zu verknüpfen. Ein von einem Modul ausgelöstes Ereignis kann hier (ggf. durch Bedingungen eingeschränkt) Aktionen in anderen Modulen auslösen. Eine Besonderheit dieses Ansatzes ist, dass Teile der Interpretationslogik (also der Erkennung von Benutzerinteraktion aus den Rohdaten) in die Regeln ausgelagert werden und damit jederzeit dynamisch verändert werden können. So kann zum Beispiel die Interpretation der Nähe zwischen zwei Token in einer Regel codiert werden und so in die Reihe der zulässigen (bzw. erkennbaren) Interaktionen aufgenommen werden. TUIpist benötigt hingegen keinerlei explizite Verbindung der Module, da sämtliche Koordination über den geteilten Datenraum ausgeführt wird. Die Verknüpfungslogik wird hier in die Module verschoben, die selbst wissen müssen, für welche Daten für sie ggf. relevant sind und welche sie deshalb dem Tuplespace entnehmen.

Hinsichtlich der Skalierbarkeit der Frameworks können aufgrund mangelnder Vergleichsdaten keine fundierten Aussagen getroffen werden. Hinzuweisen ist jedoch auf die Unterstützung von verteiltem Betrieb einer Applikation durch das SiLiCon Context Framework (via SOAP-Aufrufe (Curbera et al., 2002) und das TUIpist Framework (via Jini und Java RMI Downing (1998)). Durch diese Verteilbarkeit ist kann die Problematik mangelnder Rechenressource umgangen werden, die vor allem bei rechenintensiven Anwendungen wie der eingesetzten Bildanalyse im optischen Tracking auftritt.

Die Beurteilung der Effizienz der Frameworks ist hier in Hinblick auf die geforderte Echtzeit-Interaktion mit dem System als relevant zu erachten. Das Haupt-Kriterium für Effizienz ist dementsprechend die Verzögerung zwischen Eingabe-Ereignissen und dem Feedback auf Applikationsebene, die beim Einsatz der Frameworks auftritt. Eine Beurteilung in absoluten Zahlen kann hier mangels entsprechenden Datenquellen ebenfalls nicht erfolgen, konzeptuell sind aber bei den Frameworks, in denen Module direkt durch Programm-Code verknüpft werden (Context Toolkit und Papiermaché), eher geringe Verzögerungen zu erwarten. Die beiden

4.1. Möglichkeiten zur Erfassung von Benutzerinteraktion

Frameworks, die mit expliziter und konfigurierbarer Middleware zur Datenvermittlung arbeiten (SiLiCon Context Framework und TUIpist) lassen eher höhere Verzögerungen erwarten, wobei der ereignisbasierte Ansatz des SiLiCon Context Framework dem daten-basierten Ansatz von TUIpist insofern überlegen ist, als das bei der datenbasierten Interaktion die Module in regelmäßigen Intervallen nach neuen Daten suchen müssen (Polling, Information Pull-Ansatz), während bei ereignisbasierten Ansätzen die Benachrichtigung der betroffenen Module automatisch und zum Zeitpunkt des Auftretens des Ereignisses erfolgt (Information Push-Ansatz). Der Information Pull-Ansatz sorgt dabei einerseits für erhöhten Kommunikationsaufwand und potentiell für Verzögerungen bei Ereignissen, die innerhalb eines Polling-Intervalls auftreten.

	Context Toolkit	SiLiCon Context Framework	Papiermaché	TUIpist
Modularität	ja	ja	ja	ja
Erweiterbarkeit zur Laufzeit	nein	ja	nein	ja
dynamisch konfigurierbare Orchestrierung	nein	ja	nein	ja
Skalierbarkeit	schlecht	gut	schlecht	sehr gut
Effizienz bei der Weiterleitung von Daten	sehr gut	gut	sehr gut	ausreichend
Lizenz	unbekannt	unbekannt	Open-Source (nicht näher bestimmt)	Eigenentwicklung

Tabelle 4.2.: Gegenüberstellung der generischen Frameworks

Auf Basis der in Tabelle 4.2 angegebenen Gegenüberstellung erscheinen das SiLiCon Context Framework und TUIpist als die beiden geeignetsten Kandidaten für den Einsatz als generisches Framework im hier vorgestellten Anwendungsfall. Das Context Toolkit und Papiermaché scheiden aus verschiedenen Gründen, vor allem aber der mangelnden Flexibilität aus.

Stellt man die beiden verbleibenden Frameworks gegenüber, so sind hinsichtlich der funktionalen Anforderungen keine Vorteile für einen der beiden Kandidaten

4. Eingabe und Interpretation

zu identifizieren. Hinsichtlich der nichtfunktionalen Anforderungen scheint TUIpist hinsichtlich der Skalierbarkeit leichte Vorteile zu haben, da das Nachladen von neuen Instanzen weniger Aufwand versucht als im Fall des SiLiCon Context Framework (lediglich Laden eines Moduls im ersten Fall gegenüber Laden und Einbinden über eine Änderung der Regelbasis im zweiten Fall). Außerdem ist die technologische Basis der Verteilungsarchitektur in TUIpist konzeptionell auf höherer Ebene angesiedelt und mächtiger in der Verwaltung der Applikationsstruktur (unter anderem werden neue Module bei TUIpist automatisch in die Infrastruktur eingebunden, sobald sie angemeldet werden, im SiLiCon Context Framework muss für jeden Kommunikationskanal die IP-Adresse des Empfängers bekannt sein und in die Regelbasis aufgenommen werden).

Hinsichtlich der Effizienz der Kommunikation bietet das SiLiCon Context Framework gegenüber TUIpist aus den oben beschriebenen Gründen (Benachrichtigung über Änderungen gegenüber Polling) Vorteile. Für die hier beschriebene Applikation fällt die Entscheidung trotzdem zugunsten TUIpist. Neben der generell unaufwändigeren Konfigurierbarkeit kommt die Struktur von TUIpist einem iterativen Software-Entwicklungsprozess insofern eher entgegen, als dass die Modularisierung von initialen, monolithischen Prototypen (z.B. basierend auf der Struktur des zuvor ausgewählten ReacTIVision-Frameworks) einfacher möglich ist. Dies liegt darin begründet, dass in der modularen und dynamischen Struktur von TUIpist die gesamte Applikationslogik in den Modulen enthalten ist und so Teile aus einer monolithischen Applikation herausgelöst und direkt übernommen werden können, wobei lediglich die Logik der Datenübergabe von direkten Methoden-Aufrufen auf die TUIpist-Routinen zum Zugriff auf den Tuplespace umgearbeitet bzw. erweitert werden muss. Beim korrekten Einsatz des SiLiCon Context Framework wandert wie oben beschrieben ein Teil der Applikationslogik in die Regelbasis, was erhöhten Aufwand bei der iterativen Entwicklung verursacht und außerdem das Zusammenspiel der Applikations-Module unübersichtlicher und schwerer fassbar macht.

4.2. Konzeption und Umsetzung der Hardwarekomponenten

Basierend auf der oben getroffenen Technologieentscheidung zugunsten eines optischen, video-basierten Input-Systems für das hier zu erstellende Tabletop Interface wird in diesem Abschnitt das konkrete Hardware-Design beschrieben. Dies umfasst die Beschreibung des Tabletop Interfaces im Überblick und detaillierte Betrachtungen des Token-Designs sowie der Tisch-Oberfläche, die als Input-Kanal dient. Im weiteren werden spezifische Herausforderungen und der jeweilige hier verfolgte Lösungsansatz beschrieben. Nicht Gegenstand dieses Abschnitts sind jene Hardware-

4.2. Konzeption und Umsetzung der Hardwarekomponenten

Komponenten, die für die Ausgabe von Information eingesetzt werden. Obwohl hier im Überblick angeführt, werden sie detailliert erst in Kapitel XY über die Visualisierung der Modellierungsinformation beschrieben.

4.2.1. Überblick

Das Tabletop Interface ist als Tisch mit einer Oberfläche von 100 cm x 80 cm ausgeführt. Die Höhe beträgt 110 cm. Die wesentlichen Hardwarekomponenten sind die Tischoberfläche, die in semi-transparenten Acrylglass ausgeführt ist und die Bodenplatte, in die die Kamera zum optischen Tracking der Tokens auf der Oberfläche sowie der Videoprojektor zur Ausgabe von Information auf der Oberfläche (Projektion von unten) eingebaut sind (siehe Abbildung 4.6). Der Tisch ist auf allen Seitenflächen mit Platten aus expandiertem Polystyrol (Styropor) verkleidet, um im Inneren kontrollierte Umgebungslichtbedingungen für die Bilderfassung mit der Kamera zu schaffen. Die kontrollierten Bedingungen werden durch den Einsatz von vier Beleuchtungsmodulen gewährleistet, die ebenfalls in der Bodenplatte integriert sind und über den Seitenflächen eingebaute Streuscheiben für eine einheitliche, diffuse Beleuchtung der Tischinnenraums sowie der Oberfläche sorgen.

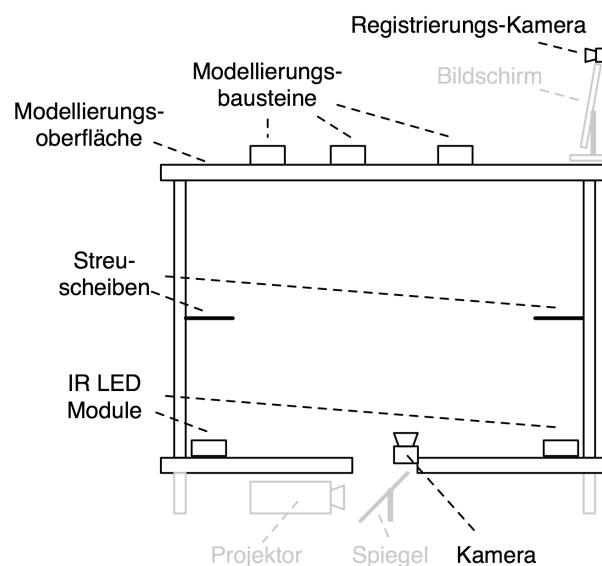


Abbildung 4.6.: Überblick über den Aufbau des Werkzeugs – Eingabekomponenten

Am Tisch befindet sich zusätzlich ein Bildschirm, auf dem entsprechend der Anforderungen zur Unterstützung der Modellierung Zusatzinformation ausgegeben wird. Eine zweite Kamera, die am Bildschirm sitzt und der unterstützenden Er-

4. Eingabe und Interpretation

fassung von Information dient (zum Beispiel der Registrierung von geschachtelten Token wie oben bereits beschrieben).

Das gesamte System ist so zerlegbar, dass es im Kofferraum eines Mittelklassewagens transportiert werden kann. Es werden dazu die Verkleidungsplatten und Tischbeine entfernt, die Tischplatte kann dann direkt auf die Bodenplatte gesetzt und verbunden werden. Das Volumen reduziert sich dabei auf 100 cm x 80 cm x 20 cm, wobei die Tischbeine, die Verkleidungsplatten und der Videoprojektor separat transportiert werden müssen. Ein Zusammenbau des Systems inklusive Kalibrierung der Eingabe- und Ausgabe-Kanäle ist in etwa 30 Minuten möglich.

4.2.2. Tokens und Input-Werkzeuge

In diesem Abschnitt werden die einzelnen durch die Benutzer manipulierbaren Token-Arten beschrieben. Neben den eigentlichen Modellierungstokens sind dies die Tokens zur Einbettung in Container sowie die Werkzeugtokens, von denen es Ausführungen zur Manipulation des Modells und Tokens zur Auslösung bzw. Kontrolle spezifischer Funktionalitäten gibt.

Modellierungs-Tokens

Die eingesetzten Modellierungs-Tokens sind aus nicht transparentem Acrylglas gefertigt. Ihre Außenmaße betragen in etwa (je nach Form) 10 cm x 6 cm in der Grundfläche und 4 cm in der Höhe. Damit ist einerseits eine ausreichende Größe zur Anbringung der ReacTIVision-Codes gewährleistet, andererseits sind noch klein genug, um in einer Hand gehalten und manipuliert werden zu können. Die Codes werden auf der Unterseite der Tokens angebracht und auch von unten erfasst (siehe nächster Abschnitt), um eine Verdeckung der Codes während der Manipulation zu verhindern (siehe Abbildung 4.7).

Die Modellierungs-Tokens wurden in drei Ausführungen gefertigt (siehe Abbildung 4.8). Diese unterscheiden sich in Form und Farbe und können während der Modellierung von den Benutzern frei mit Bedeutung belegt werden. Die Auswahl der Formen und Farben erfolgte inspiriert von den Symbolen gängiger Modellierungsnotationen in Abstimmung mit fertigungstechnischen Einschränkungen. Eine Untersuchung geeigneter Token-Formen und eine auf diesen Ergebnissen basierende Umsetzung wurde nicht vorgenommen. Die liegt vor allem in der Tatsache begründet, dass sich der Fokus der hier vorgestellten Arbeit im Entwicklungsprozess von einem Werkzeug zur Geschäftsprozessmodellierung (mit vorgegebener Notation) hin zu einem allgemeiner einsetzbaren Werkzeug zur generischen Modellierung konzeptueller Modelle (ohne vorgegebene Notation) entwickelte. Die Auswahl

4.2. Konzeption und Umsetzung der Hardwarekomponenten



Abbildung 4.7.: An Tokens angebrachte ReacTIVision-Codes zur Identifikation

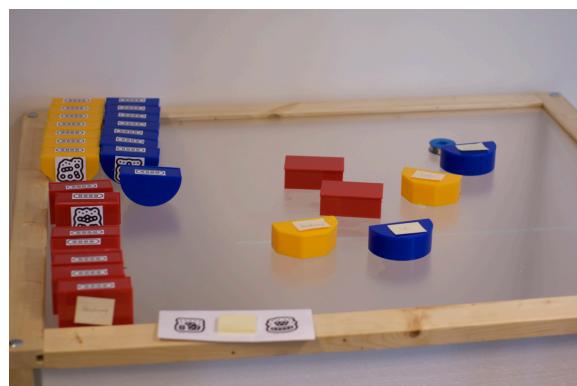


Abbildung 4.8.: Arten von Modellierungstokens

4. Eingabe und Interpretation

der Token-Formen fiel in die erste Phase, wodurch die Tokens im äußerem Erscheinungsbild an gängige Notationen zur Ablauf-Modellierung angelehnt sind. Die Auswirkung der Token-Form auf die Modellierung scheint aber bei Benutzern ohne Modellierungs-Vorbildung geringen bis keinen Einfluss auf den Modellierungsprozess zu haben (siehe Kapitel XY – Evaluierung).



Abbildung 4.9.: Rückwand von Container Tokens

Wie in der Beschreibung der Anforderungen gefordert und oben bereits beschrieben sind die Modellierungs-Tokens als Container ausgeführt. Im Abschnitt 4.1.1 über die Erkennung des Token-Zustands wurde beschrieben, das beim Einsatz von optischem Tracking eine Möglichkeit geschaffen werden muss, im Kamerabild zu erkennen, ob ein Token geöffnet ist oder nicht. Um den konsequenten Einsatz eines Erkennungsframeworks (ReacTIVision) zu gewährleisten, wird zu diesem Zweck ein zweiter Code eingesetzt (siehe Abbildung 4.9), der nur dann für die Kamera sichtbar wird, wenn das Token geöffnet ist. Hardwareseitig ist dies so umgesetzt, das die Modellierungstokens einen Öffnungsmechanismus besitzen, dessen Schanier nicht am Deckel sitzt (und damit nur diesen beweglich machen würde), sondern an der Bodenplatte, wodurch sich beim Öffnen eines Containers nicht nur der Deckel sondern auch die Hinterwand des Tokens bewegt (siehe Abbildung 4.10). Die Hinterwand kommt im geöffneten Zustand auf der Oberfläche des Tisches zu liegen, wodurch der auf ihr angebrachte zweite Code für die Kamera sichtbar wird. So kann durch das an sich zur Positionsbestimmung eingesetzte optische Trackingsystem zuverlässig auch den Öffnungs-Zustand der Tokens auf der Oberfläche erkennen.

Konzeptuell sind bei der Beschreibung der Verwendung dieser Tokens verschiedene Ebenen zu unterscheiden, die klar voneinander abgegrenzt werden müssen und in denen deshalb unterschiedliche Bezeichnungen verwendet werden. Diese Ebenen und die Beziehungen zwischen diesen sind in Abbildung 4.11 in Form einer einfachen Taxonomie dargestellt. Als „*Modellelement*“ wird jenes Konzept bezeichnet, das als Teil des eigentlichen Modells die darzustellenden Inhalte repräsentiert und



Abbildung 4.10.: Geöffnetes Container Token

semantisch Bedeutung trägt. Dieses Modellelement wird in Hardware durch das eben beschriebene „*Modellierungs-Token*“ beschrieben, das in Bezugnahme auf seine Eigenschaft, zusätzliche Information beinhalten zu können auch als „*Container-Token*“ bezeichnet werden kann. Das Modellierungs-Token trägt einen eindeutigen „(ReacTIVision-)Marker“, welcher wiederum einen eindeutigen „Code“ repräsentiert. Softwareseitig wird das Modellelement durch ein „*Objekt*“ (im objektorientierten Sinn, also die Instanz einer Klasse) repräsentiert, das ein Attribut enthält, in dem eine „ID“ abgelegt wird. Diese ID entspricht dem Code, der hardwareseitig durch den ReacTIVision-Marker repräsentiert wird und ermöglicht so eine eindeutige Zuordnung zwischen Hardware- und Softwarerepräsentation eines Modellelements.

Einbettbare Tokens

Die einbettbaren Token erlauben wie in Kapitel XY beschrieben die Verschachtelung von Modellen und das Hinzufügen von Zusatzinformation. Sie werden in einem definierten Interaktionsvorgang an Information gebunden und dann in einen Container gelegt. Hinsichtlich des Hardware-Designs sind folgende Anforderungen zu beachten:

- Die Token müssen klein genug sein, um auch mehrere Einheiten in einem Container unterzubringen.
- Sie müssen gleichzeitig groß genug sein, um einen ReacTIVision-Code zur eindeutigen Information anzubringen.
- Sie müssen so ausgeführt sein, dass haptisch oder akustisch erkennbar ist, ob in einem geschlossenen Container Tokens eingebettet sind oder nicht (z.B. durch Gewicht oder Geräusche beim Schütteln eines Containers).

4. Eingabe und Interpretation

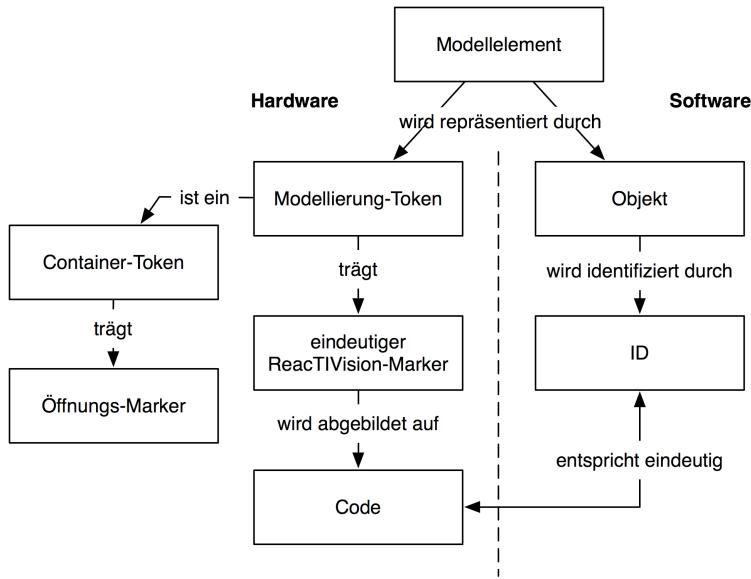


Abbildung 4.11.: Modellelemente – Taxonomie

Die einbettbaren Tokens wurden aus flexiblen Kunststoffmatten gefertigt und mit einem Metallstück versehen (siehe Abbildung 4.12), das einerseits als Griff dient und andererseits sowohl das Gewicht erhöht und akustisches Feedback beim Schütteln eines Container-Tokens verursacht. Die einbettbaren Tokens wurden exemplarisch in drei Ausführungen gefertigt, je nach Art und Anzahl der einzubettenden Information kann eine Definition weiterer Tokens sinnvoll sein. Folgende Tokens wurden für den aktuellen Entwicklungsstand des Werkzeugs angefertigt:

- Einbettung von Teilmodellen (inhärente Kernfunktionalität des Werkzeugs)
- Einbettung von digitalen Ressourcen bzw. Dateien am lokalen Rechner (Erweiterung zur Verknüpfung des Modells mit den realen digitalen Ressourcen aus dem Arbeitskontext)
- Einbettung von Fotos (Erweiterung zur Verknüpfung des Modells mit dem realen Arbeitskontext, z.B. mittels Fotos von Arbeitsmitteln oder Personen)

Alle Tokens sind auf der Unterseite mit einem ReacTIVision-Code versehen, der sie eindeutig identifiziert (siehe Abbildung 4.12). Aufgrund der beschränkten Größe der Tokens ist dieser Code von der Kamera, die die Tischoberfläche erfasst, nur in der Mitte der Oberfläche erfassbar (da dort die geringsten Linsen-Verzerrungen auftreten und der Code somit gerade noch erkannt werden kann). Um etwaige Bedienungsprobleme zu vermeiden, wurde die deshalb die Interaktion mit einbettbaren Tokens (Registrierung, Binden von Information) auf die in Abbildung 4.6 dargestellte zweite Kamera (“Registrierungs-Kamera”) verlegt, die durch die physische



Abbildung 4.12.: Einbettbare Tokens

Nähe zu den Modellierenden die Codes der einbettbaren Tokens problemlos erfassen kann.

Werkzeug Tokens

Neben den Tokens, die Modellierungsinhalt repräsentieren, wurden auch Tokens angefertigt, der Interaktion mit dem System ansich und der Steuerung der Modellierungsablaufs dienen. Hier sind zwei Arten zu unterscheiden: einerseits gibt es Werkzeuge, die der Manipulation des Modells dienen (z.B. Herstellung von Verbindungen zwischen Tokens, Benennung von Tokens) und andererseits solche, die der Steuerung von modellierungsunterstützender Zusatzfunktionalität dienen (etwa Tokens, die die Rückverfolgung der Modellierungshistorie kontrollieren). Außerdem sind orthogonal zu dieser Klassifizierung noch Tokens zu unterscheiden, die beim Einsatz ein Ereignis auslösen und solche, die die für einen Zustandswechsel des Systems sorgen, solange sie im Einsatz sind (gleich einem Schalter). Im Folgenden werden die einzelnen Werkzeuge beschrieben und den eben definierten Kategorien zugeordnet.

Manipulation des Modells Die bei der Verwendung des Systems wichtigsten Werkzeug-Tokens sind jene, die zur Benennung und Verbindung von Modellierung-Tokens verwendet werden. Sie sind als auf die Oberfläche aufsetzbare Stäbe konzipiert, die unten eine Standfläche aufweisen, welche auch den Code aufnimmt. Am oberen Ende ist eine Verbreiterung angebracht, die eine stabile Handhabung gewährleistet (siehe Abbildung 4.13). Bedingt durch die kleine Standfläche kann nur der einfachste ReacTIVision-Code verwendet werden, der lediglich aus einem schwarzen Ring besteht. Das ReacTIVision-System erkennt diesen Ring nicht als regulären Code sondern als „Cursor“, also als Zeiger, der ausschließlich eine Position in der Ebene besitzt, aber keine Rotation aufweist. Für die Verwendung zur Markie-

4. Eingabe und Interpretation

rung von Modellierungs-Tokens zum Zwecke der Benennung oder Verbindung ist dies auch nicht notwendig.



Abbildung 4.13.: Markierung-Token

Das Modellierungswerkzeug muss zwischen unterschiedlichen Arten von Verbindungen unterscheiden können, da diese bei der vorgestellten Art der Externalisierung zum Einsatz kommen können. Im Wesentlichen ist zwischen ungerichteten und gerichteten Verbindern zu unterscheiden. Im Gegensatz zu ungerichteten Verbindern weisen gerichtete Verbinder Pfeilspitzen an einem Ende oder an beiden Enden auf, die von den Modellierenden zusätzlich mit Bedeutung belegt werden können. Für die Werkzeug-Tokens bedeutet dies, dass neben den bereits beschriebenen, einfachen Markierungs-Tokens auch solche zum Einsatz kommen, die anstatt einer runden Grundfläche eine größere, dreieckige Grundfläche aufweisen, die eine Pfeilspitze symbolisiert (siehe Abbildung 4.13). Technisch werden die beiden Arten von Markierungs-Tokens durch einen zweiten Cursor-Code unterschieden, der an Tokens mit dreieckiger Grundfläche zusätzlich angebracht ist.

Die Markierungs-Tokens sind der Kategorie der ein Ereignis auslösenden Tokens zuzuordnen. Dies bedeutet, dass das System zu jenem Zeitpunkt eine Aktion setzt, zudem das Token auf der Oberfläche aufgesetzt und erkannt wird. Wird ein Markierungs-Token auf der Oberfläche belassen, verursacht es keine weiteren Aktionen bis es entfernt und erneut aufgesetzt wird.

Dem hingegen ist das zweite hier behandelte Token der Kategorie der den Systemzustand beeinflussenden Tokens zuzuordnen. Es hat also solange Auswirkungen auf den Modellierungsablauf, solange es auf der Oberfläche belassen wird. Die konkrete Funktionalität dieses zweiten Tokens ist der Wechsel in jenen Werkzeugmodus, der ein explizites Entfernen bzw. Löschen von Bestandteilen des Modells, insbesondere Verbindungen, erlaubt. Das Token ist als Radiergummi ausgeführt und codiert so die Metapher des expliziten Herausnehmens von Information aus dem Modell

4.2. Konzeption und Umsetzung der Hardwarekomponenten

(siehe Abbildung 4.14). An der Unterseite des Tokens ist eine ReacTIVision-Code angebracht um es gegenüber dem System eindeutig zu identifizieren.



Abbildung 4.14.: Lösch-Token

Der Einsatz der Radierer-Tokens verändert im System im Wesentlichen die Interpretation des Markierungs-Tokens, die nun anstatt der Herstellung einer Verbindung das Löschen derselben auslösen. Der detaillierte zugehörige Interaktionsablauf ist in Abschnitt 4.3.4 dargelegt.

Ein weiteres Werkzeug im Kontext der Manipulation des Modells ist das Registrierungstoken für die Benennung von Blöcken mittels handgeschriebenen Haftnotizen. Wie in Abschnitt 4.3.2 im Detail ausgeführt, gibt es zwei Modalitäten um ein Modellierungs-Token zu benennen. Einerseits kann der herkömmlich Eingabeweg über die Tastatur gewählt werden, andererseits ist es möglich, die Modellierungs-Tokens mittels aufgeklebten Haftnotizen zu benennen. Um die handgeschriebene Information in die digitale Information übernehmen zu können, wird diese mittels Bildanalyse-Verfahren aus einem Bild extrahiert, das von der oben bereits erwähnten Registrierungskamera (siehe Abbildung 4.6) aufgenommen wird. Die Aufnahme wird durch das erwähnte Registrierungstoken ausgelöst. Dieses fungiert gleichzeitig als Halter für die noch unbeschrifteten Haftnotizen und weist am linken und rechten Rand jeweils einen ReacTIVision-Code auf (siehe Abbildung 4.15). Diese beiden Codes erlauben es, im Bild die Position der Haftnotiz und damit der zu extrahierenden Information zu identifizieren.

Das Registrierungstoken ist in die Kategorie der ein Ereignis auslösende Tokens einzurordnen. Seine Verwendung erwies sich im praktischen Einsatz als wenig intuitiv und technisch instabil bzw. zu langsam, so dass wie erwähnt als alternativer Eingabeweg zusätzlich eine Tastatur ins System aufgenommen wurde. Die Interaktionsabläufe sind in beiden Fällen ähnlich und werden im Detail in Abschnitt 4.3.2 dargestellt.

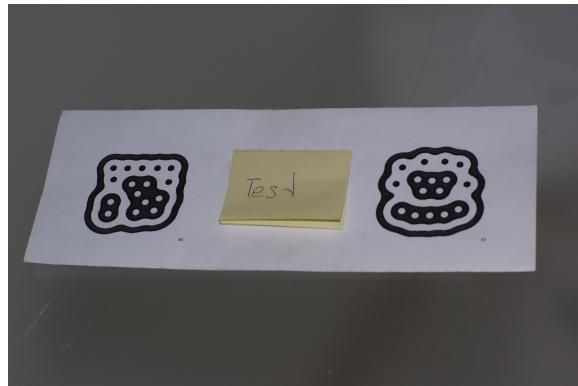


Abbildung 4.15.: Registrierungstoken

Steuerung von Unterstützungsfunktionen Im Werkzeug wurden entsprechend den Anforderungen auf Kapitel XY eine den Modellierungsablauf unterstützende Funktionen implementiert. Diese werden über dedizierte Werkzeug-Tokens kontrolliert. Der Kernbereich dieser Art von Tokens ist die Steuerung aller Funktionen, die im Kontext der Verfolgbarkeit der Modellierungs-Historie umgesetzt wurden.

Das Snapshot-Token dient der durch die Benutzer ausgelösten Speicherung des aktuellen Systemzustandes. Wie in Kapitel XY beschrieben, verfolgt das System den Modellierungsablauf und speichert selbsttätig stabile Systemzustände (zur Identifikation dieser Zustände siehe Abschnitt 4.3). Zusätzlich können Benutzer mit eben dem hier beschriebenen Token die explizite Aufnahme des aktuellen Modellzustandes veranlassen, wenn er ihnen wesentlich erscheint. Das Token ist als ereignisauslösendes Element konzipiert und wird durch kurzes Aufsetzen des Tokens auf die Modellierungsoberfläche aktiviert. Physisch ist es als prototypisch als großes rotes Quadrat ausgeführt, an dessen Oberseite ein Griffstück angebracht ist (siehe Abbildung 4.16). Auf der Unterseite sitzt wiederum ein ReacTIVision-Code zur Identifikation des Tokens.

Neben der Speicherung von Modellzuständen können diese auch wieder abgerufen und in ihrer zeitlichen Sequenz dargestellt werden. Zur Aktivierung des Historien-Modus und zur Navigation in der Zeitlinie wurde ein weiteres Token eingeführt, das als einziges sowohl der zustandsverändernden als auch der ereignisauslösenden Token-Kategorie zuzuordnen ist. Zustandsverändernd wirkt das Token insofern, als dass das Aufsetzen auf die Oberfläche das System in den Historienmodus schaltet und ein Entfernen wiederum die aktuelle Modell-Ansicht wieder herstellt. Durch Rotation des Token im bzw. gegen den Uhrzeigersinn kann nun durch die in ihrer zeitlichen Abfolge angeordneten gespeicherten Modellzustände navigiert werden. Die Rotation löst dabei jeweils nach einem bestimmten zurückgelegten Drehwinkel

4.2. Konzeption und Umsetzung der Hardwarekomponenten

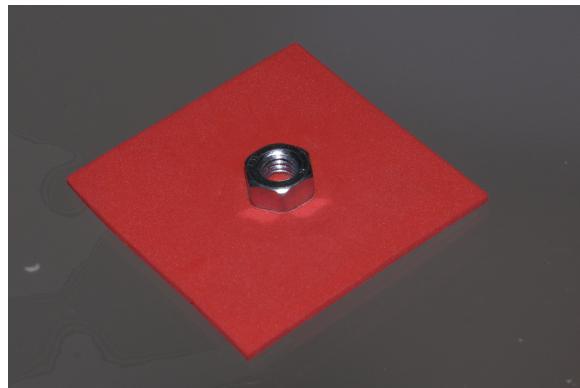


Abbildung 4.16.: Snapshot-Token

ein Ereignis aus, das den entsprechend vorhergehenden bzw. nachfolgenden Systemzustand abruft. Um die Rotation möglichst natürlich handhabbar zu machen, ist das Token mit runder Grundfläche etwa mit Faustdurchmesser ausgeführt (siehe Abbildung 4.17). Auf der Unterseite der Grundfläche ist wiederum der ReacTIVision-Code angebracht.

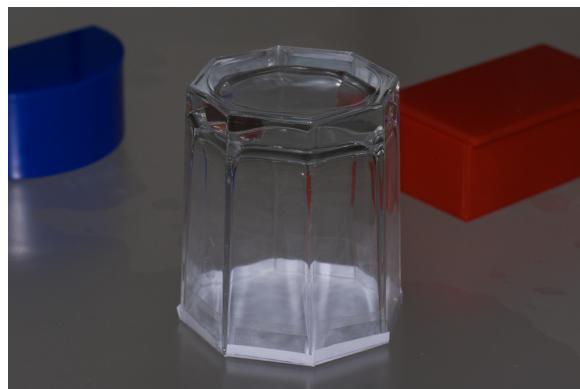


Abbildung 4.17.: History-Token

Das letzte hier behandelte Token zur Steuerung einer Unterstützungsfunction ist jenes, dass die in Kapitel XY als Anforderung definierte und in Kapitel XY im Detail beschriebene Wiederherstellungsunterstützung auslöst. Die Verwendung dieses Tokens ist identisch mit jener des oben beschriebenen Snapshot-Tokens. Wie dieses ist es der ereignisauslösenden Kategorie zuzuordnen und aktiviert die Wiederherstellungsunterstützung wenn es bei aktivem Historien-Modus auf der Modellierungsoberfläche aufgesetzt wird. Die eigentliche Wiederherstellungsunterstützung ist dem Output-Kanal zuzuordnen und in ihrem Ablauf deshalb im Detail in Kapitel XY (Abschnitt XY) beschrieben.

4.2.3. Input auf der Tischoberfläche

Nachdem nun die Tokens beschrieben wurden, die den Benutzern unmittelbar zur Interaktion mit dem System dienen, liegt der Fokus dieses Abschnitts nun auf der technischen Umsetzung der Erfassung der aktuell auf der Oberfläche sichtbaren ReacTIVision-Codes und damit Tokens.

Wie bereits oben beschrieben, wurde bei der Umsetzung des optischen Tracking-Ansatzes eine Identifikation der Codes von der Unterseite gewählt, um etwaigen Erkennungsproblemen mit Verdeckungen vorzubeugen. Dies bedingt, dass die Modellierungsoberfläche für Kameras möglichst unsichtbar sein muss und den Identifikationsvorgang nicht negativ beeinflussen soll. Grundsätzlich bietet sich dazu der Einsatz einer (Acryl-)Glasplatte an, die keinen Einfluss auf die Erfassung der auf ihr platzierten Codes hat. Der Einsatz einer (Acryl-)Glasplatte bringt jedoch zwei Probleme mit sich. Einerseits kann die Verwendung einer transparenten Oberfläche dazu führen, dass Modellierende durch den Einblick auf den inneren Aufbau des Systems von der Aufgabe abgelenkt bzw. irritiert werden. Andererseits verhindert eine transparente Oberfläche den Einsatz dieser als Rückkanal zur Darstellung von zusätzlicher Information durch einen Videoprojektor. Dies ist im konkreten Fall besonders schwerwiegend, da die generischen Modellierungs-Tokens erst durch die Projektion der zusätzlichen Information explizit bedeutungstragend werden. Deswegen wurde eine semi-transparente Acrylglass-Oberfläche eingesetzt, die einerseits für die Erfassung der Codes ausreichend durchlässig ist, andererseits aber auch das projizierte Licht soweit bricht, dass die darzustellende Information auf der Oberfläche sichtbar ist.

Die Kamera – eine AVT Guppy Fo8oB (Allied Vision Technologies GmbH, 2008) – sitzt wie in Abbildung 4.6 schematisch dargestellt in der Mitte der Bodenplatte. Sie ist mit einem Weitwinkel-Objektiv ausgestattet, das es erlaubt, die gesamte Oberfläche zu erfassen, ohne dass der Tisch höher als 100 cm sein muss (Öffnungswinkel etwa 45°). Die Kamera hat eine native Auflösung von 1024 x 768 Bildpunkten und ist über eine Firewire-Schnittstelle (IEEE 1394 (Bloks, 1996)) mit dem Rechner verbunden. Die Kamera kann so bis zu 30 Bilder pro Sekunde an den Rechner senden. Das Weitwinkelobjektiv verursacht Verzerrungen in den Randbereichen, was trotz der Möglichkeit von ReacTIVision, das Bild softwareseitig zu entzerren, dazu führt, dass links und rechts etwa 10 cm der Tischoberfläche nicht zur Identifikation von Codes verwendet werden können. Dieser Problematik kann aufgrund der beschränkten Kameraauflösung nur durch größere Codes begegnet werden, was durch die beschränkte Größe der Tokens nicht möglich ist. Im Prototypen wurden deshalb die Randbereiche des Systems ausgespart und können zur Ablage von aktuell nicht eingesetzten Tokens verwendet werden.

Illumination und Umgebungslichtabhängigkeit

Optische Tracking-Systeme leiden generell unter ihrer Abhängigkeit von den Umgebungslichtbedingungen. Probleme, die in diesem Zusammenhang auftreten, hängen nicht nur mit der absoluten Stärke der Einstrahlung von Umgebungslicht zusammen (die zu schwach, aber auch zu stark sein kann), sondern auch mit der Änderung der Lichtbedingungen über die Zeit. Gegenstand dieses Abschnitts ist die genauere Erörterung dieser Problematik und die Darlegung von Möglichkeiten ihr zu begegnen.

Zu geringe Umgebungshelligkeit führt zu Erkennungsproblemen, da der Kamera nicht ausreichen Licht und damit Kontrast zur Verfügung steht, um ein Bild zu liefern, in dem die ReacTIVision-Codes zuverlässig identifiziert werden können (dies gilt im Übrigen auch für alle zusätzlichen optischen Identifikations-Ansätze). Das Problem wird zusätzlich verschärft, da zur Aufnahme des Bildes nicht das Spektrum des sichtbaren Lichts verwendet wird, sondern in den Infrarot-Bereich (“near infrared”, Wellenlänge etwa 550 nm) ausgewichen wird. Dies ist notwendig, da andernfalls Reflexionen des auf die Oberfläche projizierten Output-Kanals (siehe Abschnitt XY) erfasst werden, was eine Identifikation der Codes unmöglich macht. Die meisten Kunstlicht-Quellen strahlen jedoch nicht ausreichend Licht im verwendeten Infrarot-Bereich ab, um eine ausreichende und gleichmäßige Ausleuchtung der Oberfläche zu gewährleisten. Dieser Problematik wurde dadurch begegnet, dass dezidierte im betreffenden Infrarot-Bereich strahlende Beleuchtungsquellen in den Tisch (konkret in den Ecken der Bodenplatte) eingebaut wurden (siehe Abbildung 4.6). Um eine gleichmäßige, diffuse Ausleuchtung zu erreichen, wurde der Tisch rundum mit weißen Kunststoffplatten mit strukturierter Oberfläche verkleidet, die das vorhandene Licht streuen. Um Reflexionen der Lichtquellen (die nach oben abstrahlen) auf der Oberfläche zu vermeiden, wurden etwa 50 cm über den Lichtquellen Streuscheiben angebracht. Es konnte so eine ausreichend diffuse Beleuchtungssituation geschaffen werden, deren Stärke ausreicht, um die Codes auch bei vollkommener Dunkelheit in der Umgebung zuverlässig zu erkennen.

Das zweite Problemfeld betrifft zu starke Lichteinstrahlung aus der Umgebung. Zu hohe Umgebungshelligkeit führt zu einem Überstrahlen des Kamerabildes in manchen Bereichen, womit in Teilen der Oberfläche keine Codes erkannt werden können. Dies liegt in dem von ReacTIVision eingesetzten adaptiven Code-Extraktions-Algorithmus begründet, der bei schwachen oder guten Beleuchtungsverhältnissen leichte Unterschiede in der Ausleuchtung korrigieren kann, bei starken Unterschieden oder großer Helligkeit jedoch nicht mehr zuverlässig funktioniert. Wie bereits erwähnt, arbeitet die Kamera im Infrarot-Bereich. Dies ist dann problematisch, wenn starke Sonneneinstrahlung vorhanden ist, da diese einen hohen Anteil an Lichts der relevanten Wellenlänge enthält. Auch bestimmte Kunstlichtquellen wie Leuchstoffröhren, die unmittelbar über dem Tisch angebracht sind, verursachen Probel-

4. Eingabe und Interpretation

me. Während punktuelle Helligkeitszonen (“Spotlights”) nicht durch die Software korrigiert werden können und vermieden werden müssen, kann eine generell zu hohe Umgebungshelligkeit durch die Kalibrierung der ReacTIVision-Software bzw. der ihr zugrunde liegenden Kamera-Treiber korrigiert werden. Im Konkreten ermöglicht ReacTIVision bei Firewire-Kameras eine Veränderung der Kamerablende (größere Blende – weniger Licht am Sensor) sowie der Signalverstärkung (weniger Verstärkung – dunkleres Bild). Durch Veränderung dieser beiden Parameter kann nahezu jede Beleuchtungssituation korrigiert werden, sofern sie über die Zeit stabil bleibt.

Bei Umgebungslicht-Bedingungen, die sich über die Zeit verändern (z.B. bei Tageslicht, das sich durch Wolkenbewegungen oder tageszeitabhängig verändert), kann die Konfiguration des ReacTIVision-Frameworks nicht sinnvoll eingesetzt werden, da sich nicht automatisiert über eine Software-Schnittstelle vorgenommen werden kann, sondern manuell durchgeführt werden muss. Leichte Veränderung der Helligkeit kann das ReacTIVision-Framework durch den adaptiven Erkennungs-Algorithmus noch selbst korrigieren, bei größeren Veränderungen funktioniert jedoch die Erkennung nicht mehr stabil. Dies äußert sich darin, dass Codes für einige Sekundenbruchteile von der Kamera nicht mehr erfasst werden, was wiederum zu unerwünschten von Framework gemeldeten Ereignissen führt (z.B. dass ein Container-Token verschwunden wäre, obwohl es sich physisch noch auf der Oberfläche befindet). Da diese Erkennungsausfälle im Grenzbereich grade noch möglicher Erkennung zwar regelmäßig auftreten, in ihrer zeitlichen Ausdehnung aber eher kurz sind, wurde auf Ebene der Interpretation der vom ReacTIVision-Framework gemeldeten Ereignisse eine Stabilisierungsebene eingezogen, die versucht, Ausfälle und Fehlerkennungen zu identifizieren und dementsprechend nicht an die übergeordneten Software-Ebenen weiterzugeben. Die in dieser Ebene umgesetzten Maßnahmen sind in Abschnitt 4.4.2 beschrieben.

Durch die Kombination aller beschriebenen Maßnahmen ist es möglich, eine sehr weitgehende Einsetzbarkeit der Werkzeugs unabhängig von den herrschenden Umgebungslichtbedingungen zu gewährleisten. Lediglich bei extremen Verhältnissen wie direkter Einstrahlung von in der Stärke stark variierenden Lichtquellen verhindert einen zuverlässigen Einsatz des Systems.

4.3. Benutzerinteraktion mit dem Werkzeug

Bevor nun die Interpretation der Eingabedaten durch die Software beschrieben wird, muss vorab geklärt sein, auf welche Art und Weise Benutzer mit dem System interagieren können. Bisher wurde geklärt, wie die Eingabe technische funktioniert und welche Elemente den Benutzern zur Interaktion mit dem System zur Verfü-

gung stehen. Im Folgenden die einzelnen Aktionen, die Benutzer grundsätzlich im Kontext des Modellierungsablaufs setzen können, identifiziert und deren konkrete Umsetzung durch das vorgestellte System beschrieben.

Ein grundsätzliches Designziel war es, die Interaktion mit dem System so „natürlich“ wie technisch möglich zu gestalten. Unter „natürlich“ ist hier zu verstehen, dass

- die Eingabe von Information möglichst ausschließlich über direkte Aktionen der Hände der Benutzer (d.h. ohne Übersetzung in die digitale Welt durch Maus oder Tastatur) gestaltet werden kann, und
- dass diese Aktionen bzw. deren Ablauf nur durch inhaltliche Vorgaben der Modellierungsproblematik, nicht aber durch technische Einschränkungen, vorgegeben sind.

Wie bereits im letzten Abschnitt beschrieben, konnten diese Forderungen aufgrund der Eigenschaften des eingesetzten Tracking-Systems nicht vollständig umgesetzt werden. Wo noch Einschränkungen hinsichtlich der oben genannten Forderungen bestehen, wird in den folgenden Abschnitt darauf hingewiesen und ein möglicher Lösungsansatz skizziert.

4.3.1. Hinzufügen und Verändern von Modellelementen

Um einem Modell Modellelemente hinzuzufügen müssen entsprechende Tokens auf der Modellierungsoberfläche platziert werden. Sofern sich diese im Erfassungsbe reich der Kamera befinden, werden sie identifiziert und dem Modell hinzugefügt. Beim erstmaligen Hinzufügen wird das Token dem Benutzern gegenüber mittels seiner Nummer (die durch den ReacTIVision-Code vorgegeben ist) identifiziert. Ist das Token bereits benannt und wird erneut hinzugefügt, wird die zuvor vergebene Benennung geladen und angezeigt.

Beim Erstmaligen Hinzufügen eines Elementtyps (also eines roten, blauen oder gelben Tokens) fragt das System nach der Bedeutung dieses Elementtyps. Diese kann angegebenen werden, kann aber auch unspezifiziert bleiben und zu einem späteren Zeitpunkt hinzugefügt oder verändert werden. Diese Interaktion zu einem späteren Zeitpunkt muss explizit durch ausgelöst werden, in dem ein Token des betreffenden Typs vor die Registrierungskamera gehalten wird.

Um ein Modellelement zu verändern (wobei hier lediglich die Veränderung der Raumparameter wie Position und Rotation gemeint sind), muss es entsprechend an einen anderen Ort verschoben oder gedreht werden. Dabei ist es nicht notwendig, dass das Token ständig von der Kamera erfasst wird. Kurze Aussetzer in der Erfassung, die durch schnelles Verschieben oder Abheben des Tokens und Aufsetzen an

einem anderen Ort auf der Oberfläche ausgelöst werden, werden von der Software ignoriert, das Element wird so behandelt, als wäre es nicht verschwunden gewesen (hinsichtlich der Auswirkungen des Verschwindens eines Tokens siehe Abschnitt 4.3.4).

Eine simulierte Erweiterung oder Veränderung des Modells durch mehrere Benutzer ist möglich, die Software schränkt die Anzahl der möglichen zeitgleich ablaufenden Interaktionen nicht ein. Da alle in diesem Abschnitt beschriebenen Interaktionen eindeutig einem Token zugeordnet werden können und dieses zu jedem Zeitpunkt eindeutig identifiziert werden kann, kann das System mit dieser Art von Eingaben umgehen. Die Erfassungsrate liegt in der derzeitigen Implementierung bei etwa 15 Bildern in der Sekunde, woraus sich ein Auswerteeintervall von etwa 67 Millisekunden ergibt. In diesem Abstand wird jeweils die gesamte Oberfläche ausgewertet und etwaige Änderungen an die Applikationsschicht weitergemeldet.

4.3.2. Benennen von Modellelementen

Die Benennung von Modellelementen ist eine der wichtigsten Interaktionsformen im Modellierungsprozess. Modellierungselementen wird damit ein Name zugewiesen, der zur Identifikation des Elements gegenüber den Benutzern verwendet wird. Um der Anforderung nach möglichst direkter, unmittelbarer Interaktion mit dem System in der realen Welt (d.h. auf der Modellierungsoberfläche) nachzukommen, wurde ein auf der Verwendung von Haftnotizen basierender Interaktionsmodus eingeführt, der zur Benennung von Modellelementen eingesetzt wird. Alternativ kann die Benennung durch Eingabe der Bezeichnung über eine Tastatur erfolgen.

Im Falle der Benennung mittels Haftnotizen wird ein Werkzeugtoken eingesetzt, auf dem die Haftnotizen angebracht sind. Unmittelbar nach der Platzierung eines Elements wird eine neue Haftnotiz beschriftet und mittels der Registrierungskamera erfasst. Während die Haftnotiz nun auf dem Modellelement angebracht werden kann, wird im System das erfasste Bild ausgewertet, der geschriebene Text wird (als Grafik) extrahiert und dem zuletzt auf der Oberfläche platzierten Token zugeordnet. Soll ein Element nachträglich (umbenannt) werden – wenn also zwischenzeitlich ein weiteres Element platziert wurde – muss das zu benennende Element mit dem Markierungstoken ausgewählt werden. Das Markierungstoken wird dazu in der Nähe des Elements auf die Oberfläche gesetzt. Visuelles Feedback auf der Oberfläche signalisiert eine erfolgreiche Auswahl. In der Folge kann die neue Benennung mittels des Registrierungstokens erfasst und am Element angebracht werden. Die Benennung mittels Haftnotizen ist insofern problematisch, als dass die Extraktion der handschriftlichen Benennung nur unzuverlässig funktioniert. Dies liegt vor allem an zu geringem Kontrast zwischen Haftnotiz und Schrift (bei schlechten Lichtverhältnissen).

nissen) und einer zu geringen Auflösung der Registrierungskamera. Außerdem werden keine Schrifterkennungs-Algorithmen eingesetzt, wodurch der Schriftzug für das System immer lediglich eine Menge von Bildpunkten ohne weitere Bedeutung bleibt.

Um diese Nachteile der Benennung mit Haftnotizen zu kompensieren, wurde ein alternativer Interaktionsmodus zur Benennung von Modellelementen eingeführt. Dieser läuft grundsätzlich gleich ab, setzt jedoch anstatt der Haftnotizen eine Tastatur ein, über die die Benutzer die Benennung dem System bekannt geben. Die eingegebene Information wird dann auf der Oberfläche unmittelbar unterhalb des Elements angezeigt (siehe Kapitel XY). Die Auswahl des zu benennenden Elements erfolgt wiederum durch das Markierungstoken. Die Vorteile dieses Systems liegen in der geringen Fehlerrate und der hohen Geschwindigkeit der Eingabe (etwa Faktor 10 schneller als die Eingabe mittels Haftnotiz). Der Nachteil dieses Ansatzes ist der exklusive Zugang zum Eingabemedium, der Tastatur. Während es beim Einsatz von Haftnotizen grundsätzlich möglich ist, diese simultan zu erstellen (auch wenn die Registrierung sequentiell erfolgen muss), kann bei der Verwendung der Tastatur zu einem Zeitpunkt immer nur ein Element bearbeitet werden.

Grundsätzlich sind die beiden Interaktionsmodi zur Benennung von Elementen als Ergänzung zueinander zu sehen. Sie können grundsätzlich gleichzeitig eingesetzt werden und bieten den Benutzern die Wahlmöglichkeit zwischen einer langsameren, dafür aber physisch vorhandenen oder einer schnelleren, dafür nur über die Ausgabekanäle des Systems sichtbaren Benennung. Die Erkennungsprobleme der Haftnotizen-Variante (die die Einführung des zweiten Interaktionsmodus ursprünglich ausgelöst hatte) können durch eine Verbesserung der technischen Rahmenbedingung ausgemerzt werden, wozu aber bei der Erstellung des hier vorgestellten Prototypen keine Ressourcen vorhanden waren. Im Falle einer Verbesserung könnten den Benutzern zwei gleichwertige Eingabekanäle zur Verfügung gestellt werden. Vorerst bietet der Einsatz der Tastatur jedoch nicht vernachlässigbare Vorteile hinsichtlich der Zuverlässigkeit und der Genauigkeit der Erfassung von Benennungen.

4.3.3. Verbinden von Modellelementen

Das Verbinden von Modellelementen ist neben dem Hinzufügen und Benennen der dritte wesentliche Interaktionsmodus, der zum Aufbau eines Modells benötigt wird. Verbindungen werden nicht physisch gelegt sondern mit Werkzeugtokens erstellt und dann über die Outputkanäle visuell dargestellt. Die Entscheidung gegen eine physische Repräsentation der Verbindungen fiel zugunsten einer leichteren Veränderbarkeit des gesamten Modells – das Verschieben eines Elements verursacht so

4. Eingabe und Interpretation

keinen zusätzlichen Aufwand, wohingegen physische Verbinder nachgeführt werden müssten.

Die Erstellung von Verbbindern kann wir die Benennung mit zwei unterschiedlichen Interaktionsmodi erfolgen, die sich aber ihrer Ausdrucksmächtigkeit bzw. Flexibilität unterscheiden. Der flexiblere Interaktionsmodus ist jener, der unter Einsatz von zwei Markierungstokens durchgeführt wird. Dabei wird jeweils ein Markierungstoken neben einem der beiden zu verbindenden Modellelemente platziert, wodurch diese ausgewählt und anschließend verbunden werden. Das Verbindungs-kriterium ist, dass die beiden Modellelemente innerhalb von 3 Sekunden nacheinander ausgewählt werden. Dies erlaubt sowohl eine gleichzeitige Platzierung von zwei Markierungstokens als auch die Arbeit mit nur einem Token, das rasch hintereinander neben die zu verbindenden Elemente gesetzt wird. Die Arbeit mit den herkömmlichen Markierungstokens erzeugt ungerichtete Verbindungen. Werden gerichtete Verbindungen benötigt (deren Richtung mit einer oder im Falle einer bidirektionalen Verbindung mit zwei Pfeilspitzen angezeigt wird), müssen spezielle Markierungstokens verwendet werden, deren Grundfläche die Form einer Pfeilspitze hat und die neben dem entsprechend zu markierenden Modellelemente platziert werden müssen.

Der alternative Interaktionsmodus zur Herstellung einer Verbindung kommt ohne Werkzeugtokens aus und basiert ausschließlich auf der Manipulation der Modellelemente. Werden zwei Modellelement an ihren Längsseiten zusammengefügt, so erstellt das System zwischen diesen beiden Elementen eine Verbindung. Im Interaktionsablauf bedeutet dies, dass ein Benutzer die beiden zu verbindenden Elemente ergreift und diese auf der Oberfläche von ihrer ursprünglichen Position aus kurz zusammenführt um sie danach sofort wieder an ihre Originalposition zurück zu stellen. Die so erstellten Verbindungen sind immer ungerichtet und werden nach der Erstellung gleich behandelt wie mit den Markierungstokens erstellte Verbindungen. Durch die Vermeidung der Verwendung von Werkzeugtokens ist dieser Weg zur Herstellung von Verbindungen schneller auszuführen als der zuvor beschriebene (etwa um Faktor 5). Problematisch wird diese Art der Interaktion dann, wenn die Modellierungsoberfläche bereits sehr voll ist, so dass nur noch wenig Platz zur Zusammenführung von zwei Elementen vorhanden ist. Auch bei Bedarf nach gerichteten Verbindern muss auf Markierungstokens zurückgegriffen werden.

Markierungen können unabhängig von ihrem Erstellungsweg auch benannt werden. Da sie keine physische Repräsentation besitzen, kann der Benennungsmodus mit Haftnotizen nicht verwendet werden. Die Eingabe von Bezeichnungen erfolgt demnach ausschließlich über die Tastatur. Zur Benennung einer Verbindung muss unmittelbar nach deren Erstellung die Bezeichnung eingegeben werden, diese wird dann der zuletzt erstellten Verbindung zugewiesen. Um eine Bezeichnung zu ändern

muss in der momentanen Implementierung die Verbindung gelöscht, neu hergestellt und wiederum benannt werden.

4.3.4. Löschen von Elementen und Verbindungen

Beim Löschen muss zwischen dem Entfernen von Elementen und Verbindungen unterschieden werden. Beide Modellaspekte sind nicht nur hinsichtlich der Interaktion mit dem System unterschiedlich zu behandeln, es besteht vor allem eine Existenzbeziehung zwischen Elementen und Verbindungen, d.h. dass Verbindungen nicht ohne ihre als Endpunkte dienenden Elemente existieren können und beim Entfernen eines Elements ebenfalls gelöscht werden müssen.

Das Löschen eines Modellelements aus dem aktuellen Modell erfolgt durch Entfernen der zugehörigen Tokens auf der Oberfläche. Hier muss zwischen Entfernungsvorgängen zu unterscheiden, die vom Benutzer intendiert sind und solchen, die durch die Manipulation des Modells unabsichtlich und kurzzeitig auftreten. Nur in ersterem Fall dürfen die Verbindungen, die an einem Element hängen, ebenfalls gelöscht werden. Die Unterscheidung zwischen den beiden Fällen wurde durch die Einführung eines Zeitintervall von 5 Sekunden gelöst, nachdem die betroffenen Verbindelementer ebenfalls entfernt werden. Wird also ein Modellelement nur an eine andere Stelle verschoben (und verschwindet so kurzzeitig aus dem Blickfeld der Kamera), bleiben die Verbindungen erhalten. Wird das Element zur Seite gestellt, wird es und seine abhängigen Verbindungen zwar auf den Ausgabekanälen nicht mehr dargestellt, eine wirkliche Löschen erfolgt aber erst nach 5 Sekunden. Wird das Element innerhalb dieser Zeitspanne wieder auf der Oberfläche platziert, wird es und seine abhängigen Verbindungen so behandelt, als ob es nicht verschwunden gewesen wäre.

Das Löschen von Verbindern ist durch den Einsatz der Radierer-Werkzeug-Tokens möglich, dass das System in den Lösch-Modus schaltet sobald es auf der Oberfläche platziert wird (und diesen wieder deaktiviert, wenn es entfernt wird). Im Lösch-Modus wird der Einsatz von Markierungstokens alternativ interpretiert. Anstatt der Herstellung einer Verbindung wird bei Markierung von zwei Modellelementen eine eventuell zwischen diesen vorhandene Verbindung endgültig entfernt. Dabei ist keine Unterscheidung zwischen gerichteten und ungerichteten Verbindungen notwendig, es können durchgängig die einfachen Markierungstokens eingesetzt werden.

4.3.5. Einbettung von Zusatzinformation

Der Interaktionsablauf zur Einbettung von Zusatzinformation setzt sich aus zwei Teilen zusammen, die sequentiell abzuarbeiten sind. Der erste Schritt ist der Vor-

4. Eingabe und Interpretation

gang des Bindens von Zusatzinformation an ein einbettbares Token. Im zweiten Schritt muss dieses Token in einem Container-Token eingebettet werden. Ein dritter Interaktionsablauf in diesem Zusammenhang ist das Abrufen bzw. die Manipulation der eingebetteten Information, der in der Folge ebenfalls im Detail beschrieben wird.

Das Binden von Information an ein einbettbares Token ist ein Vorgang, der nicht ausschließlich in der physischen Welt durchgeführt werden kann, da die anzubindende Information im Regelfall digital vorliegt und damit am Rechner selektiert werden muss. Der zugehörige Informationsablauf beginnt mit der Auswahl eines einbettbaren Tokens, dessen Form die Art der einzubettenden Information bestimmt. Im konkreten Fall wurden drei Arten von einbettbaren Tokens erstellt, von denen eine der Umsetzung der Abstraktion von Modellen (also der Einbettung von Teilmodellen in ein Containerelement) dient und die anderen beiden exemplarisch die Anbindung von digitalen Ressourcen aus der Arbeitsumgebung demonstrieren. Im Sinne des Interaktionsablaufs sind diese Arten zum Teil unterschiedlich zu behandeln. Bei allen Token startet die Interaktion mit der Registrierung des Tokens mittels der Registrierungskamera. Handelt es sich dabei um ein Token, das der Einbettung von Teilmodellen dient, wird der aktuelle Modellzustand auf der Modellierungsfläche erfasst, gespeichert und an das Token gebunden. Der Vorgang der Informationsanbindung ist in diesem Fall abgeschlossen. Daneben existieren Tokens, an die beliebige digitale Ressourcen in der Form von Dateien gebunden werden können. Die Registrierung eines derartigen Tokens öffnet in diesem Fall eine Dialogbox am Rechner, in der die digitale Ressource ausgewählt werden kann. Die gewählte Datei wird dann über eine Referenz an das Token gebunden. Die dritte Art von einbettbaren Tokens demonstriert die Anbindung von spezialisierterer Information, die in einem Anwendungsfall sinnvoll sein können und ggf. auch gesondert behandelt werden müssen. Im konkreten Fall wurde die Anbindung von unmittelbar aufgenommenen Bildern implementiert, die so z.B. eine Abbildung eines Ausschnittes der realen Arbeitsumgebung in das Modell ermöglichen. Im Interaktionsablauf löst die Registrierung eines derartigen Tokens die Speichlung eines Bildes, das aktuell von der Registrierungskamera erfasst wird, aus. Dieses Bild wird an das Token gebunden, der Interaktionsablauf ist damit ebenfalls wieder beendet.

Im zweiten Schritt, der zur Einbettung von Information notwendig ist, muss das einbettbare Token einem Containertoken zugeordnet werden. Dazu muss das betreffende ContainerToken geöffnet werden. Das einbettbaren Token, an das bereits Information gebunden wurde, wird erneut mit der Registrierungskamera erfasst, was eine Zuordnung zwischen diesem Token und dem offenen Container auslöst. Visuelles Feedback über die Ausgabekanäle zeigt eine erfolgreiche Zuordnung an. Das einbettbare Token kann nun auch physisch in den Container gelegt werden und ist diesem damit auch in der realen Welt zugeordnet. Der Interaktionsvorgang endet

mit dem Schließen des Containertokens. Der hier beschriebene Vorgang ist insofern als Hilfskonstrukt zu sehen, als das er nicht notwendig wäre, wenn die Container-token in der Lage wären, ihren Inhalt selbst zu identifizieren. Wie in Abschnitt 4.1.1 argumentiert, wurde aber auf diese Funktionalität verzichtet. Dies ist für den prototypischen Einsatz akzeptabel, im Realbetrieb jedoch insofern problematisch, als dass durch den indirekten, mehrstufigen Zuordnungsprozess ein inkonsistenter Zustand zwischen physischer und digitaler Modellrepräsentation nicht ausgeschlossen werden kann.

Um eingebettete Information wieder abrufen zu können, wurde ebenfalls ein Interaktionsablauf definiert. Dieser beginnt mit dem Öffnen des entsprechenden Container-Tokens. Durch Herausnehmen des informationstragenden Tokens und eine Erfassung desselben mit der Registrierungskamera wird die angebundene Information abgerufen. Handelt es sich um ein Token mit angebundenen Teilmodell, so wird dieses über die Output-Kanäle dargestellt. Angebundene digitale Ressourcen werden am Rechner geöffnet und dargestellt. Das eingebettete Token bleibt dem Container-Token zugeordnet, es muss also zur Konsistenzsicherung nach dem Abrufen der Information wieder in den Container gelegt werden. Um ein eingebettetes Token aus einem Container zu entfernen, muss bei der Erfassung dieses Tokens das Radierer-Werkzeug-Token eingesetzt werden und das System so in den Lösch-Modus versetzt werden. Die Information bleibt dabei an das einbettbare Token gebunden. Eine Veränderung der angebundenen Information während eines Modellierungsvorgangs ist nicht vorgesehen, es muss ggf. ein weiteres, noch unbelegtes einbettbares Token verwendet werden.

4.3.6. Kontrolle der Modellierungshistorie

Die Kontrolle der Modellierungshistorie umfasst im Wesentlich drei Interaktionsblöcke, die im Folgenden beschrieben werden. Der erste Block behandelt die Erfassung von Modellzuständen, im zweiten Block wird die Navigation durch die Modellierungshistorie behandelt und der dritte Block beschäftigt sich mit der Unterstützung der Wiederherstellung von gespeicherten Modellzuständen.

Die Erfassung von Modellzuständen erfolgt im Normalfall implizit und muss von den Benutzern nicht explizit ausgelöst werden. Wenn sich das Modell auf der Modellierungsoberfläche länger als 5 Sekunden in einem stabilen Zustand befinden (wenn also weder die Position, noch die Rotation oder die Benennung der Tokens geändert wurden und auch keine Verbindungen oder Einbettungen erstellt wurden), wird der aktuelle Modellzustand gespeichert. Sollen bestimmte Modellzustände aber aufgrund ihrer Relevanz für den Modellierungsverlauf explizit gespeichert und auch entsprechend gekennzeichnet werden, so kann das Snapshot-Token eingesetzt wer-

4. Eingabe und Interpretation

den. Dieses löst sobald es auf der Modellierungsoberfläche aufgesetzt wird die Speicherung des aktuellen Modellzustandes aus. Das System quittiert die Speicherung mit visuellem Feedback über die Ausgabekanäle. Explizit erfasste Zustände werden im Gegensatz zu automatisch gespeicherten gekennzeichnet und in den weiterverarbeitenden Modulen (vor allem bei der Persistierung) speziell behandelt.

Die Navigation durch die Modellierungshistorie erfolgt mittels einem runden Werkzeug-Token, dass diese Navigation durch Rotation im oder entgegen dem Uhrzeigersinn ermöglicht. Das System wird durch das Aufsetzen dieses Tokens auf die Modellierungsoberfläche in den Historien-Modus geschaltet, was Auswirkungen auf die Darstellung des Modells in den Outputkanälen (siehe Abschnitt XY) hat. Bei Aktivierung des Historien-Modus wird der aktuellste gespeicherte Modellzustand geladen. Durch Drehen des Tokens gegen den Uhrzeigersinn kann in der Zeit zurück navigiert werden. Das Laden der nächstälteren Modellzustands erfolgt dabei in regelmäßigen Intervallen von jeweils 45 Grad (8 Modellzustände pro voller Umdrehung). Der absolute zeitliche Abstand zwischen den gespeicherten Modellzuständen, der sich aus dem Auftreten stabiler Modellzustände ergibt, wird bei der Navigation nicht berücksichtigt – der zurückzulegende Winkel ist immer gleich groß. Gleichermaßen gilt für das Drehen des Tokens im Uhrzeigersinn – dabei wird in regelmäßigen Abständen der nächstjüngere Modellzustand geladen. Wird das Token entfernt, wird der Historien-Modus deaktiviert und wieder in der aktuelle Systemzustand an die Output-Kanäle übergeben.

Soll ein gespeicherter Modellzustand wiederhergestellt werden, so bietet das System Unterstützung für die dazu notwendige Interaktion. Da weder die Tokens noch der Tisch selbst über steuerbare bewegliche Komponenten verfügen, die eine automatisierten Wiederherstellung eines Modellzustandes ermöglichen würden, kommt die Aufgabe der eigentlichen Wiederherstellung den Benutzern zu. Das System unterstützt dabei insofern, als das über die Ausgabekanäle Information an die Benutzer weitergegeben wird, die die korrekte Platzierung der Elemente anleitet (Details dazu sind in Abschnitt XY nachzulesen). Gespeicherte Modellzustände können dabei entweder aus dem Historienmodus oder aus an eingebettete Tokens gebundene Teilmodelle bezogen werden. Im ersten Fall wird die Wiederherstellungsunterstützung durch ein spezielles Token aktiviert, das auf die Oberfläche aufgesetzt wird während der alte Systemzustand über die Outputkanäle dargestellt wird. Im zweiten Fall muss das Teilmodell, das an das eingebettete Token gebunden ist, über die Registrierungskamera abgerufen werden, wodurch es ebenfall über die Outputkanäle dargestellt wird. Während der Darstellung wird die Wiederherstellungsunterstützung wiederum durch Aufsetzen des betreffenden Werkzeug-Tokens auf die Oberfläche aktiviert. In beiden Fällen läuft dann die Wiederherstellungsunterstützung durch das System angeleitet automatisiert ab. Nach Abschluss der Wiederherstellung werden die Benutzer aufgefordert eventuell noch vorhandene Werkzeug-Tokens (wie

das Historien-Navigations-Token) zu entfernen, wodurch das System wieder den aktuellen Modellzustand als Grundlage der Darstellung verwendet.

4.4. Erfassung der Benutzerinteraktion durch Software

Das Software-System, das die Benutzereingaben von der Hardwareschnittstelle bis hin zur abstrahierten Modellierungsinformation aufbereitet, ist Gegenstand dieses Abschnitts. Die darüber hinausgehenden Komponenten sind Gegenstand der Kapitel X und Y. Die hier behandelten Software-Komponenten sind

- jene Komponente, die die Rohdaten von ReacTIVision empfängt und sie hinsichtlich der Modellierungsinformation auswertet und interpretiert,
- die Komponente, die für die Stabilisierung der Erkennungsleistung sorgt, wenn Fehlerkennung oder Erkennungsausfälle auftreten, sowie
- jene Komponente, die für das Tracking des Modellzustandes und damit für die Nachvollziehbarkeit des Modellierungsablaufs zuständig ist.

Wie in Abschnitt 4.1.3 ausgeführt, soll zur Verknüpfung dieser Komponenten das TUIpist-Framework zum Einsatz kommen. Im vorliegenden Prototypen wurde das System jedoch zwar modular aber ohne Einsatz des TUIpist-Frameworks implementiert. Eine erste Umsetzung der Architektur auf die TUIpist-Strukturen liegt vor, ist jedoch noch nicht im produktiven Einsatz. An dieser Stelle wird deshalb der Aufbau der Komponenten in ihrer derzeitigen Implementierung beschrieben, da diese auch bei der Evaluierung des Werkzeugs eingesetzt wurde. Erste Umsetzungserfahrungen deuten darauf hin, dass der Aufwand zur Einbindung von TUIpist sich wie erwartet in Grenzen hält.

Die Systemarchitektur, wie sie sich in der derzeitigen Implementierung darstellt ist in Abbildung 4.18 dargestellt. Die Komponenten des Interpretations-Moduls leiten sich aus den umzusetzenden Funktionen und zu erkennenden Interaktionsabläufen (siehe Abschnitt 4.3) ab. Die Komponenten sowie die Verknüpfungen untereinander werden in den folgenden Abschnitten im Detail beschrieben, wobei die Struktur der Beschreibung im Gegensatz zum vorangegangenen Abschnitt nicht an der Funktionalität sondern an den involvierten Technologien orientiert ist und damit einen weiteren Detaillierungsschritt in der Beschreibung der Benutzereingabe im hier vorgestellten System darstellt.

4.4.1. Interpretation der Rohdaten

4. Eingabe und Interpretation

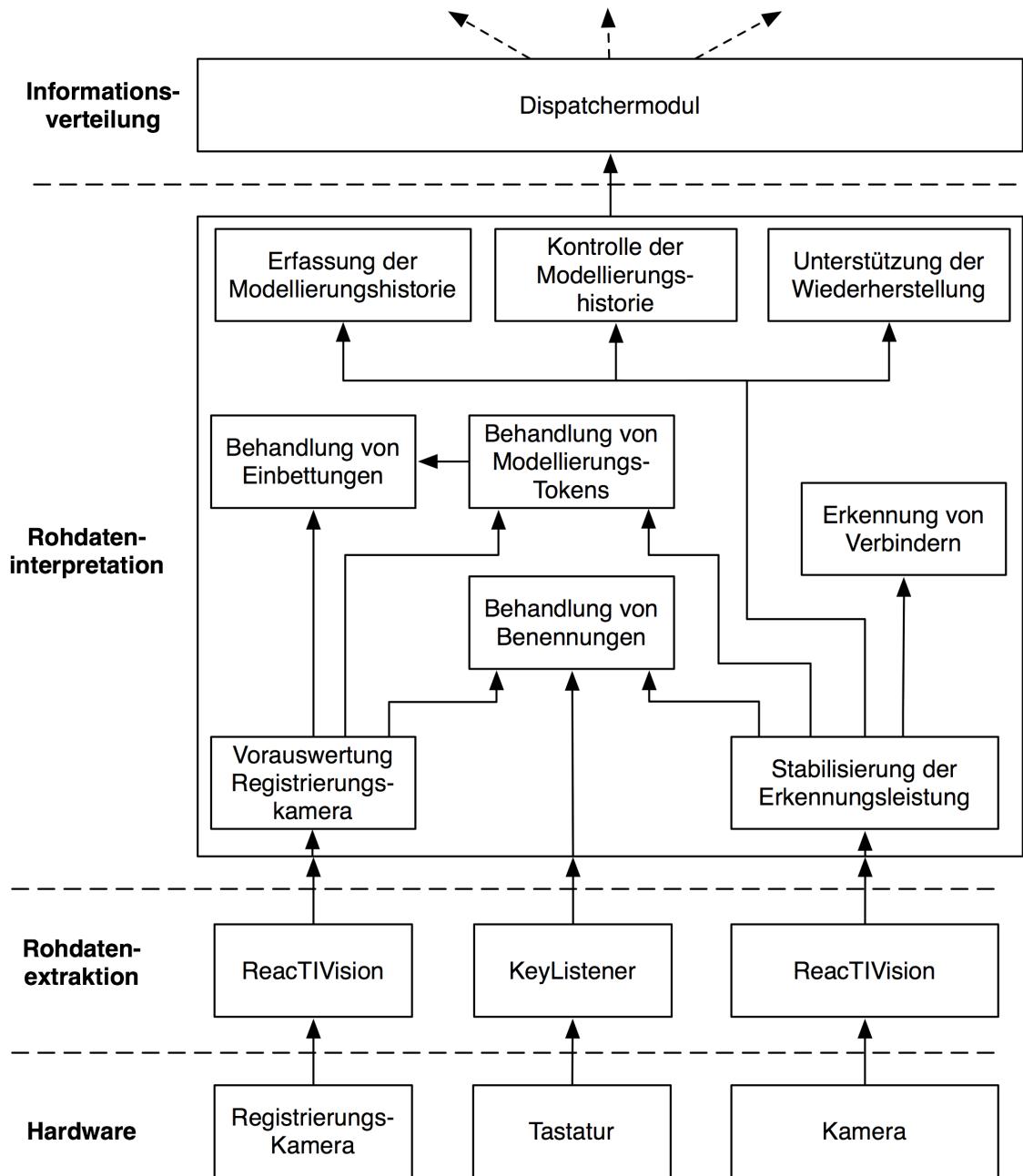


Abbildung 4.18.: Softwarearchitektur zur Erkennung von Benutzerinteraktion

Das ReacTIVision-Framework liefert wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben die aus dem Kamerabild extrahierten Informationen bezüglich der erkennbaren Codes in einem proprietären Nachrichtenformat über eine UDP-Schnittstelle an. Für jeden erkennbaren Code wird eine separate Nachricht gesandt, sobald sich zumindest ein Parameter (also Position oder Rotation) verändert. Diese Nachrichten treffen über die UDP-Schnittstelle bei einem von ReacTIVision bereitgestellten Java-Objekt ein, das die Auswertung der Nachricht übernimmt und über einen Callback-Mechanismus (entsprechend dem in (Gamma et al., 1995) beschriebenen Beobachter-Muster (Observer), das bei der Entwicklung wiederverwendbarer objektorientierter Software als Entwurfsmuster zum Einsatz kommt) vom Anwendungsentwickler implementierte Methoden aufruft, die auf das jeweilige Ereignis reagieren. Die Ereignisse, die auftreten können, beschränken sich auf das Erscheinen eines Tokens, die Änderung der Parameter eines Tokens und das Verschwinden eines Tokens sowie die gleichen drei Ereignisse für die Behandlung eines Cursors (wie das Markierungs-Werkzeugtoken). Dazu werden jeweils die relevanten Parameter zur Verfügung gestellt (im Wesentlichen die ID des Tokens, seine Position, seine Rotation und einige weitere abgeleitete Parameter, die in der konkreten Anwendung nicht eingesetzt werden).

In den betreffenden Methoden wird im ersten Schritt ausgewertet, ob das identifizierte Token ein Modellierungs-Element oder ein Werkzeug ist. Im Falle eines Modellierungs-Elements wird im nächsten Schritt festgestellt, um welche Art von Token es sich handelt und ob es im aktuellen Modellierungsvorgang bereits im Einsatz war (ob z.B. bereits Information über die Benennung des Tokens oder dessen Inhalt vorhanden ist). Diese Information wird ggf. geladen und den weiterverarbeitenden Komponenten zu Verfügung gestellt. Im Falle eines Werkzeug-Tokens wird dieses identifiziert und an die für die Behandlung zuständige Methode weitergeleitet. Diese Methoden schalten das System je nach Art des eingesetzten Tokens in einen alternativen Zustand oder lösen eine Aktion auf den übergeordneten Ebenen aus.

Ist für die Interpretation einer Benutzerinteraktion mehr als ein Token notwendig (z.B. beim Ziehen von Verbindungen), werden die Kandidaten, die möglicherweise den Beginn einer derartigen Interaktionssequenz darstellen in einen Buffer geschrieben. Beim Auftreten eines Tokens, das möglicherweise den zweiten Teil dieser Interaktion darstellt, wird dieser Buffer geprüft und die Interpretation ggf. auf Basis der gespeicherten und aktuellen Token-Daten durchgeführt.

Manche Benutzereingaben müssen – um eine bequeme Eingabe des Modells zu ermöglichen – ggf. auch nach Entfernen eines Tokens für einen bestimmten Zeitraum gespeichert werden. Beispiele hierfür sind Markierungen, die auch nach Entfernen des Markierungstokens für einige Sekunden aktiv bleiben um Zeit für die Benennung oder die Herstellung einer Verbindung zu geben oder auch Modellierungstoken, die durch Manipulation temporär aus dem Erkennungsbereich der Kamera ge-

raten und in diesem Fall nicht sofort als „entfernt“ interpretiert werden sollen. Auch in diesem Fall werden Buffer eingesetzt, die die entsprechende Information mit einem Zeitstempel versehen aufnehmen. Zur Sicherstellung der Modellkonsistenz (also der Übereinstimmung zwischen physischem und digitalem Modell) prüfen speziell dazu konzipierte Methoden, die von einem Timer in regelmäßigen Abständen aufgerufen werden, ob die vorgegebene Gültigkeitsdauer der Information bereits abgelaufen ist und entfernen diese ggf. endgültig aus dem Buffer und dem Modell (löschen also konkret eine Markierung oder entfernen ein Modellelement und alle abhängigen Verbindungen aus dem Modell). Die Zeitintervalle dieser Prüfungen sind auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmt und bewegen sich im Bereich zwischen drei und fünf Sekunden.

4.4.2. Stabilisierung der Erkennungsleistung

Da wie bereits beschrieben beim Einsatz von ReacTIVision bei grenzwertigen Beleuchtungsbedingungen zu Erkennungsproblemen oder Fehlerkennungen neigt, wurden im Programmcode des Interpretationsmoduls Mechanismen verankert, die potentielle Fehlerkennungen und Erkennungsprobleme identifizieren und ignorieren sollen. Im Folgenden werden häufige Fehlerquellen benannt und der jeweilige Lösungsansatz beschrieben.

Bildrauschen

Bei wenig vorhandenem Umgebungsumgebungslicht müssen die Kameraparameter wie oben bereits beschrieben soweit nachgeführt werden, bis wieder ausreichender Bildkontrast vorhanden ist. Zur Nachführung eignen sich die Blende der Kamera und die Signalverstärkung. Eine offene Blende erhöht den Lichteinfall auf den Sensor und verbessert damit die Bildhelligkeit und den Kontrast. Je weiter offen die Blende eingestellt ist, desto geringer ist jedoch auch die Tiefenschärfe des Kamerabilds, d.h. dass die Kamera sehr exakt auf die Modellierungsoberfläche fokussiert werden muss. Da der Abstand von der Kamera zu Mitte des Tisches geringer ist als zu den Randbereichen, kann bei offener Blende nie die gesamte Oberfläche scharf eingestellt werden. Da ein unscharfes Bild die Erkennungsleistung massiv mindert, sind der Nachführung des Blenden-Parameters Grenzen gesetzt. Die Signalverstärkung wirkt demgegenüber nicht direkt auf die Kamera sondern auf das von ihr gelieferte Bild und ist deswegen keine physikalischen Beschränkungen unterworfen. Bei der Erhöhung der Signalverstärkung werden helle Bereiche im Bild heller, dunkle bleiben eher dunkel, der Kontrast wird also erhöht. Problematisch ist in diesem Kontext, dass nicht nur das Nutzsignal (also das eigentliche Bild) verstärkt wird, sondern auch das im Bild enthaltene Rauschen. Das Rauschen ist wiederum ein

physikalisches Phänomen der digitalen Bilderfassung und hat seinen Ursprung im bildaufnehmenden Chip. Während das Rauschen bei guten Lichtverhältnissen im Vergleich zum Nutzsignal vernachlässigbar ist, wirkt es bei schlechten Lichtverhältnissen und dementsprechend starker Signalverstärkung störend. Generell ist die Kamera deshalb so zu kalibrieren, dass der Spielraum bei der Blendeneinstellung maximal ausgenutzt wird (so dass die gesamte Oberfläche noch scharf erscheint) und erst danach die zu einer stabilen Erkennung notwendige Signalverstärkung eingestellt wird.

Ist trotz maximaler Blendenöffnung sowenig Licht vorhanden, dass es durch eine hohe notwendige Verstärkung zu Bildrauschen kommt, ergeben sich Probleme bei der Bilderkennung. Diese äußern sich teilweise im temporären Nicht-Erkennen von auf der Oberfläche platzierten Tokens (weil das den Code enthaltende Nutzsignal im Bildrauschen untergeht), vor allem aber im Auftreten von „Cursorflackern“. Mit „Cursorflackern“ wird hier das Phänomen bezeichnet, das der Bilderkennungsalgorithmus vermeintlich auf die Oberfläche aufgesetzte Cursor-Tokens (wie das Markierungstoken) erkennt und an das Interpretationsmodul weiterleitet. Es kann so vorkommen, dass fehlerhafte Markierungen angezeigt werden oder sogar umgewollte Verbindungen entstehen. Diese Cursor haben eine sehr geringe Lebensdauer (im Bereich von unter 500 Millisekunden), da das Rauschen per Definition zufallsverteilt und dynamisch ist und eine als Cursor erkannte Konstellation dementsprechend nicht lange erhalten bleibt.

Um das „Cursorflackern“ zu verhindern kann einerseits auf Seiten des ReacTIVision-Frameworks die Cursor-Größe erhöht werden, was die Wahrscheinlichkeit einer Fehlerkennung durch die größere notwenige Fläche, auf der das Rauschen in der richtigen Form auftreten muss, reduziert. Dementsprechend müssen aber auch etwige Cursor-Tokens in ihrer Größe angepasst werden, was nur in Grenzen möglich ist. Der alternative Ansatz zur Kompensation von „Cursorflackern“ wurde im Interpretationsmodul implementiert und basiert auf der Messung der Lebensdauer des Cursors. Wird von ReacTIVision das Auftreten eines Cursors gemeldet, so wird dieser vom Interpretationsmodul nicht direkt ausgewertet sondern in einen Buffer geschrieben. Nach 600 Millisekunden wird geprüft, ob der Cursor noch vorhanden ist oder ob er bereits wieder entfernt wurde (ob also eine entsprechende Nachricht von ReacTIVision weitergegeben wurde). Im ersten Fall kann von einem bewusst gesetzten Cursor ausgegangen werden und dieser zur Weiterverarbeitung freigegeben werden. Im zweiten Fall handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um ein „Cursorflackern“, das ignoriert werden kann.

Technisch ist diese Funktion so umgesetzt, dass eine Meldung über das Auftreten eines Cursors ein entsprechendes Objekt mit Zeitstempel in den betreffenden Buffer schreibt. Die Meldung über das Verschwinden eines Cursors entfernt dieses Objekt dementsprechend wieder aus dem Buffer. Ein Timer löst alle 300 Millisekun-

den eine Prüfung des Buffers aus, bei dem alle Cursor, die älter als 600 Millisekunden sind, zur Weiterverarbeitung frei gegeben werden. Alle jüngeren Cursor werden unverändert im Buffer belassen und – sofern dann noch vorhanden – im nächsten Durchlauf erneut geprüft und ggf. frei gegeben. Durch den potentiell simultanen Zugriff auf den Buffer (durch die Prüfungsroutine und den Cursor hinzufügenden oder entfernenden Methoden) müssen hier synchronisierte, dass heißt simultaner Veränderung gegenüber stabile Buffer-Klassen eingesetzt werden.

Spotlights

Bei ungleichmäßiger Umgebungsbeleuchtung treten auf der Modellierungsoberfläche häufig kleinere Bereiche auf, in denen die Helligkeit gegenüber der Umgebung erhöht ist. Derartige Bereiche entstehen unter anderem durch einfallendes Sonnenlicht, dass durch Rollen oder ähnlichem zum Teil abgeschirmt wird oder auch durch Reflexionen, die durch die Lampe des Videoprojektors verursacht werden. In beiden Fällen führen diese Bereiche, die im Folgenden als „Spotlights“ bezeichnet werden, zur Fehlerkennung von Cursorn auf der Oberfläche. Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen „Cursorflattern“ bleiben diese „Spotlights“ jedoch über die Zeit stabil und werden vom ReacTIVision-Framework als ständig vorhandene Cursor identifiziert. Bleibt diese Fehlerkennung unkomponiert, so wird ein Token, das im Bereich des „Spotlights“ aufgesetzt oder dorthin bewegt wird, ohne weitere Benutzerinteraktion markiert (also ob es mit dem Markierungstoken ausgewählt werden würde). Dies führt wie zuvor zu Problemen bei der Benennungen von Tokens bzw. zu unbeabsichtigten Verbindungen.

Um die Fehlerkennung von Cursorn durch Spotlights zu verhindern, kann einerseits wiederum die Möglichkeit der oben bereits beschriebenen Konfiguration der Cursorgröße im ReacTIVision-Framework genutzt werden. Da diese jedoch den ebenfalls erwähnten Einschränkungen unterliegt, ist eine Behandlung im Interpretationsmodul notwendig. Der Lösungsansatz zur Kompensation beruht wiederum auf einer Messung der Lebensdauer des betreffenden Cursors. Im Gegensatz zur Behandlung des „Cursorflackerns“, bei dem eine minimale Lebensdauer festgelegt wurde, wird bei der Behandlung von „Spotlights“ eine maximale Lebensdauer definiert, nach deren Überschreitung ein Cursor ignoriert wird. Diese Grenze ist mit fünf Sekunden festgelegt – jeder Cursor, der länger auf der Oberfläche identifiziert wird, wird ignoriert. Spotlights sind somit maximal fünf Sekunden nach ihrem Auftreten wirksam. Wenn sich in diesem Zeitraum kein Token in der Nähe des Spotlights befindet, bemerken die Benutzer die Fehlerkennung nicht. Befindet sich zum Zeitpunkt der Erkennung ein Token in der Nähe, so wird dieses einmalig markiert, wobei diese Markierung durch den in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Mechanismus

zur Begrenzung der Lebensdauer von Markierungen nach spätestens drei Sekunden wieder verschwindet.

Technisch wurde diese Kompensationsmaßnahme als Erweiterung des oben beschriebenen Buffer-Ansatzes umgesetzt. Bei der Prüfung der Gültigkeit eines Cursor im Buffer wird nun neben der minimalen Lebensdauer auch die maximale Lebensdauer miteinbezogen. Ist die maximale Lebensdauer überschritten, so wird der Cursor aus dem Buffer entfernt und damit so behandelt, als ob er von den Oberfläche verschwunden wäre. Diese Maßnahme ist dann wirksam, wenn die „Spotlights“ tatsächlich über die Zeit stabil erkannt werden – setzt die Erkennung eines „Spotlights“ kurzfristig aus, so beginnt mit der Wiedererkennung desselben die oben beschriebene 5-Sekunden-Frist bis zum Ignorieren des erkannten Cursors von neuem. Um diese potentiellen Problematik zu begegnen, werden die Positionen von bereits erkannten Spotlights ebenfalls in einem Buffer abgelegt. Tritt ein neuer Cursor an der Stelle eines bereits bekannten Spotlights auf, wird dieser sofort ignoriert. Dabei kann die Applikation über die Laufzeit theoretisch zu restriktiv bei der Akzeptanz von Cursoren umgehen, vor allem wenn Markierungstokens regelmäßig länger als fünf Sekunden auf der Oberfläche belassen werden und die zugehörigen Cursor dadurch als Spotlights erkannt und deren Positionen gesperrt werden. In der Praxis ist dieses Vorgehen jedoch kein Problem, da manuell platzierte Token kaum oder nur zufällig so positionsstabil auf der Oberfläche platziert werden können, dass exakt die gleiche (und demnach gesperrte) Position getroffen wird. „Spotlights“ sind demhingegen hoch positionsstabil und werden dadurch durch diese Maßnahme erfasst.

Ein weiteres Problem, das durch „Spotlights“ verursacht wird, die von unten auf die Oberfläche geworfen werden (also z.B. durch den Videoprojektor verursacht werden) ist eine potentielle Verdeckung von Teilen eines ReacTIVision-Codes, wodurch das betroffene Token nicht mehr erkannt werden kann. Da die Störung permanent ist, kann diese durch Software nicht kompensiert werden und muss durch physische Maßnahmen kompensiert werden. Im konkreten Fall wurde das Spotlight, dass durch den Videoprojektor verursacht wurde, durch eine punktuelle Abdeckung am Umlenkspiegel (siehe Abbildung 4.6) verhindert. Diese Maßnahme verhindert zwar auch eine Projektion im betroffenen Bereich, diese Beeinträchtigung ist aber insofern akzeptabel, als dass auf der Oberfläche ein Bereich von lediglich 0,5 cm im Quadrat betroffen ist.

Überstrahlte Bereiche

Überstrahlte Bereiche können auftreten, wenn sich externe Lichtquellen direkt über der Tischoberfläche befinden oder bei internen (im Werkzeug eingebauten) Lichtquellen keine Streuscheiben verwendet werden. Außerdem kann auch durch direkte Sonneneinstrahlung ein Überstrahlen auftreten. In Abgrenzung zu „Spotlights“ sind

4. Eingabe und Interpretation

überstrahlte Bereiche großflächiger (potentiell die gesamte Oberfläche) und werden nicht als Cursor erkannt. Überstrahlte Bereiche verursachen jedoch andere Probleme, die im Folgenden behandelt werden.

Das größte Problem bei überstrahlten Bereichen ist die Verhinderung der Erkennung von Codes im betroffenen Teil der Oberfläche. Überstrahlte Bereiche erscheinen am Kamerabild rein weiß, unabhängig von den aktuell aufgesetzten Tokens. Dabei ist es unwesentlich, dass externe Lichtquellen von Tokens teilweise verdeckt werden – die Überstrahlungseffekte beeinflussen den adaptiven Erkennungsalgorithmus negativ und verhindern so trotzdem eine Erkennung. Von Seiten der Interpretationsschicht können keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden, da auch über die Zeit hinweg im Normalfall keine Daten vorliegen, aus denen der Systemzustand im Falle von Fehlerkennungen extrapoliert werden könnte. Softwareseitig ist damit nur eine Beeinflussung über die Kalibrierungsparameter des ReacTIVision-Frameworks möglich. Auch hier ist der Spielraum insofern eingeschränkt, als dass eine Veränderung der Signalverstärkung keine Verbesserung bringt, da überstrahlte Bereiche bereits den Bilderfassungsschip der Kamera übersteuern und damit im betroffenen Bereich keine Information vorhanden ist, die durch Reduzierung der Bildverstärkung sichtbar gemacht werden könnte. Der einzige Parameter, dessen Veränderung in diesem Zusammenhang sinnvoll ist, ist die Blendenöffnung der Kamera. Durch Schließen der Blende fällt weniger Licht auf den Sensorchip – das Bild wird dunkler. Jedoch werden auch nicht überstrahlte Bereiche abgedunkelt, was die Erkennung von Codes in diesen Teilen der Oberfläche schwieriger macht. Hier kann wiederum eine Erhöhung der Signalverstärkung Abhilfe schaffen, die aber exakt mit den Grenzwerten der Erkennbarkeit in den ehemals überstrahlten Bereichen abgestimmt werden muss.

Ein zweites Problem, dass bei nicht vollkommen überstrahlten Bereichen auftreten kann, ist das zuvor bereits beschriebene „Cursorflackern“. Dessen Auftreten liegt in der Funktionsweise des adaptiven Erkennungsalgorithmus von ReacTIVision begründet, der in Bereichen mit geringem Kontrast (wie es nicht vollkommen aber beinahe überstrahlte Bereiche sind) auf geringe Strukturunterschiede im Bild relativ stark reagiert. Als Gegenmaßnahmen kommt auf Seite von ReacTIVision die wiederum die Veränderung der Blende oder der Signalverstärkung in Frage, auf Seiten des Interpretationsmoduls werden die Maßnahmen wirksam, die auch bei herkömmlichen „Cursorflackern“ zum Einsatz kommen (siehe oben).

Bildverzerrungen

Bildverzerrungen werden durch das eingesetzte Objektiv der Kamera ausgelöst. Je größer der Öffnungswinkel des Objektivs, desto höher sind bei Standardobjektiven die Verzerrungseffekte im Randbereich des erfassten Gebietes. Im konkreten

System kommt ein Objektiv mit starkem Weitwinkel zum Einsatz, das die Erfassung der gesamten Oberfläche aus relativ geringem Abstand (und damit geringerer Tischhöhe) ermöglicht. Verzerrungseffekte führen im Normalfall zu einer Fehlpositionierung von Token im Randbereich, da das Kamerabild im Vergleich zur realen Welt gestaucht erscheint. ReacTIVision bietet dazu die Möglichkeit, mit Hilfe eines Kalibrierungs-Musters eine Entzerrungsmatrix zu erfassen, die zur Kompensation dieses Fehlers verwendet werden kann. Da die Bildverzerrung sich zeitlich nicht verändert, ist keine weitergehende Kompensation dieser Fehlerkennung in höheren Softwareebenen (wie dem Interpretationsmodul) notwendig.

Problematischer wird die Bildverzerrung dann, wenn durch sie in den Randbereich soviel Bildinformation (durch die Stauchung des Bildes) verloren geht, dass eine Erkennung von in diesen Randbereichen platzierten Tokens nicht mehr möglich ist. Dies tritt auf, wenn die Stauchung so stark wird, dass die schwarzen und weißen Bereich des Codes nicht mehr trennscharf voneinander zu unterscheiden sind und ineinander fließen. Je kleiner der Code im Bild dargestellt ist (also je weiter entfernt er ist, je kleiner er physisch ist oder je geringer die Kameraauflösung ist), desto eher tritt dieser Effekt auf. Da im gegebenen System sowohl die Entfernung zwischen Kamera und Oberfläche als auch die Kameraauflösung vorgegeben sind, ist der einzige zu variierende Faktor die physische Größe des Codes. Diese wird jedoch von den Dimensionen der Tokens bestimmt, die im konkreten System im Interesse der Handhabbarkeit der Modellierungselemente eher gering gewählt wurden. Der nicht erkennbare Bereich kann nur durch Einsatz einer höher auflösenden Kamera oder durch größere Tokens erschlossen werden. Im ersten Fall würde der Auswerteaufwand und damit die notwendige Rechenleistung massiv erhöht, im zweiten Fall wird die Handhabbarkeit negativ beeinflusst und die Anzahl der gleichzeitig einsetzbaren Tokens reduziert. Softwareseitig kann aufgrund der fehlenden Information in den Quelldaten keine Kompensation vorgenommen werden.

4.4.3. Erkennung von Markierungen und Verbindungen

Wie im Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 beschrieben, werden ReacTIVision-Cursor verwendet, um eine oder mehrere Elemente auf der Tischoberfläche im Zuge eines Interaktionsablaufs zu markieren. ReacTIVision-Cursor sind helle, kreisrunde Bildbereiche eines bestimmten Durchmessers. Diese Bildbereiche können durch Marker erzeugt werden, in dem ein leerer weißer Kreis von einem schwarzen Ring umschlossen wird. Alternativ erzeugt auch das Aufsetzen von Fingern derartige Bereiche auf der Oberfläche, wodurch grundsätzlich die Realisierung eines (Multi-)Touch-Displays möglich wäre. Da durch variierende Fingergrößen und verschiedene Arten des Aufsetzens des Fingers (und damit verschiedenen Abdrücken auf der Oberfläche) bei unterschiedlichen Modellierern die Erkennung von Fingern nur teilweise

4. Eingabe und Interpretation

stabil und zuverlässig funktioniert, wurde im konkreten System die Marker-Variante zur Realisierung von Cursors gewählt. Diese ist aufgrund der definierten Größe des hellen Bildbereichs und der damit einhergehenden exakteren Konfigurierbarkeit auch unempfindlicher gegenüber Störungen.

Im Gegensatz zu vollwertigen ReacTIVision-Markern, die ein Token zu jedem Zeitpunkt eindeutig identifizieren, können mehrere gleichzeitig eingesetzte Cursor grundsätzlich nicht unterschieden werden (da sie alle den gleichen Code aufweisen). ReacTIVision löst dieses Problem, indem für Cursor eine nach der Reihenfolge des Auftretens vergebene eindeutige Session-ID zugeordnet wird, der einen Cursor bis zum Zeitpunkt des Verschwindens eindeutig identifiziert (diese Session-ID wird im übrigen auch vollwertigen Markern zugeordnet, hat aber in der hier vorgestellten Anwendung keine Bedeutung). Potentiell problematisch ist die Zuordnung einer Session-ID zu einem Cursor dann, wenn die Beleuchtungsbedingungen schlecht sind, so dass das Cursor-Token nicht durchgängig erkannt wird. In diesem Fall wird bei jeder (Wieder)-Erkennung des betreffenden Tokens eine neue Session-ID zugeordnet, was gleichbedeutend mit dem auftreten eines neuen Cursors ist. Zur Compensation können die bereits beschriebenen Mechanismen eingesetzt werden, vor allem das Ignorieren von zeitnah nach dem Verschwinden eines Cursors auftretenden neuen Cursors an exakt der gleichen Position verhindert derartige Fehlerkennungen weitgehend.

Wird ein Cursor-Token auf der Oberfläche aufgesetzt und von ReacTIVision erkannt, beginnen die in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen Prozesse zur Stabilisierung der Erkennungsleistung zu laufen. Sobald der Cursor entsprechend lange stabil auf der Oberfläche erkannt wird, so dass eine Fehlerkennung weitgehend ausgeschlossen werden kann, wird im Umkreis der Cursorposition (Radius etwa 5 Zentimeter) nach aktuell auf der Oberfläche vorhandenen Modellierungs-Tokens gesucht. Das dem Cursor am nächsten liegende Token wird ausgewählt (insofern es innerhalb der Grenze von 5 Zentimetern liegt). Den Benutzern wird diese Auswahl über die Ausgabekanäle rückgemeldet. Damit ist der Markierungsvorgang grundsätzlich abgeschlossen. Nach dem Ablauf von drei Sekunden wird die Markierung gelöscht, sofern nicht andere Aktivitäten durch die Benutzer gesetzt wurden, die das markierte Modellelement verwenden (etwa Benennung des Elements oder das Verbinden mit anderen Elementen).

In der Verarbeitung von Cursor sind noch zwei Spezialfälle zu betrachten, die im Kontext der Herstellung von Verbindungen auftreten. Im ersten Fall muss das Auftreten von zwei Cursors erkannt werden, die die zu verbindenden Modellelemente markieren. Eine Verbindung wird dann hergestellt, wenn die beiden Cursor innerhalb von 3 Sekunden jeweils in der Nähe eines Modellierungs-Tokens erkannt werden. Die grundlegende Erkennung einer Markierung läuft für beide Cursor wie im letzten Absatz beschrieben ab. Zusätzlich wird nach jeder erkannten Markierung

geprüft, ob auf der Oberfläche eine weitere aktive Markierung vorhanden ist (also eine, die in den letzten drei Sekunden gesetzt wurde). Ist dies der Fall und wird die andere Markierung nicht bereits für andere Zwecke (z.B. einen gerade laufenden Benennungsvorgang) verwendet, werden beide Markierungen gelöscht und anstelle derer eine Verbindung zwischen den markierten Modellelementen eingefügt. Der zweite Spezialfall ist die Erkennung von gerichteten Verbindungen, also das Auftreten von Werkzeug-Tokens, die einen Verbindungsrandpunkt mit Pfeilspitze kennzeichnen. Wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, unterscheiden sich diese Tokens von den anderen Markierungstokens durch einen zweiten Cursor-Marker, der unmittelbar neben dem ersten angebracht ist. Tritt nun ein zweiter Cursor auf der Oberfläche auf, der sich nahe eines bereits erkannten Cursors befindet (die Benachrichtigung über Erkennung erfolgt ereignisgesteuert und damit sequentiell, auch wenn beide Cursor-Marker gleichzeitig auf der Oberfläche auftreten), muss die bereits erstellte Markierung für das nächstliegende Modellierungs-Token semantisch umgedeutet werden und von einem Endpunkt einer ungerichteten Verbindung auf den einer gerichteten Verbindung konvertiert werden. Softwareseitig erfolgen die betreffenden Prüfungen im jenem Algorithmus, der auch die Herstellung von Verbindungen prüft. Wenn also ein Cursor auf der Oberfläche auftaucht, wenn gleichzeitig schon ein weiterer aktiver Cursor vorhanden ist, wird vor neben den oben beschriebenen Prüfungen zur Verbindungsherstellung auch eine Prüfung auf Nähe zu bereits vorhandenen Cursoren durchgeführt und ggf. die Markierung des betroffenen Modellelements umgewandelt. Diese Veränderung der Markierung wird auch den Benutzern über die Ausgabekanäle visuell kommuniziert.

4.4.4. Erkennung von geöffneten Tokens

In den Abschnitten 4.2.2 und 4.3.5 wurde bereits die Erkennung des Öffnungszustandes eines Modellierungs-Tokens konzeptuell beschrieben. Diese wird durch das Kamerasystem und ReacTIVision festgestellt. Dazu ist auf der beweglichen Rückwand der Modellierungs-Tokens ein ReacTIVision-Code angebracht, der beim Öffnen auf der Modellierungsoberfläche zu liegen kommt und dadurch von der Kamera erfasst wird. Technisch sind dazu eine strukturelle Maßnahme und die Implementierung einer entsprechenden Interpretationsroutine notwendig.

Die strukturelle Maßnahme betrifft die Erkennung des auf der Rückwand angebrachten ReacTIVision-Codes. Aufgrund der geringen Größe der Rückwand (10 cm x 4 cm) kann kein herkömmlicher ReacTIVision-Code in ausreichender Größe angebracht werden. ReacTIVision erlaubt jedoch wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben die Erstellung von eigenen Codes beliebiger Form. Die abgebildete Code-Topologie muss lediglich im Mapping-File vermerkt werden, um eine Abbildung auf einen eindeutigen Identifikationsnummer zu ermöglichen. Wie in Abbildung XY (FOTO

4. Eingabe und Interpretation

VON RÜCKWNAD WEITER OBEN) zu erkennen ist, wurde diese Möglichkeit im vorliegenden Fall genutzt. Auf den Rückwänden der Modellierungs-Tokens ist ein einfacher, langer Code angebracht, dessen Identifikationsnummer im Interpretationsmodul die Routinen zur Beeinflussung des Öffnungszustands eines Tokens aufruft.

Im Interpretationsmodul wird beim Eingehen der Meldung über das Auftauchen eines entsprechenden Markers dessen Position in Relation mit den Positionen der auf der Modellierungsoberfläche vorhandenen Modellierungs-Tokens gesetzt. Da auf allen Tokens die gleichen Marker zur Identifikation des Öffnungszustands angebracht sind, muss das betroffene Token über die Nähe zum erkannten Marker identifiziert werden. Befindet sich also der Marker eines Modellierungstokens in unmittelbarer Nähe zum aufgetauchten Token (Radius etwa 2,5 cm), so wird dessen Zustand auf „offen“ gesetzt. Befinden sich mehrere Modellierungs-Tokens in diesem Radius, was bei sehr eng gesetzten Modellen möglich ist, so wird das nächstliegende ausgewählt (außer in einigen seltenen Ausnahmekonstellationen ist das jenes Token, zu dem der erkannte Öffnungs-Marker gehört). In der Weiterverarbeitung wird das betreffende Modellelemente repräsentierende Objekt (im objektorientierten Sinn) über die Änderung seines Öffnungszustandes benachrichtigt. Dieses wechselt seinen Zustand und löst visuelles Feedback über die Ausgabekanäle aus. Außerdem reagiert es nun auf Anfragen bezüglich der Einbettung von Zusatzinformation bzw. deren Abruf.

Sobald das Öffnungs-Token wieder von der Oberfläche verschwindet (das zugehörige Modellierungs-Token also geschlossen wurde), wird im Umkreis des verschwundenen Markers nach nach geöffneten Modellierungs-Tokens gesucht. Das am nächsten liegende Element wird geschlossen, was wiederum durch eine entsprechende Benachrichtigung des das Modellelement repräsentierende Objekt realisiert wird. Grundsätzlich könnte eine Zuordnung zwischen Öffnungs-Marker und Modellierungs-Token auch über die Session-ID des Öffnungs-Markers durchgeführt werden, die im Öffnungsvorgang dem entsprechenden Modellierungs-Token zugeordnet werden könnte. Von dieser Vorgehensweise wurde jedoch Abstand genommen, da im Falle von Fehlerkennungen des Öffnungs-Markers (kurzfristige Ausfälle, die zur Zuweisung einer anderen Session-ID führen) zu Zuordnung nicht mehr korrekt vorgenommen werden kann. Deshalb wurde ein zustandsloser („state-less“) Algorithmus eingesetzt, der durch die erneut durchgeführte Suche nach dem betroffenen Modellierungs-Token nicht von einer früher gespeicherten Session-ID abhängig ist.

Einbetten und Abrufen von eingebetteter Information

Im Zusammenhang mit der Erkennung von geöffneten Tokens kann auch die softwareseitige Behandlung von eingebetteter Information beschrieben werden. Diese wurde

konzeptuell bereits in Abschnitt 4.3.5 beschrieben. Anhand der nun folgenden Beschreibung aus software-technischer Sicht kann erstmals auch die Einbindung der Registrierungs-Kamera beschrieben werden.

Die Registrierungskamera dient in diesem Kontext der Erkennung von einbettbaren Tokens, wobei bei der Erkennung drei Fälle unterschieden werden müssen (in Klammer jeweils die Bedingungen, die zur Auswahl eines der Fälle führen):

1. Information anbinden (noch keine Information angebunden)
2. Token einbetten (Information angebunden, Token noch nicht eingebettet, Container-Token geöffnet)
3. Information abrufen (Information angebunden, Token noch nicht eingebettet oder Token eingebettet und Container-Token geöffnet)

Technisch können Fall 1 und 2 auch gleichzeitig auftreten, wenn Information an ein Token gebunden wird, während gleichzeitig ein Container-Token geöffnet wird. In diesem Fall erfolgt die Einbettung unmittelbar nach dem Anbinden der Information.

Software-seitig beginnt der Prozess der Behandlung eines einbettbaren Tokens immer gleich mit dem Schritt der Erfassung des einbettbaren Tokens durch die Registrierungskamera. Diese ist konzeptuell als weiterer Eingabekanal zu sehen, die wie die Hauptkamera Daten an das Interpretationsmodul liefert (siehe Abbildung 4.18), die dieses kontextsensitiv (also abhängig vom aktuellen Modellzustand) auswerten muss. Das Signal der Registrierungskamera wird von einer zweiten ReacTIVision-Instanz aufgenommen und ausgewertet. Diese ist mittels eines Brückenobjekts an das Interpretationsmodul angebunden. Dieses Brückenobjekt nimmt eine Vorauswertung statt und liefert bereits höherwertige Information an das Interpretationsmodul. So ist jegliche Benutzerinteraktion, die nicht unmittelbar Information über den aktuellen Modellzustand benötigt, in diesem Objekt gekapselt (z.B. das Anbinden digitaler Information an ein einbettbares Token). Interaktion, die verteilt über die Registrierungskamera und die Tischoberfläche abläuft, wird an definierten Schnittstellen an das zuständigen Komponenten im Interpretationsmodul übergeben.

Im konkreten Fall bedeutet dies, dass nach der Erfassung des Tokens durch die Registrierungskamera die oben getroffene Fallunterscheidung wirksam wird, die – wie eben angedeutet – je nach Art des einbettbaren Tokens noch zusätzliche Unterscheidungen erfährt. Bei Tokens an die noch keine Information gebunden wurde, wird diese zusätzliche Unterscheidung wirksam. Bei blauen einbettbaren Tokens wird eine Auswahlbox geöffnet, mittels der eine anzubindende digitale Ressource im lokalen Dateisystem ausgewählt werden kann. Ein gelbes Token löst die Aufnahme eines Fotos aus. Dieses wird wiederum im lokalen Dateisystem gespeichert und

an das Token gebunden. Diese beiden Arten werden vollständig im Brückenobjekt abgehandelt, den übrigen Komponenten wird lediglich ein Datenobjekt übergeben, das der Weiterverarbeitung (also z.B. der eigentlichen Einbettung) dient. Die Behandlung eines roten Tokens kann nicht im Brückenobjekt verarbeitet werden, da es der Speicherung von Submodellen dient und dementsprechend auf Information über den aktuellen Modellzustand auf der Modellierungsoberfläche angewiesen ist. Ein rotes Token löst deshalb einen Modellerfassungsvorgang wie in Abschnitt 4.4.7 weiter unten beschrieben aus. Das erfasste Submodell wird danach an das rote Token gebunden.

Ist bereits Information an ein Token gebunden, kann die Erfassung durch die Registrierungskamera der Startpunkt für die Fälle 2 oder 3 sein. Fall 2 tritt dann ein, wenn das einbettbare Token noch keinem Container zugeordnet ist und ein Container geöffnet ist. In diesem Fall wird das Objekt, das die einzubettende Information repräsentiert, an das Modell-Objekt des Container-Tokens übergeben und ab diesem Zeitpunkt von diesem verwaltet. Die erfolgreiche Zuordnung wird über die Ausgabekanäle visuell rückgemeldet, das Token kann in der Folge auch physisch eingebettet werden (siehe Abschnitt 4.3.5). Fall 3 tritt ein, wenn entweder kein Container geöffnet ist oder das betreffende Token bereits einem Container zugeordnet ist. Hier tritt wiederum die Unterscheidung nach Art des einbettbaren Tokens in Kraft. Bei roten Token wird der gespeicherte Modellzustand über die Ausgabekanäle dargestellt. Bei gelben oder blauen Tokens wird die angebundene digitale Ressource – wenn möglich – mittels der Standardapplikation des Betriebssystems, die dem betreffenden Dateitypen zugeordnet ist, geöffnet und dargestellt.

4.4.5. Benennung von Modellelementen

Abschnitt 4.3.2 beschreibt die zur Benennung von Modellelementen und Verbindungen notwendige Interaktion. Wie dort angegeben, existieren zwei Eingabemodalitäten für diese Funktionalität, die sich in ihrer technischen Umsetzung stark unterscheiden. Gemeinsam ist beiden, dass sie die angegebene Benennung dem jeweils markierten Element zuweisen. Ist aktuell kein Modellierungs-Token markiert, wird die Benennung dem zuletzt hinzugefügten Token zugeordnet. Die Verwaltung der Benennung obliegt dem Modellobjekt – sie wird jedoch auch im Interpretationsmodul zwischengespeichert, um die letzte Benennung eines zwischenzeitlich von der Modellierungsoberfläche entfernten Objekts (dessen digitale Repräsentation bereits entfernt wurde) wiederherstellen zu können. Dies ist notwendig, um die Wiederherstellung von eingebetteten Submodellen gewährleisten zu können, dessen Modellierungstokens sich während der Modellerstellung auf einer anderen Ebene nicht auf der Oberfläche befinden.

Benennung mittels Tastatur

Die Benennung mittels Tastatur ist die einzige Interaktion mit den Benutzern, die die Verwendung derselben benötigt. Um die Eingabe trotz des „Medienbruchs“ möglichst nahtlos zu gestalten, wurde Möglichkeit geschaffen, nach der Auswahl eines Modellierungs-Tokens ohne weitere Interaktion über die graphische Benutzungsschnittstelle des Systems mit der Eingabe beginnen zu können. Mit dem ersten Tastendruck öffnet sich am Bildschirm eine Eingabemaske, mittels der die Benennung durchgeführt werden kann. Eine Bestätigung mit der Eingabe-Taste schließt die Eingabemaske und weist die Benennung dem ausgewählten Element zu. Beginnt ein Benutzer ohne vorhergehender Auswahl mit der Informationseingabe, so wird diese dem zuletzt hinzugefügten Element (Modellelement oder Verbinder) zugewiesen.

Technisch ist die Eingabe mittels einem KeyListener implementiert, der das Beobachtermuster (Gamma et al., 1995) in Java in Bezug auf Tastatureingaben benachrichtigt. Das Interpretationsmodul wird also über jeden Tastendruck informiert und muss über dessen Auswirkungen entscheiden. Ist der Tastendruck nicht dem Systemkonfigurationsmodus (siehe Abschnitt 5.4.1) zuzuordnen, wird die Eingabemaske aktiviert, die dann alle weiteren Tastatureingaben abfängt, bis sie wieder geschlossen wird. Die Eingabe wird in der Folge an die zuständigen Komponenten bzw. das betroffene Modell-Objekt zur Weiterverarbeitung übergeben.

Benennung mittels Haftnotiz

Die Benennung mittels Haftnotiz ermöglicht die handschriftliche Benennung eines Modellelements oder Binders. Technisch wird sie über die Registrierungskamera abgewickelt. Die Haftnotiz muss dazu beschriftet werden und in der Folge mittels dem Registrierungstoken (siehe Abschnitt 4.2.2) der Registrierungskamera zur Verfügung gestellt. Die Erkennung des Registrierungstokens löst die Aufnahme eines Bildes aus, aus dem in weiterer Folge die Beschriftung extrahiert wird. Dazu sind am Registrierungstoken zwei ReacTIVision-Marker angebracht, die an definierten Positionen links und rechts von der Haftnotiz sitzen. Durch diese beiden bekannten Position ist eine Ausrichtung des Bildes möglich, so dass sich die Haftnotiz an einer definierten Position befindet, an der sie schließlich ausgeschnitten wird. Dazu ist es notwendig, das Bild soweit zu rotieren, dass sich die beiden Marker auf einer horizontalen Achse befinden und der physisch linke Marker links im Bild dargestellt wird. Danach wird das Bild soweit skaliert, bis der Abstand der beiden Marker einem vorab definierten Wert entspricht. Damit sind die Ausmaße der Haftnotiz in horizontaler und vertikaler Richtung bekannt. Wird das Bild nun soweit verschoben, dass sich die beiden Marker an vordefinierten Positionen befinden, kann auch die Haftnotiz im Bild lokalisiert werden. Durch einen Ausschneidevorgang wird die

Haftnotiz extrahiert. Das Bild wird nun mit einem adaptiven Algorithmus in eine Schwarz-Weiß-Grafik umgewandelt. Der Algorithmus identifiziert dazu die hellsten Bereiche (die Haftnotiz) und die dunkelsten Bereiche (der Schriftzug) im Bild. Die hellsten Bereiche werden weiß, die dunkelsten Bereiche werden schwarz gesetzt. Die dazwischenliegenden Werte mittels einem Schwellwert der bei $2/3$ der Differenz zwischen hellstem und dunkelstem Wert liegt, auf weiß oder schwarz gesetzt. Das Resultat wird den weiterverarbeitenden Komponenten als Pixelgrafik zur Verfügung gestellt (wie bei der Benennung mittels Tastatur). Durch die Bildverarbeitung ist die Position des Registrierungstokens im Bild der Registrierungskamera irrelevant, da diese weitgehend kompensiert werden können. Durch die adaptive Umrechnung in eine Schwarz-Weiß-Grafik kann diese Art der Benennung auch bei schlechten Beleuchtungsbedingungen eingesetzt werden.

4.4.6. Festlegung der Bedeutung von Modellelementen

Durch die Möglichkeit der Festlegung der Bedeutung eines bestimmten Modelltyps (siehe Abschnitt 4.3.1) wird die Forderung nach semantisch flexibler Modellierung umgesetzt. Die Arten von Modellelementen sind semantisch nicht vorbelegt sondern werden während des Modellierungsvorgangs spezifiziert. Die Frage nach der Angabe des Bedeutungstyps wird ausgelöst, wenn eine Tokenart erstmals auf der Oberfläche erkannt wird. Über eine Eingabemaske und die Tastatur kann dann die Bedeutung textuell eingegeben werden. Wird dieser Vorgang von den Benutzern abgebrochen, besteht die Möglichkeit die aktive Nachfrage bezüglich der Bedeutungszuordnung für den laufenden Modellierungsvorgang auszuschalten, um im Erstellungsprozess nicht unterbrochen zu werden. Die Bedeutungszuordnung kann aber immer ausgelöst werden, wenn ein Token in den Erfassungsbereich der Registrierungskamera gehalten wird. Das System fragt dann nach der Zuordnung der Bedeutung zum jeweiligen Elementtypen.

Auf den Modellierungsvorgang selbst hat die Festlegung der Bedeutung technisch keine Auswirkungen. Für die Persistierung des Modells ist sie jedoch von Bedeutung, da neben dem eigentlichen Modell auch das Metamodell (und damit die Arten von verwendeten Modellelementen und deren Bedeutung) gespeichert werden (siehe Kapitel XY).

4.4.7. Tracking des Modellzustandes

Das Tracking des Modellzustandes läuft von den Benutzern unbemerkt immer im Hintergrund, kann jedoch auch explizit mit dem Snapshot-Token ausgelöst werden. Auch die Speicherung von Submodellen auf einbettbare Token greift auf die glei-

chen Routinen zurück. Die Speicherung von stabilen Modellzuständen basiert auf der Verfolgung des Zeitpunkts der letzten Änderung im Modell. Dazu wird ein Zeitsstempel mitgeführt, der bei jeder Modelländerung aktualisiert, also auf die aktuelle Systemzeit gesetzt wird. Änderungen sind das Platzieren, Verschieben oder Entfernen von Modellierungs-Tokens, das Herstellen oder Löschen einer Verbindung, das Benennen eines Modellelements oder einer Verbindung und das Einbetten von Zusatzinformation. In regelmäßigen Abständen wird durch einen Timer ausgelöst geprüft, wieviel Zeit seit der letzten Modelländerung vergangen ist. Sind mehr als fünf Sekunden vergangen, wird der aktuelle Systemzustand gespeichert und die Prüfung gestoppt, bis die nächste Änderung auftritt. Damit wird verhindert, dass in von langen Phasen ohne Änderung mehr als eine Aufnahme angefertigt wird.

Bei der Speicherung des Modellzustandes (egal ob automatisiert oder explizit ausgelöst) wird eine Kopie der digitalen Modellrepräsentation angefertigt. Diese beinhaltet im Sinne einer „Deep Copy“ Kopien aller Informationen die im Modell abgelegt sind, so dass keine Referenzen mehr auf das aktuelle Modell zeigen. Damit wird sichergestellt, dass laufende Änderungen am Modell keine Auswirkungen auf den gesicherten Zustand haben. Technisch wurde dies gelöst, indem die „clone“-Methode aller datentragenden Objekte (Modellobjekte und Verbindungsobjekte) so überladen wurden, dass sämtliche referenzierten Objekte (etwa Benennungen, eingebettete Objekte, ...) dupliziert werden und im kopierten Objekt Referenzen auf die erstellten Duplikate eingefügt werden. Dieses Vorgehen ist bei großen Modellen und langer Modellierungszeit durchaus speicherintensiv und bedarf einer ausreichenden Größe des Heaps (der ggf. durch Kommandozeilen-Parameter beim Start des Systems angepasst werden muss).

Navigation in der Modellierungshistorie

Die Navigation in der Modellierungshistorie wird mittels des in den Abschnitten 4.2.2 und 4.3.6 beschriebenen runden Tokens durchgeführt. Die Erkennung der Rotation erfolgt durch den von ReacTIVision übergebenen Rotationswert des Tokens, der in Radian geliefert wird. Das Interpretationsmodul schaltet dementsprechend bei jeweils bei Vielfachen von $\frac{\pi}{4}$ (also alle 45°) einen gespeicherten Schritt weiter oder zurück (je nach Drehrichtung).

Zur Verwaltung der Modellierungshistorie wird ein Objekt benutzt, das alle gespeicherten Zustände in der Reihenfolge ihrer Speicherung referenziert, den aktuell ausgewählten Zustand speichert und den Abruf von sowie die Navigation durch die gespeicherten Zustände ermöglicht. Dieses Objekt wird durch das Interpretationsmodul kontrolliert und gesteuert – für übergeordnete Software-Module ist das Umschalten zwischen dem aktuellen Modellzustand und einem gespeicherten Zustand transparent. Das Format, in dem die gespeicherten Zustände ausgeliefert wer-

den, entspricht jenem in dem auch die aktuellen Modell-Daten verwaltet werden – dadurch wird auch das Umschalten auf einen gespeicherten Zustand im Zuge einer Wiederherstellung einer vergangenen Modellversion erleichtert.

Wiederherstellung eines Modellzustandes

Der Ablauf der Wiederherstellungsunterstützung wird – wie in Abschnitt 4.3.6 bereits erwähnt – erst in Kapitel XY im Detail beschrieben, da er vorrangig die Ausgabekanäle betrifft. Da die Modellierungshistorie jedoch im Interpretationsmodul angesiedelt ist und der Vorgang der Wiederherstellung auch durch dieses ausgelöst wird (nach Erkennung des entsprechenden Tokens), werden die technischen Details hier besprochen.

Im Zuge der Wiederherstellungsunterstützung müssen die Unterschiede zwischen dem aktuellen Modell und wiederherzustellenden gespeicherten Zustand erkannt werden, um die Benutzer schrittweise bei der Wiederherstellung anleiten zu können. Da nur die physischen Bausteine durch den Benutzer manipuliert werden müssen, beschränkt sich die Differenzbildung zwischen den Modellen auf diese. Rein digitale Information – wie die Verbinder – können am Ende des Wiederherstellungsvorgangs geladen und über die Ausgabekanäle dargestellt werden. Bei den physischen Bausteinen, also im wesentlichen den Modellierungs-Tokens sind im ersten Schritt drei Fälle zu unterscheiden:

- Tokens, die im aktuellen Modell enthalten sind und im wiederherzustellenden Modell nicht vorhanden waren
- Tokens, die sich im aktuellen Modell an einer anderen Position befinden als im wiederherzustellenden Modell
- Tokens, die im aktuellen Modell nicht vorhanden sind, im wiederherzustellenden Modell aber vorhanden waren

Im ersten und dritten Fall reicht für die Erkennung eine Differenzbildung zwischen den beiden Modellobjekt-Mengen aus, wobei im ersten Fall die Menge der wiederherzustellenden Modellobjekte von der aktuellen Menge der Modellobjekt abgezogen werden muss um die zu entfernenden Tokens zu identifizieren, im dritten Fall umgekehrt die Menge der aktuellen Modellobjekte von der Menge der wiederherzustellenden Modellobjekte abgezogen wird um die hinzufügenden Tokens zu identifizieren. Im zweiten Fall muss für jedes Token dessen aktuelle und gespeicherte Position verglichen werden, um die zu verschiebenden Tokens zu identifizieren. Zusätzlich muss noch der Inhalt der Tokens (also deren eingebetteten Tokens) abgeglichen werden, um auch hier Differenzen identifizieren zu können.

Zur Abhandlung der Wiederherstellungsunterstützung wird das System in einen speziellen Zustand geschalten, in dem es aufgabengesteuert arbeitet. Jede vorzu-

nehmende Änderung im Modell wird auf eine Aufgabe abgebildet. Eine Aufgabe ist ein spezielles Objekt, das neben der vorzunehmenden Änderung auch eine Methode enthält, die prüft, ob die Aufgabe erfolgreich abgeschlossen wurde (wobei die Bedingungen von der konkreten Aufgabe abhängen). Befindet sich das System im Wiederherstellungsmodus, wird bei jeder von ReacTIVision gemeldeten Änderung auf der Modellierungsoberfläche geprüft, ob mit dieser Änderung die Aufgabe erfüllt wurde. Ist dies nicht der Fall, bleibt die Aufgabe aktiv. Wurde die Aufgabe erfüllt, wird durch einen erneuten Vergleich zwischen Ist- und Soll-Zustand die nächste Aufgabe identifiziert und aktiv gesetzt. Dazu wird entsprechendes Feedback auf den Ausgabekanälen ausgegeben. Sobald Ist- und Soll-Zustand gleich sind, werden die rein digitalen Daten geladen, womit das aktuelle Modell dem gespeicherten Zustand vollständig entspricht.

4.4.8. Verteilung des Modellzustandes

Die Verteilung der darzustellenden Modellinformation an die übergeordneten Softwaremodule ist Gegenstand des letzten Abschnitts in diesem Kapitel. Die interpretierten und aggregierten Informationen werden jenen Softwaremodulen zur Verfügung gestellt, die bisher in ihrer Gesamtheit als „Ausgabekanäle“ bezeichnet wurden. Diese Ausgabekanäle sind in der vorgestellten Anwendung mehrere grafische Oberflächen, die den Systemzustand visuell wiedergeben (siehe dazu Details in Kapitel 5). Wichtig im Kontext dieses Kapitels ist dabei, dass die Ausgabekanäle frei definierbar und erweiterbar sein sollen. Um dieser Anforderung auch vor dem Einsatz eines Frameworks wie TUIpist gerecht zu werden, wurde eine Verteilungskomponente implementiert, die auf dem bereits oben mehrmals erwähnten Besuchermuster von Gamma et al. (1995) basiert. Dabei registrieren sich Ausgabekanäle beim Interpretationsmodul und werden danach über eine definierte Schnittstelle mit der entsprechenden Modellinformation versorgt. Die Schnittstelle ist Teil des Interpretationsmoduls und muss von jedem Ausgabekanal vollständig implementiert werden, auch wenn dieser die betreffende Information nicht benötigt (in diesem Fall bleibt die ausgabeseitig aufgerufene Methode leer). Eine Verteilung der Ausgabekanäle ist im implementierten Prototypen nicht vorgesehen, da diese Funktionalität von dem noch einzufügenden generischen Framework transparent zur Verfügung gestellt wird.

4.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde jener Teil des Werkzeugs im Detail beschrieben, der sich mit der Erfassung und der Interpretation der Benutzereingaben beschäftigt. Im ers-

4. Eingabe und Interpretation

ten Teil wurden in Frage kommende technologische Ansätze zur Erfassung der Benutzeraktivität betrachtet und einander gegenübergestellt. Nach der Entscheidung für den Einsatz eines optischen Ansatzes wurden für diesen Zweck geeignete Frameworks betrachtet. Dabei wurden Framework zur optischen Identifikation von physischen Tokens sowie generische Frameworks, die als Middleware für Tabletop Interfaces geeignet sind, beschrieben und verglichen. Die Entscheidung fiel hier zugunsten ReacTIVision (Kaltenbrunner und Bencina, 2007) als optisches Erkennungsframework und TUIpist (Furtmüller und Oppl, 2007) als Middleware.

Im zweiten Teil wurde die Umsetzung des Hardwarekomponenten beschrieben, die maßgeblich von den zuvor getroffenen Technologie-Entscheidungen abhängig ist. Dabei wurde die Infrastruktur des Werkzeugs beschrieben (der „Tisch“), wobei in diesem Kapitel der Fokus auf jenen Komponenten lag, die die Erfassung von Benutzerinteraktion dienen. Zusätzlich wurden die eigentlichen Tokens, mit denen die Benutzer mit dem System interagieren, beschrieben. Hier ist zwischen Modellierungs-Tokens und Werkzeug-Tokens zu unterscheiden, wobei erstere der eigentlichen Modellbildung dienen und zweitere das Systemverhalten kontrollieren.

Die eigentliche Interaktion der Benutzer mit dem System ist Gegenstand des dritten Teils. Hier wurde die Verwendung der Tokens bei der Modellbildung und zur Steuerung des Systems skizziert und damit jene Interaktionsablauf definiert, die vom System erkannt und korrekt interpretiert werden müssen. Die Unterabschnitte dieses Teils entsprechen im Wesentlichen den Anforderungen, die die das Werkzeug erfüllen muss, und beschreiben deren Umsetzung.

Nach der Definition der Interaktionsabläufe konnte im vierten Teil die software-technische Behandlung der durch das ReacTIVision-Framework erkannten Eingabedaten beschrieben werden. Die ersten beiden Abschnitt behandeln allgemein die Systemarchitektur und der Kompensation eventueller Erkennungsprobleme der Tokens auf der Modellierungsoberfläche. Zweiteres ist notwendig, weil optische Frameworks generell sensibel auf Änderung der Beleuchtungsbedingungen reagieren und es dementsprechend zu (temporären) Fehlfunktionen bei der Erkennung kommen kann. Dazu wurden die möglichen Fehlerquellen aufgelistet und die umgesetzten sowie außerdem mögliche Kompensationsansätze beschrieben. In den übrigen Abschnitten wird die software-technische Erkennung und Behandlung der im vorhergehenden Teil definierten Interaktionsabläufe beschrieben. Der Fokus lag hier auf den konzeptuellen Implementierungsdetails und der Beschreibung der Lösung spezifischer Herausforderungen, die durch die gewählte Technologiekonstellation auftreten. Im letzten Abschnitt von Teil 4 wurde als Brücke zu den weiteren Kapiteln jene Komponente beschrieben, die für die Verteilung der Information an die weiterverarbeitenden Software-Module zuständig ist.

5. Ausgabe

In diesem Kapitel wird die konzeptuelle Ausrichtung und technische Umsetzung jenes Teils des Werkzeugs behandelt, der sich mit der Ausgabe von Information an die Benutzer beschäftigt. Im Bereich der Tangible Interface erfolgt die Ausgabe von Information zumeist kohärent mit dem Eingabemedium, eine physische Trennung zwischen Eingabe- und Ausgabekanälen wie in der herkömmlichen Mensch-Maschine-Interaktion liegt nicht vor (Ullmer und Ishii, 2000). Fishkin (2004) relativiert die strikte Forderung in seiner Taxonomie für Tangible Interfaces (wie in Abschnitt 3.2.9 beschrieben und klassifiziert Benutzungsschnittstellen unter anderem nach dem Grad deren Ein- und Ausgabe-Kohärenz. Dementsprechend sind nicht nur jene Ausgabekanäle Gegenstand dieses Kapitels, die Information in direkter Verbindung mit den Eingabemedien zurückspiegeln, sondern auch jene, die Information auf anderen, nicht-kohärenten Wegen ausgeben.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden auf Basis der in Kapitel XY genannten Anforderung an das Werkzeug die den Benutzern mitzuteilenden Informationen identifiziert, noch ohne konkret auf die technologische Realisierung der Ausgabekanäle einzugehen. Im darauf folgenden Abschnitt die technologischen Möglichkeiten zur Ausgabe von Information betrachtet und im Anschluss hinsichtlich ihrer Eignung für die im konkreten Anwendungsfall auszugebende Information bewertet und entsprechend zugeordnet.

Im Anschluss werden auf Basis dieser grundsätzlichen Technologieentscheidung Software-Frameworks beschrieben, die die Realisierung der gewählten Ausgabekanäle ermöglichen. Die Entscheidung für ein konkretes Framework wird auf Basis der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an die Ausgabe und deren Umsetzung getroffen. Der letzte Abschnitt beschreibt die eigentliche Umsetzung der Ausgabekanäle mittels der gewählten Technologie und geht die spezifischen Eigenschaften und Implementierungsentscheidungen der vorgestellten Lösung ein.

5.1. Auszugebende Information

Den Benutzern des Systems müssen während der Modellierung unterschiedliche Information zur Verfügung gestellt werden. Einerseits ist dies Information, die das

Modell selbst betrifft, andererseits muss auch Information ausgegeben werden, die Aspekte des Modellierungsablaufs beschreibt oder unterstützt.

Die das Modell betreffende Information muss folgende Aspekte abdecken:

- Die Modellelemente betreffende Information (Art, Position, Benennung)
- Die Verbinder betreffende Information (Art, Endpunkte, Benennung)
- Einbettete Elemente betreffende Information (Art, Inhalt, Container)

Zur Unterstützung des Modellierungsablaufs müssen folgende Aspekte zur Verfügung gestellt werden:

- Information über vergangene Modellzustände
- Information zur Wiederherstellung von Modellzuständen

Hier wird bewusst noch nicht auf die technische Umsetzung dieser Ausgabe eingegangen. In den folgenden Abschnitten wird erörtert, welche grundlegenden Technologien in Frage kommen, bevor auf Basis deren Eignung und den Vorgaben aus den Technologieentscheidungen zur Informationseingabe eine konkrete Lösung ausgewählt wird.

5.2. Technologische Grundlage der Ausgabe

Bei der Ausgabe von Information muss im Falle von Tangible Interfaces zwischen Ansätzen mit unterschiedlich stark ausgeprägter Kohärenz mit den Eingabekanälen unterschieden werden. Unter Kohärenz ist hier zu verstehen, dass jene Artefakte, die zur Eingabe verwendet werden gleichzeitig auch die Reaktion des Systems – also die Ausgabe – wiederspiegeln. In der von Fishkin (2004) vorgeschlagenen Taxonomie (siehe Abschnitt XY) werden in der Dimension „Embodiment“ auch Werkzeuge als Tangible Interfaces klassifiziert, bei denen die Ausgabe vollständig von der Eingabe entkoppelt ist. Diesem Verständnis folgt auch diese Arbeit.

Bei Tabletop Interfaces bietet sich die Tischoberfläche als Ausgabemedium an, um kohärente Informationsausgabe zu gewährleisten. Die Tischoberfläche dient hier wie in Kapitel 4 beschrieben der Eingabe und kann durch unterschiedliche technologische Maßnahme auch zur Ausgabe genutzt werden. Eine weitere Möglichkeit, die Ausgabekohärenz bei Tabletop Interfaces sicherzustellen bzw. zu steigern, ist die Verwendung der zur Interaktion mit dem System verwendeten Tokens als Ausgabemedium. Je nach verfolgtem Ansatz (bzw. einer Kombination) sind unterschiedliche technische Maßnahmen zu setzen. In den folgenden Abschnitten werden die hier erwähnten grundsätzlich in Frage kommenden Ansätze betrachtet und im Anschluss hinsichtlich ihrer Eignung für das hier entwickelte System beurteilt. Basierend auf

der grundsätzlichen Technologieentscheidung werden im Anschluss unterschiedliche technische Lösungen zur Erfüllung der Anforderungen beschrieben.

5.2.1. Ansätze zur kohärenten Ausgabe

In diesem Abschnitt werden Ausgabeansätze behandelt, die nach (Fishkin, 2004) in der Embodiment-Dimension den Ausprägungen „full“ oder „nearby“ zuzuordnen sind. Die Ausgabe erfolgt bei den hier vorgestellten Ansätzen also direkt über die Eingabetokens („full“) oder ist räumlich unmittelbar in der Umgebung der Tokens angesiedelt.

Darstellung auf der Tischoberfläche

Bei Tabletop-Interfaces ist die Nutzung der Tischoberfläche ein naheliegender und gängiger Ansatz zur Realisierung der Ausgabekanäle. Die Ausgabe erfolgt hierbei vorrangig visuell, also durch die Darstellung der auszugebenden Information. Ein derartig ausgestaltetes Interface ist hinsichtlich seiner Ausprägung in der Embodiment-Dimension als „nearby“ zu klassifizieren. Technologisch kommen zur Darstellung horizontal eingesetzte Bildschirme oder Oberflächen, auf die projiziert werden kann, in Frage.

Bei der Verwendung von Bildschirmen sind die Größe der zur Anzeige verwendbaren Oberfläche sowie die zur Anzeige verfügbare Auflösung (also indirekt die Größe eines Bildpunktes) wesentliche Kriterien. Bei heute verfügbaren LCD¹-Modulen mit Größen bis zu 132 cm in der Diagonale und Auflösungen von 1920 x 1080 Bildpunkten ist die Technologie soweit ausgereift und verfügbar, das dieser Ansatz grundsätzlich für den Einsatz in Tabletop Interfaces in Frage kommt. Vorteile sind die geringe Bauhöhe der Ausgabeeinheit (im Vergleich zu den im Folgenden vorgestellten Projektions-Lösungen). Nachteile sind die relative geringe Leuchtstärke, die einen Einsatz bei Tageslichtbedingungen schwierig machen sowie die Blickwinkelabhängigkeit, die bei horizontalem Einbau der Anzeigeeinheit stärker zum Tragen kommt als bei herkömmlicher vertikaler Verwendung.

Als Alternative zur Verwendung von aktiven Anzeigeeinheiten können Projektoren verwendet werden, die die darzustellende Information auf die Tischoberfläche projizieren. Hier ist zwischen Lösungen zu unterscheiden, bei denen die Projektion von oben erfolgt und jenen, die von unten auf eine durchscheinende Tischoberfläche projizieren. Bei ersteren muss der Projektor in ausreichender Höhe über der Tischoberfläche angebracht werden, um das projizierte Bild die notwendige Fläche

¹Liquid Crystal Display (Flüssigkristallanzeige)

abdecken zu lassen. Bei beschränkter Höhe nach oben kann ein Projektor mit Weitwinkelobjektiv oder ein Umlenkspiegel benutzt werden, der durch eine Vergrößerung des Abstands zwischen Projektor und Oberfläche auf einer nicht vertikalen Achse die notwendige Bauhöhe reduziert. Der größte Nachteil dieser Lösung ist die Abschattung der projizierten Information bei Manipulationen der Tokens auf der Oberfläche. Um dies zu vermeiden kann auch von unten auf eine durchscheinende Oberfläche projiziert werden. Bei diesem Lösungsansatz kommt es zu keinerlei Abschattungen, die Information wird wie bei Einsatz eines Bildschirms ständig angezeigt. Nachteilig wirkt sich hier der durch den Einsatz einer durchscheinenden Oberfläche verursachte Leuchtkraftverlust aus. Bei dieser Form der Projektion wird immer ein Teil des durch den Projektor ausgestrahlten Lichts von der Oberfläche nach unten zurück reflektiert. Im Gegensatz zur Projektion von oben ist dadurch der Kontrast der Darstellung wesentlich geringer. Für den Einsatz unter Tageslichtbedingungen erscheint also der erstgenannte Ansatz generell besser geeignet. Kritischer ist bei der Projektion von unten der notwendige Abstand zwischen Projektor und Tisch, da sich dieser direkt auf die Höhe des Tisches auswirkt. Um eine akzeptable Bauhöhe zu erreichen – also den Tisch durch durchschnittliche große Personen bedienbar zu halten (Höhe nicht mehr als etwa 100 cm) – ist hier der Einsatz eines Umlenkspiegels nahezu unabdingbar. Beiden Projektions-Ansätzen gleich ist, dass die abzudeckende Oberfläche variabel durch den Abstand des Projektors gewählt werden kann. Grenzen sind hier nach unten die Fokussierbarkeit des Projektors bei kleinen Abständen und nach oben die Abnahme der Projektionshelligkeit bei großen Abständen. Bei großen Oberflächen ist zudem auf die verfügbare Auflösung des Projektors zu achten, da die Größe eines Bildpunktes mit zunehmendem Abstand so ansteigt, dass eine feinauflösende Projektion der Information auf der Oberfläche nicht mehr möglich ist.

Aktive Anzeige auf Tokens

Alternativ zur Darstellung auf der Tischoberfläche können bei Tabletop-Interfaces auch die Tokens selbst als Ausgabekanal dienen. Die hier das Eingabemedium gleich dem Ausgabemedium ist, ist diese Form der Ausgabe hinsichtlich der Embodiment-Dimension in die Ausprägung „full“ einzuordnen. Technologisch können je nach Art der darzustellenden Information Tokens mit Displays ausgestattet werden oder lediglich visuelle Statusanzeigen beinhalten, die Feedback über den aktuellen Zustand des Tokens geben. In beiden Fällen müssen die Tokens generell mit Elektronik und Energieversorgung ausgestattet sein und die Möglichkeit haben, selbst oder über eine Verbindung mit der Infrastruktur ihren Zustand festzustellen.

Um textuelle oder grafische Information auf Tokens darzustellen ist die Verwendung von Displays notwendig. Bei der Verwendung von herkömmlichen LCD-Displays

ist durch die notwendige Hintergrundbeleuchtung sowie der notwendigen Stromversorgung zur Aufrechterhaltung der Anzeige der Energieverbrauch verhältnismäßig hoch. Alternativ können neuere Technologien wie OLED²- (REF) oder eInk-Displays (REF) verwendet werden. OLEDs bestehen aus organischen Materialien und benötigen keine Hintergrundbeleuchtung, das das Material selbst Licht emmitiert. eInk verwendet eine papierartige Oberfläche zur Anzeige, strahlt selbst kein Licht aus und ist deshalb auf Umgebungshelligkeit zur Verwendung angewiesen. eInk bietet in hellen Umgebungen die besten Kontrastverhältnisse (vergleichbar mit bedrucktem Papier) kann allerdings beim heutigen Stand der Entwicklung keine Farben darstellen. Der größte Vorteil von eInk liegt in der Eigenschaft, dass die Anzeige auch ohne Energieversorgung aufrecht bleibt – Energie ist lediglich zur Änderung des Display-Inhalts notwendig.

Durch das Wegfallen der Hintergrundbeleuchtung sind OLED- und eInk-Displays wesentlich dünner als LCD-Module und können auch auf nicht ebenen Oberflächen angebracht werden. Allen drei Ansätzen gleich ist, dass zur Ansteuerung des Anzeigemoduls Elektronik notwendig ist, die die darzustellende Information auf die zur Verfügung stehen Bildpunkte abbildet und das Display entsprechend ansteuert.

Neben der Verwendung eines Displays kann der Status eines Tokens auch mit Leuchtanzeigen in der Form von LEDs³ visualisiert werden. Der Nachteil dieses Ansatzes ist die schwierige Realisierbarkeit von komplexen Statusanzeigen – durch die auf zwei Zustände (ein/aus) beschränkte Aussagekraft einer LED sind andere als bipolare Visualisierungen schwer zu realisieren. Möglich ist die Verwendung von mehreren LEDs, wobei diese rasch schwer erfassbar wird, wenn dadurch mehrere voneinander unabhängige Aussagen visualisiert werden. Lediglich die Kopplung mehrerer LEDs zur aussagekräftigen Visualisierung von dynamischen Zuständen hat sich als intuitiv erfassbar und verständlich erwiesen (REF Zuckerman Flow Blocks). So können gekoppelte LEDs z.B. dazu verwendet werden, Flussrichtungen von Ressourcenströmen anzuzeigen, indem eine LED-Reihe entweder von links nach rechts oder von rechts nach links angesteuert wird. Auch beim Einsatz von LEDs ist einer ständige Energieversorgung notwendig. Zur Reduktion des Energieverbrauchs können wiederum die oben genannten Alternativ-Technologien OLED und eInk zum Einsatz kommen, wobei diese aktuell nicht in den Bauformen herkömmlicher LEDs angeboten werden. eInk-Anzeigen eignen sich aufgrund ihrer langsamen Schaltdauer außerdem nicht für die Realisierung dynamischer Anzeigen.

Token mit Aktuatoren

²Organic Light Emitting Diode

³Light Emitting Diode (Leuchtdiode)s

Neben der Verwendung von Displays zur Realisierung eines „full embodied“ Ausgabekanals können Tokens auch mit Aktuatoren ausgestattet werden, die es erlauben, das Token bzw. dessen Verhalten selbst ohne direkte Benutzerinteraktion zu beeinflussen. Beispiele für Aktuatoren sind unter anderem Vibrationsmodule oder mechanische Einheiten zur Veränderung der äußeren Form des Tokens oder dessen Position (auf der Tischoberfläche). Der Einsatz von Aktuatoren ist ob der technologischen und anwendungsspezifischen Vielfalt nicht generisch beschreibbar wie das bei reinen optischen Anzeigeeinheiten der Fall war. Aktuatoren müssen auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmt sein. Ihr Einsatz ist im Allgemeinen eher disruptiv, unterbricht durch die vom Benutzer nicht selbst ausgelöste Interaktion dessen aktuelle Aktivität und zieht die Aufmerksamkeit auf sich. Dies kann im einzelnen Anwendungsfall erwünscht sein, kann aber zu unerwünschten Effekten bei der Verwendbarkeit des Systems führen.

Wie bei Anzeigemodulen müssen auch hier die Tokens mit Energieversorgung ausgestattet sein und mit Elektronik integriert werden, die für die Ansteuerung der Aktuatoren sorgt.

Im Bereich der Tabletop Interfaces ist die Verwendung von Aktuatoren eher selten anzutreffen. Im Bereich der Ambient Interfaces kann der Einsatz von Aktuatoren aber sinnvoll sein, wenn sich das Interface so in die Umgebung seines Einsatzbereichs integrieren kann (REF Bsp ... Ferscha Blubbersäule?).

5.2.2. Ansätze zur entkoppelten Ausgabe

Ansätze zur entkoppelten Ausgabe sind solche, die von Fishkin (2004) in seiner Taxonomie in der Embodiment-Dimension unter den Ausprägungen „environment“ oder „distant“ eingeordnet werden.

„Environmental Embodiment“ ist dann gegeben, wenn Eingabe- und Ausgabekanäle räumlich nicht kohärent sind, aber Eingaben trotzdem offensichtlich Reaktionen in der unmittelbaren Umgebung auslösen. Klassische von Fishkin genannte Ansätze sind hier Audiokanäle aber auch die Veränderung von Umgebungslicht oder Temperatur. Auch olfaktorische Interfaces wären in diese Kategorie einzuordnen. In den folgenden Abschnitten werden jedoch ausschließlich audio-basierte Kanäle beschrieben, da diese im Bereich der Tabletop Interfaces Relevanz besitzen (etwa in REF reacTable und REF TEI Paper von Däne)

Die Ausprägung „distant“ kennzeichnet Ansätze, in denen die Eingabekanäle räumlich von den Ausgabekanälen vollkommen entkoppelt sind bzw. entkoppelt werden können. Ein Kriterium zur Einordnung eines Ansatzes unter „distant“ ist, dass Benutzer zur Beobachtung der Ausgabe nicht mehr die Eingabe im Blickfeld haben können (was bei allen anderen Ausprägungen möglich ist). Klassische Vertreter dieses

Ansatzes sind alle Ansätze die auf der Darstellung von Information auf herkömmlichen Bildschirmen oder Projektionsflächen basieren.

Darstellung auf Monitoren

Bei der Darstellung von Information auf Bildschirmen kommen die auch in der herkömmlichen Desktop-basierten Mensch-Maschine-Interaktion gängigen Anzeigetechnologien zur Anwendung. Im Kontext von Tabletop Interfaces ist bei Monitoren auf die Sichtbarkeit der Information für alle an der Interaktion beteiligten Personen zu achten – diese ist nicht nur von der Entfernung zum Monitor abhängig sondern bei den heute gängigen LCD-Displays auch vom Blickwinkel. Gegebenenfalls müssen mehrere Monitore verwendet werden, auf denen entweder simultan die gleiche Information dargestellt wird oder – abhängig von der Anwendung – lediglich für die jeweils eingenommene Perspektive relevante Information angezeigt wird. Mit Monitoren kann auch eine vollständig räumlich entkoppelte Darstellung realisiert werden, indem die darzustellende Information auf entfernte Displays übertragen wird. So kann zum Beispiel die Interaktion auf einem Tabletop Interface bzw. deren Auswirkungen auch räumlich entfernt verfolgt werden.

Generell muss bei entkoppelten Ausgabekanälen darauf geachtet werden, dass bei Interaktionen mit den tangiblen Eingabekanälen entsprechend eindeutig zuzuordnendes Feedback über die Ausgabekanäle rückgespiegelt wird. Bei Tabletop Interfaces ist hierbei (wiederum abhängig von der Anwendung) eine schematische Darstellung der Tischoberfläche mit einer Kennzeichnung des Bereichs, in dem eine Interaktion erkannt wurde, sinnvoll.

Projektion auf entfernte Oberflächen

Bei Ausgabe mittels Projektion auf entfernte Oberfläche (im Sinne von Oberflächen, die nicht dem eigentlichen Interface zuzuordnen sind) sind Aspekte wie Größe des Bildes oder Blickwinkelabhängigkeit der Darstellung meist keine Herausforderung. Mit einem Projektor können zumeist alle Benutzer ausreichend mit Information bedient werden. Ansonsten gelten die obigen Ausführungen hinsichtlich eindeutig zuzuordnendem Feedbacks analog.

Bei individueller Nutzung eines Tangible Interfaces ist in der Verwendung von Bildschirm oder Projektor noch ein unterschiedlich hoher Grad an Privatheit der Ausgabekanäle festzustellen. Während Bildschirme eher dem mit dem System interagierenden Individuum als Ausgabekanal vorbehalten bleiben, sind projizierte Informationen quasi öffentlich verfügbar. Abhängig vom Anwendungsszenario des Tangible Interfaces kann dies erwünscht sein oder nicht.

Audio-basierte Ausgabekanäle

Audio-basierte Ansätze werden hier als Vertreter von Ausgabekanälen vorgestellt, die in die Kategorie „environmental Embodiment“ eingeordnet werden. Audio-Interfaces arbeiten mit akustischer Ausgabe von Information, die im Allgemeinen in Zusammenhang mit den Eingaben am Tangible Interface stehen.

Die ausgegebene Information kann abstrakt, codiert oder natürlichsprachlich sein. Unter „abstrakter“ Information werden hier akustische Ausgaben verstanden, die nicht unmittelbar Bedeutung im sprachlichen Sinn tragen sondern auf Meldodien oder anderen Klangmustern basieren. Derartige Formen der Ausgabe kommen vor allem im künstlerischen Bereich zu Einsatz (REF reactable, TEI-Däne). „Codierte“ akustische Ausgabe deckt alle Bereiche ab, in denen Klänge verwendet werden, um Information zu transportieren, ohne das diese selbst in diesen Klängen abgebildet ist. Beispiele hierfür sind Signaltöne, die einen Fehler melden oder anderweitig die Aufmerksamkeit der Benutzer auf sich ziehen sollen. Unter „natürlichsprachlicher“ akustischer Ausgabe werden hier schließlich alle Ansätze eingeordnet, die die Ausgabe der Information direkt in Sprache umgesetzt vornehmen. Dies kann mittels gespeicherten (Teil-)Ansagen oder mittels Sprachsynthese realisiert werden. Im Gegensatz zu den anderen beiden Formen der akustischen Ausgabe ist die natürlichsprachliche Ausgabe abhängig vom Sprachverständnis der Benutzer und deshalb in einer bestimmten Konfiguration nur für einen beschränkten Benutzerkreis nutzbar.

Akustische Ausgabe ist allen ihren Ausprägungen der Embodiment-Dimension „environment“ zuzuordnen. Sie kann im Allgemeinen (ohne den Einsatz von Ohrhörern) von allen sich im Umfeld des Interfaces befindlichen Personen wahrgenommen werden. Bei codierter Ausgabe muss darauf geachtet werden, dass die Interpretation der Signale bekannt ist bzw. durch unterstützende (visuelle oder taktile) Maßnahmen erschließbar wird.

5.2.3. Technologie-Entscheidung

Auf Basis der in Abschnitt 5.1 festgelegten auszugebenden Information und den im letzten Abschnitt beschriebenen technologischen Alternativen zur Realisierung unterschiedlich ausgeprägter Ausgabekanäle können nun grundsätzliche Technologieentscheidungen getroffen werden.

Für die im Kontext der eigentlichen Modellierung auszugebenden Information (Benennungen, ...) erscheint ein kohärenter Ansatz am geeignetsten, da die Information inhärenter Bestandteil des Modells ist und deshalb räumlich mit den physischen Elementteilen (den Tokens) in eine einheitliche Modellsicht integriert werden sollte. Mit der bereits in Kapitel 4 argumentierten Entscheidung für passive Tokens

ist die Projektion der Information auf die Tischoberfläche der einzig naheliegende Ansatz. Dabei wird im Sinne der kompakteren Bauweise und der nicht vorhandene Einschränkung bezüglich Verdeckungen der Projektion durch modellierende Personen ein Lösungsansatz mit Projektion auf die Unterseite bevorzugt. Die kompaktere Bauweise ergibt sich aus der Tatsache, dass der Innenraum des Tisches ohnehin bereits für die Erfassung der Tokens durch die Kamera genutzt wird und dass bei gleichzeitiger Nutzung für die Projektion ein Auf- bzw. Überbau des Tisches zur Aufnahme des Projektors entfällt.

Die Ausgabe vergangener Modellzustände erscheint mit den gegebenen technologischen Rahmenbedingungen hingegen nicht für kohärente Ausgabe geeignet. Passive Tokens können ihre Position nicht selbständig verändern, weshalb die auf der Tischoberfläche vorhandenen Modellierungstokens immer an den Positionen liegen, an denen sie sich im aktuellen Modellzustand befinden. Eine kohärente Ausgabe von vergangenen Modellzuständen auf der gleichen Oberfläche ist deswegen nicht möglich – es käme zu Überdeckungen der physischen und projizierten Modelldarstellungen. Aus diesem Grund wird Zweiter Ausgabekanal verwendet, der diese Modellierungshistorie nicht kohärent darstellt. Akustische Ansätze erscheinen ob der Komplexität der Modelle und deren inhärent visuell-diagrammatischen Darstellung im Gegensatz zu visuellen Ansätzen als ungeeignet. Zu diesem Zweck wird also ein Bildschirm- oder Projektions-basierter Ausgabekanal implementiert. Dies hat auch den Vorteil, dass ins Modell zu integrierende digitale Ressourcen in ihrer „natürlichen“ Umgebung, dem Bildschirm eines Rechners manipuliert und ausgewählt werden können. Letztendlich lässt sich ein derartiger Ausgabekanal beliebig replizieren und auch für entfernte Ausgabe des Modellzustandes nutzen.

Konkret werden für das vorgestellte System also zwei Ausgabekanäle genutzt, die beide auf der visuellen Darstellung von Information basieren und sich in ihrer Ausprägung der „Embodiment“-Dimension nach (Fishkin, 2004) unterschieden. Der hauptsächliche Ausgabekanal ist die Tischoberfläche, auf ihr wird Information „nearby“ ausgegeben. Für Funktionen, für die diese kohärente Ausgabeform nicht adäquat einsetzbar ist, existiert ein zweiter, „distant“ Ausgabekanal in Form eines Bildschirms oder eines externen Projektors. Dieser Kanal kann in zwei Modi betrieben werden. Wird er nicht benötigt, kann er entweder deaktiviert werden (und so den Fokus auf den primären Ausgabekanal, die Tischoberfläche, lenken) oder synchron mit der Tischoberfläche den aktuellen Modellzustand anzeigen. Zweiteres ist sinnvoll, wenn der Modellierungsprozess auch von Personen verfolgt werden können soll, die sich nicht unmittelbar bei der Modellierungsoberfläche befinden.

Hardwareseitig ergibt sich aus dieser Entscheidung der in Abbildung 5.1 dargestellte Aufbau. Dabei kann der in der Standardkonfiguration vorhandene Bildschirm als Ausgabekanal je nach den räumlichen Gegebenheiten und dem konkreten Anwendungsszenario durch einen Projektor ersetzt werden.

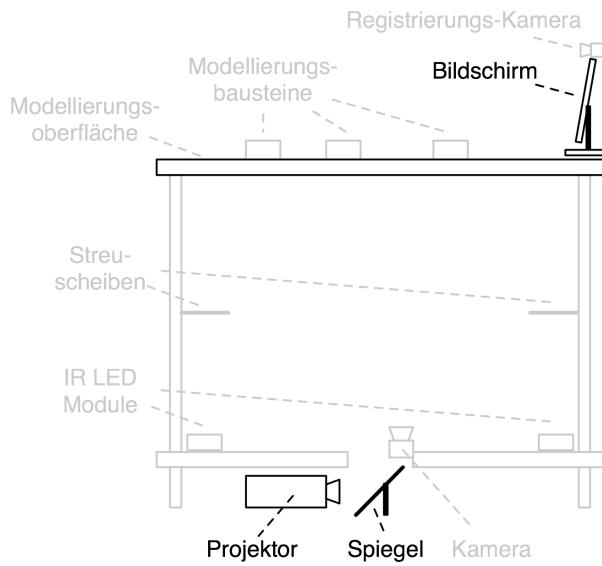


Abbildung 5.1.: Überblick über den Aufbau des Werkzeugs – Ausgabekomponenten

5.2.4. Frameworks zur Ausgabe

Im Sinne der eben getroffenen Technologieentscheidung wird nun eine Softwarekomponente benötigt, die die Ansteuerung der Ausgabekanäle erlaubt. Diese Softwarekomponente muss im Wesentlichen die Modellinformation, die über die Eingabekanäle erhoben wurde, visuell ausgeben und zusätzlich den Modellierungsunterstützungsfunktionen des Werkzeugs einen Kanal zur Kommunikation mit den Benutzern bieten.

Für die graphische Darstellung diagrammatischer Modelle (also vernetzter Strukturen) existieren verschiedene Frameworks die – basierend auf unterschiedlichen technologischen Ansätzen – die Darstellung von Modellelementen, der Verbindung und der Manipulation des Modells durch bereits implementierte Funktionalität ermöglichen und unterstützen.

In Frage kommende Frameworks

Die Anzahl der Möglichkeiten zur Darstellung graphischer Modelle durch Java ist groß. Die unterschiedlichen Ansätze unterscheiden sich vor allem in der angebotenen Abstraktionsstufe, wobei die Pole durch eine direkte Manipulation der Pixelgrafik in der das Modell dargestellt werden soll einerseits und eine rein logische, von der eigentlichen Darstellung vollständig entkoppelte Repräsentation des Modells andererseits gebildet werden. Hier wurden nur jene Frameworks betrachtet, die ei-

ne Verwaltung des darzustellenden Modells auf logischer Ebene ermöglichen und die eigentliche Ausgabe auf den Bildschirm übernehmen und kapseln. Kandidaten für Frameworks die diese Forderung erfüllen waren zum Zeitpunkt der Technologie-Entscheidung:

- Eclipse GEF (REF von Thomas)
- Tigris GEF (REF von Thomas)
- JHotDraw (REF)
- Jazz (REF von Seiringer)

... warum lassen wir Jazz und Tigris GEF unter den tisch fallen? ...

Eclipse GEF Das Graphical Editing Framework (REF) stellt als Teil der Eclipse Plattform (REF) eine Möglichkeit dar, graphische Editoren zu erstellen und diese in einer Eclipse Applikation eingebettet auszuführen. Das GEF⁴ bildet zusammen mit EMF⁵ (REF) auch die Grundlage für das GMF⁶ (REF), dass die graphische Erstellung von domänen-spezifischen Sprachen mit nachfolgender Generierung von entsprechenden Klassen ermöglicht. Diese Klassen binden sich nahtlos in die Eclipse Infrastruktur ein und werden als Teil eines modell-getriebenen Softwareentwicklungszyklus zur Erstellung domänen-spezifischen Applikationen verwendet.

GEF behandelt lediglich die graphische Ausgabe und erlaubt die Darstellung verzweigter Strukturen, die flexibel ausgestaltet werden können. GEF baut dabei konsequent auf dem MVC⁷-Konzept (REF) auf und trennt strikt zwischen Repräsentation der Daten und deren Darstellung.

...

JHotDraw Das JHotDraw-Framework (REF Gamma) ist eine Java-Implementierung des Smalltalk-Frameworks HotDraw (REF). Dieses wurde entwickelt, um einerseits eine einfache Möglichkeit zur Erstellung graphischer Editoren beliebiger Natur zu bieten und andererseits die Stärken und Möglichkeiten objektorientierter Softwareentwicklung unter Einsatz der von (REF Entwurfsmuster) vorgeschlagenen Entwurfsmuster zu zeigen.

JHotDraw nutzt intensiv objektorientierte Konzepte, vor allem die dynamische Typisierung von Objekten und implementiert einen Großteil seiner Features als Instanzen der eben erwähnten Entwurfsmuster. Dies erleichtert die Adaptierung und

⁴Graphical Editing Framework (Eclipse-Komponente)

⁵Eclipse Modeling Framework

⁶Graphical Modeling Framework (Eclipse-Komponente)

⁷Model-View-Controller

Erweiterung des Systems für eigenen Anwendungsfälle und ermöglicht eine rasche, unaufwändige Implementierung anwendungsspezifischer graphischer Editoren.

Ein Vorteil von JHotDraw liegt in der überschaubaren Struktur und im insgesamt für graphische Editoren-Frameworks eher kompakten Aufbau. Dies ist sowohl auf die resultierenden Applikationen bezogen, die wenig Ressourcen benötigen und ohne merkliche Verzögerung starten, als auch auf Framework-Klassen-Struktur zur Erstellung dieser Applikationen, die eine rasche Entwicklung ohne hohen Einarbeitungsaufwand oder weitgehende Parametrisierungen ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil von JHotDraw ist die Eigenständigkeit seiner Klassenbibliothek, die von keinen anderen Bibliotheken abhängt. Die einzige zu erfüllende Abhängigkeit besteht zum Fenster-Management-System Java SWING, das ohnehin Teil des JRE⁸ ist. JHotDraw-basierte Applikationen können so ohne weiteren Installations-Aufwand auf allen Rechnern ausgeführt werden, auf denen ein JRE vorhanden ist. Zusätzlich ist SWING auch Teil jener Bibliotheken, die von Java Applets zur Ausführung in Browsern verwendet werden können. Jede JHotDraw-Applikation kann damit ohne Modifikation lediglich durch Austausch der Basisklasse über eine HTTP⁹-Verbindung geladen und im Browser ausgeführt werden.

Framework-Entscheidung

Für das konkret zu implementierende System erscheinen grundsätzlich beide Frameworks als geeignet. JHotDraw weist in der Standarddistribution einen geringeren, dafür aber auf die eigentliche Visualisierungsaufgabe fokussierteren Funktionsumfang auf, was sich positiv auf den für die Verwendung notwendigen Lernaufwand auswirkt. Für die Entwicklung des prototypischen Systems wurde neben diesem Grund aufgrund der leichtgewichtigeren Bibliothek und geringeren Abhängigkeiten von externen Bibliotheken sowie des größeren Umfangs von in der Standarddistribution mitgelieferten benötigten Funktionalitäten JHotDraw ausgewählt.

In einer im Kontext der hier vorgestellten Arbeit angefertigten Diplomarbeit (Feiner, 2008) wurde ein auf GEF basierendes System entwickelt, das an die existierenden Eingabekanäle angebunden werden kann und prototypisch zeigt, wie GEF für die Darstellung flexibler Modelle (im Sinne von dynamisch zugewiesener Semantik und Visualisierung) eingesetzt werden kann. Ein zusätzlicher Aspekt dieser Arbeit ist die Möglichkeit zum synchronen verteilten Betrieb mehrerer Instanzen der Applikation, die simultan am gleichen Modell arbeiten. Die Arbeit schafft damit die Voraussetzungen, synchron an mehreren (physischen oder graphischen) Schnittstellen

⁸Java Runtime Environment

⁹Hypertext Transfer Protocol

len ein Modell kooperativ zu manipulieren. Sie ist außerdem aufgrund der gemeinsamen Basis-Infrastruktur in Instanzen der Eclipse Rich Client Platform (REF) integrierbar und kann so nahtlos in komplexere, auf dieser Plattform basierende Systeme integrierbar.

5.3. Ausgabe von Information

In diesem Abschnitt wird nun auf Basis der eben getroffenen Framework-Entscheidung und unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Entscheidung für zwei Ausgabekanäle, die in Abschnitt 5.2 getroffen wurde, die konkrete Informationsausgabe für das hier vorgestellte Werkzeug beschrieben.

Wiederum auf abstrakter Ebene beginnend, wird das Konzept beschrieben, das bei der Umsetzung der Ausgabe verfolgt wird. Aufbauend darauf wird die Architektur der Software beschrieben, die auf den im letzten Kapitel beschriebenen Komponenten aufsetzt und für die Ansteuerung der Ausgabekanäle sorgt. Nach einer detaillierten Beschreibung der konkreten Ausgabeform für alle ausgebenden Informationstypen wird schließlich die Implementierung des hier verfolgten Ansatzes in Software vorgestellt.

5.3.1. Konzept

Wie bereits oben beschrieben wird die auszugebende Information im konkreten Werkzeug auf zwei Ausgabekanäle verteilt. Grundsätzlich wird Information auf einem mit den Eingabekanälen räumlich kohärenten Kanal (der Tischoberfläche) ausgegeben. Ist dies aufgrund der Art der auszugebenden Information nicht adäquat möglich, wird der zweite Ausgabekanal als primäres Kommunikationsmedium verwendet. In der übrigen Zeit spielt der zweite Ausgabekanal eine untergeordnete Rolle und kann zur unterstützenden simultanen Visualisierung der am primären Kanal ohnehin ausgegebenen Information dienen.

Während eines Modellierungsvorgangs bleibt der Fokus der Ausgabe grundsätzlich am primären Ausgabekanal, der Tischoberfläche, auf der kohärent mit den auf ihr platzierten Tokens Information ausgegeben wird. In lediglich zwei Fällen erhält der zweite Ausgabekanal den Fokus:

- Wenn Information ausgegeben werden muss, die nicht kohärent mit den auf der Oberfläche physischen Tokens dargestellt werden kann (z.B. bei der Ausgabe von gespeicherten Modellzuständen).

- Wenn Interaktion mit den Benutzern einen Fokus auf die digitale Welt, also auf über den Rechner zugreifbare Ressourcen hat (wie bei der Auswahl von Dateien zur Einbettung in Container-Tokens).

In beiden Fällen wird das Modell auf der Oberfläche nicht unmittelbar verändert, den Benutzern ist es möglich, sich auf die Interaktion mit dem sekundären Ausgabekanal zu konzentrieren.

Während der Arbeit mit dem Werkzeug, bei der der zweite Ausgabekanal grundsätzlich nicht benötigt wird, können zwei Ansätze verfolgt werden, was den Umgang mit diesem betrifft. Zum ersten kann der zweite Ausgabekanal abgeschaltet werden, also keine Ausgabe über den Bildschirm oder externen Projektor mehr erfolgen. Vorteil dieser Lösung ist, dass ein Fokuswechsel auf den sekundären Ausgabekanal eindeutig erkennbar ist, da dazu die Darstellung explizit aktiviert werden muss. Während der eigentlichen Modellierung werden Benutzer nicht abgelenkt und können auf die Interaktion auf der Tischoberfläche fokussieren.

Zum zweiten ist es möglich, am sekundären Ausgabekanal die Ausgabe des primären Kanals zu spiegeln, auf diesem also synchron die gleiche Information auszugeben wie auf der Tischoberfläche. Ein Vorteil dieser Lösung ist, dass in dieser Darstellung zusätzlich Information eingeblendet werden kann, die auf der Tischoberfläche in der Überdeckung zwischen physischen Elementen und projizierter Information nicht dargestellt werden kann. So ist unter anderem denkbar, die Abstaktionsstufe, auf der aktuell modelliert wird, am sekundären Ausgabekanal zu visualisieren. Diese Information ist aus dem Modell auf der Tischoberfläche nicht erkennbar (weder eingebettete Teilmodelle noch übergeordnete Modelle sind auf im Modell ohne weitere Interaktion sichtbar), für den Modellierungsvorgang aber auch zumeist nicht unmittelbar relevant. Ist sie nun auf der sekundären Oberfläche permanent sichtbar, besteht für Benutzer die Möglichkeit, sich rasch und ohne zusätzlichen Interaktionsaufwand einen Überblick über den Kontext des aktuell bearbeiteten (Teil-)Modells zu erhalten.

Ein zweiter Aspekt der Spiegelung der Ausgabe auf dem sekundären Ausgabekanal ist das unmittelbare Feedback, das Benutzern über die Tätigkeit des Systems zur Verfügung gestellt wird. Wenn ein Modellierungstoken bewegt oder geöffnet wird, erfolgt eine unmittelbare Reaktion in der Modellvisualisierung auf dem sekundären Ausgabekanal. Auch eventuelle Fehlerkennungen werden offensichtlich, wenn z.B. ein Element von der sekundären Visualisierung verschwindet, obwohl es auf der Oberfläche noch vorhanden ist. Für Benutzer ist damit das Systemverhalten klarer erkennbar, die Bildung eines mentalen Modells zur Erklärung der Funktionsweise des Werkzeugs ist einfacher und lenkt nach der Einarbeitungsphase nicht mehr von der eigentlichen Tätigkeit ab (REF Norman Design of everyday things, Kühl-schranksregelung). Letztendlich besteht bei der Einbindung mehrerer Benutzer die

Möglichkeit, allen Beteiligten einen Überblick über den aktuellen Modellzustand zur Verfügung zu stellen auch wenn diese im Moment nicht aktiv am Werkzeug arbeiten. Nachteile dieses Ansatzes liegen einerseits in der möglichen Ablenkung der Benutzer von der eigentlichen Modellierungsoberfläche (was insofern weitgehend unkritisch ist, als das die gesamte Information über den sekundären Informationskanal zur Verfügung gestellt wird), vor allem aber darin, dass der Wechsel des Interaktionsfokus von einem Ausgabekanal zum anderen nicht mehr so explizit sichtbar wird wie im ersten Ansatz. Benutzer sind so unter Umständen desorientiert und können dem Systemverhalten nicht folgen.

Aus den vorangegangenen Ausführungen ist ersichtlich, dass beide Ansätze Vorteile und Nachteile bieten, die nicht eindeutig für eine der beiden Lösungen sprechen. Vielmehr muss im einzelnen Anwendungsfall abgewogen werden, welche Lösung eher geeignet ist. Einflussfaktoren sind dabei die Anzahl der an der Modellierung teilnehmenden Benutzer (bessere Verfolgbarkeit des Modellierungsvorgangs bei synchroner Anzeige auf beiden Kanälen), die Modellierungsaufgabe an sich (generelle Notwendigkeit der Nutzung des sekundären Ausgabekanals) sowie das persönliche Modellierungsverhalten der Beteiligten (eher am Bildschirm oder eher an der Tischoberfläche orientiert). Aus diesen Gründen werden beide Formen der Verwendung des sekundären Ausgabekanals unterstützt, wobei die Benutzer durch eine Tastenkombination zwischen den beiden Modi umschalten können – also ggf. auch in unterschiedlichen Phasen eines Modellierungsvorgangs eine unterschiedliche Konfiguration der Ausgabekanäle nutzen können.

5.3.2. Architekturen

Wie im letzten Abschnitt beschrieben, unterscheidet sich die Ausgabe von Information auf den beiden Ausgabekanälen nur in einigen Fällen, im synchronen Ausgabemodus wird weitgehend die gleiche Information in – den unterschiedlichen Ausgabemedien geschuldet – zum Teil unterschiedlichen Ausgabeformen dargestellt.

Grundsätzlich wird die Architektur der Ausgabekanal-Verwaltung erweiterbar angelegt, um veränderte Anforderungen an der Werkzeug oder erweiterte Funktionalität umsetzen zu können. Basis dieser erweiterbaren Architektur ist das in Abschnitt 4.4.8 bereits beschriebene Modul zur Verteilung des aktuellen Modellzustandes an die verwendeten Ausgabekanäle. Jeder Ausgabekanal, der über Änderungen am Modell an den Eingabekanälen benachrichtigt werden soll, muss ein definiertes Interface implementieren, das jene Methoden definiert, die zur Datenübermittlung zwischen dem Interpretationsmodul und den Ausgabekanälen notwendig sind. In der konkreten Implementierung sind zur Zeit zwei auf JHotDraw basierende Ausgabekanäle umgesetzt, zusätzlich existiert ein weiteres Modul, das gegenüber dem Sys-

tem als Ausgabekanal agiert, die übermittelte Information selbst jedoch wieder an beliebige via TCP¹⁰/IP¹¹ erreichbare Clients verteilt (siehe Abbildung 5.2). Auf diesem Weg können entfernte Ausgabekanäle realisiert werden, die es erlauben, den Modellierungsprozess auch ohne räumliche Anwesenheit zur verfolgen. Mittels der gleichen Schnittstelle können auch weitere, nicht auf visuelle Ausgabe beschränkte Kanäle wie z.B. akustische Benachrichtigungen mit Information versorgt werden.

Durch die flexible Architekture von JHotDraw ist es möglich, unterschiedliche Ausgabekanäle mit der gleichen Codebasis durch den Einsatz verschiedener Basisklassen als vollständig eigenständige Applikation auszuführen oder als Applet in Webbrowsern zu starten (siehe Abbildung 5.10). Auf diese Weise ist es möglich, die einmal implementierte Visualisierung des Modellzustandes für die lokalen Ausgabekanäle sowie für entfernte Betrachter zu verwenden, die alle über die gleiche Schnittstelle synchron mit Information versorgt werden.

5.3.3. Ausgabe von Information zum Modell

Um im Folgenden auf die Details der Implementierung eingehen zu können, muss an dieser Stelle noch ausgeführt werden, welche Arten von Information in welcher Form über welchen Kanal ausgegeben werden. Grundsätzlich sind konzeptuell zwei Arten von Information zu unterscheiden. Dieser Abschnitt behandelt die Ausgabe von Information zum Modell selbst, im folgenden Abschnitt werden jene Informationen Ausgabekanälen zugeordnet, die der Kontrolle des Systems und der Unterstützung des Modellierungsvorgangs dienen.

Information zu Modellelementen

Information, die im Zusammenhang mit einzelnen Modellelementen ausgegeben wird, wird unmittelbar auf der Modellierungsoberfläche, also am primären Ausgabekanal, dargestellt. Wenn der sekundäre Ausgabekanal für synchrone Modelldarstellung konfiguriert ist oder entfernte Modellbetrachter eingesetzt werden, so wird diese Information auch auf diesen dargestellt, wobei die Ausgabe auf diesen identisch ist (dies gilt auch in den weiteren Abschnitten). Dabei wird das Modellelement selbst graphisch repräsentiert, um eine Zuordnung der Information zu ermöglichen. Auf der Tischoberfläche ist eine dezidierte Darstellung des Modellelements nicht notwendig, das dieses durch die kohärente Eingabe ohnedies durch das entsprechende Modellierungstoken dargestellt wird (siehe Abbildung 5.3)

¹⁰Transport Control Protocol

¹¹Internet Protocol

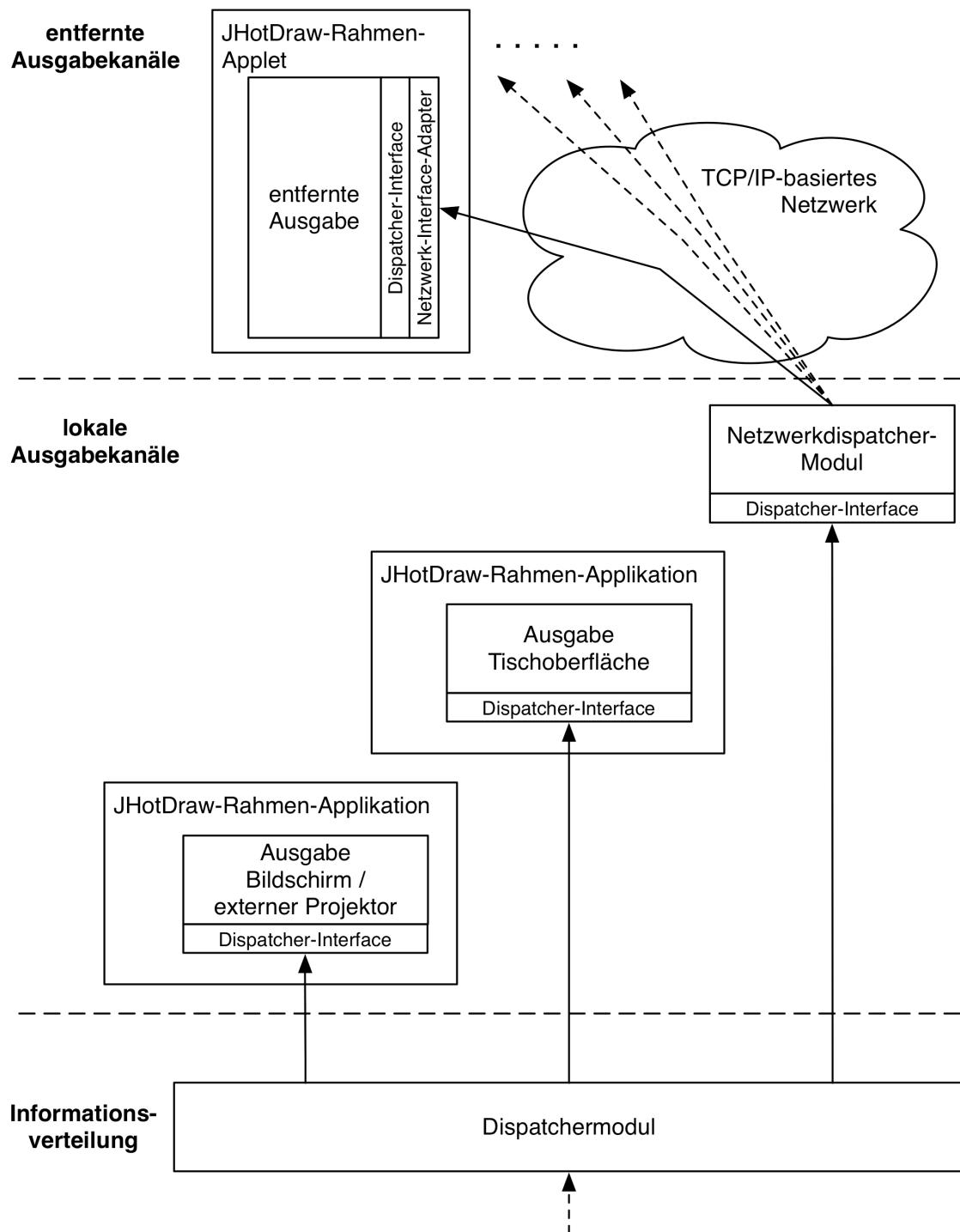


Abbildung 5.2.: Softwarearchitektur zur Verwaltung der Ausgabekanäle

5. Ausgabe

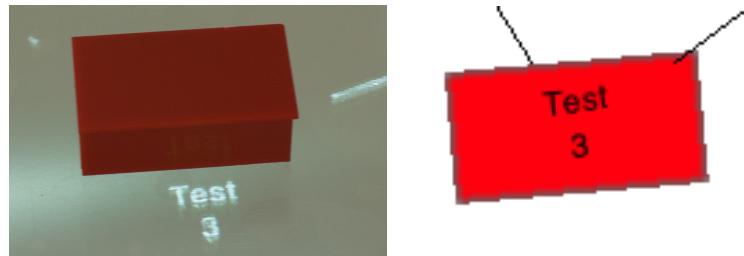


Abbildung 5.3.: Darstellung von Modellelementen
(links: Tischoberfläche, rechts: Bildschirm)

In der aktuellen Implementierung wird an Information lediglich die Bezeichnung des Tokens auf beiden Ausgabekanälen explizit ausgegeben. Der Typ des Tokens ist in der Farb- und Formgebung codiert. Auf dem sekundären Ausgabekanal sind die Elemente in der graphischen Darstellung den physicalen Elementen nachempfunden und bilden deren Farbe und Grundriss ab.

Ebenfalls nur auf der sekundären Oberfläche explizit auszugeben ist die Information hinsichtlich der aktuellen Rotation eines Modellierungstokens. Auf der Oberfläche ist diese am physicalen Token erkennbar bzw. wird durch diese festgelegt. In der graphischen Repräsentation am sekundären Ausgabekanal muss diese Rotation ebenfalls abgebildet und nachgeführt werden.

Information zu Verbindern

Da Verbinder nicht physical existieren sondern immer über die Ausgabekanäle dargestellt werden müssen, gelten die nun folgenden Ausführungen für beide Ausgabekanäle. Wird ein Verbinder hergestellt, so kann neben den beiden Endpunkten (Modellelementen) auch noch die Richtung des Verbinder sowie eine Bezeichnung festgelegt werden.

Ein Verbinder wird auf den Ausgabekanälen als Linie dargestellt die zwei Modellierungstokens bzw. deren graphische Repräsentation verbindet (siehe Abbildung 5.4). Die Richtung des Verbinder wird über Pfeilspitzen angegeben, die an den Enden der Linien angebracht werden (siehe Abbildung 5.5). Dabei können diese Pfeilspitzen fehlen (ungerichteter Verbinder), an einem Ende angebracht werden (gerichteter Verbinder) oder an beiden Enden dargestellt werden (bidirektonaler Verbinder). Die Ausgabe der Benennung eines Verbinder erfolgt – sofern vorhanden – zentriert auf halbem Weg zwischen den verbundenen Modellelementen unterhalb der Linie.

Information zu eingebetteten Elementen

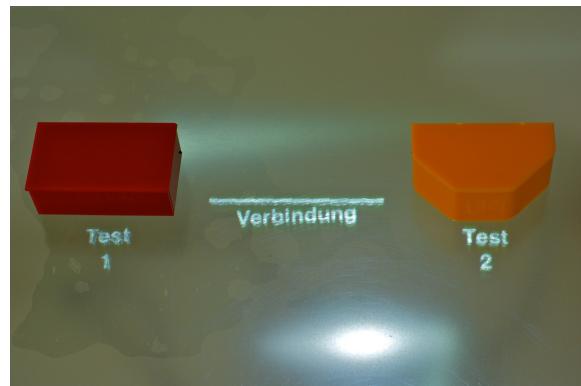


Abbildung 5.4.: Darstellung von Verbindern
(oben Tischoberfläche, unten Bildschirm)

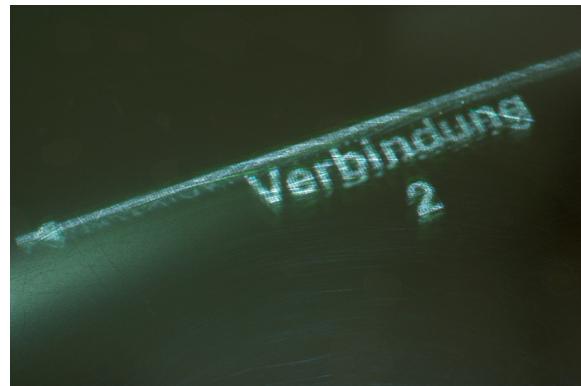


Abbildung 5.5.: Darstellung gerichteter Verbindner

5. Ausgabe

Im Kontext der Ausgabe von Information zu eingebetteten Elementen müssen unterschiedliche Modellaspekte berücksichtigt werden. Im einzelnen sind dies:

- Öffnungszustand von Modellelementen
- Anzahl und Art der eingebetteten Elemente
- Information, welche an eingebettete Elemente gebunden ist

Der Öffnungszustand von Modellelementen ist auf der Tischoberfläche durch den Zustand des jeweiligen Containertokens ersichtlich. Auch die Art und Anzahl der eingebetteten Elemente ist sichtbar, wenn ein Containertoken geöffnet ist. Am sekundären Ausgabekanal, also auf dem Bildschirm wird ein geöffnetes Modellelement vergrößert dargestellt, um innerhalb der Fläche des Elements visuelle Repräsentationen der eingebetteten Elemente einblenden zu können. Somit ist auch am sekundären Ausgabekanal erkennbar, wann bzw. dass ein Element geöffnet ist (siehe Abbildung 5.6).

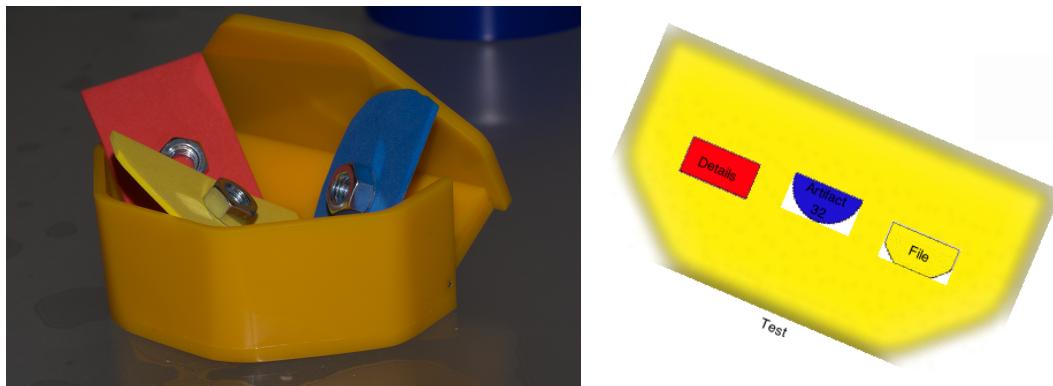


Abbildung 5.6.: Darstellung von Containern und eingebetteten Elementen
(links Tischoberfläche, rechts Bildschirm)

Jene Information, die an die eingebetteten Elemente gebunden ist, wird auf beiden Kanälen nicht ohne explizite Benutzerinteraktion dargestellt. Fordern die Benutzer auf einem Eingabekanal die Darstellung der eingebetteten Information an, so wird diese auf dem sekundären, nicht kohärenten Ausgabekanal dargestellt. Eine Darstellung der angebundenen Information auf der Tischoberfläche würde durch die physisch vorhanden Modellelemente gestört. Die eingebetteten Submodelle bzw. die sonstigen digitalen Ressourcen werden also auf dem Bildschirm dargestellt, wobei Submodelle den aktuellen Modellzustand temporär ersetzen und andere Ressourcen mittels der im Betriebssystem definierten Standardapplikation geöffnet werden.

5.3.4. Ausgabe zur Kontrolle des Systems

Neben der eigentlichen Modellinformation wird auch Information ausgegeben, die zum Feedback über den Systemzustand oder der Kontrolle desselben notwendig ist. Wo möglich wird auch in diesem Fall die Tischoberfläche als primärer Ausgabekanal genutzt.

Zustands- und Ereignismeldungen

Bei der Verwendung der die Modellierung unterstützenden Werkzeuge muss den Benutzern Feedback über deren Erkennung bzw. den durch diese ausgelösten Änderung des Systemzustandes gegeben werden. Dabei ist zwischen jenen Interaktionen zu unterscheiden, die ein Ereignis auslösen und jenen, die den Systemzustand permanent ändern. Dieser Unterschied muss auch in der Visualisierung den Benutzern kommuniziert werden. Dabei kann es durch die vom System nicht beeinflussbaren physischen Werkzeugtokens zu potentiellen Mißverständnissen kommen. Wird ein Werkzeugtoken, das lediglich ein Ereignis auslöst (wie zum Beispiel das Markierungstoken), von den Modellierenden auf der Oberfläche belassen, kann dieses als unter Umständen als zustandsverändernd und nicht als ereignisauslösend wahrgenommen werden.

Elementauswahl Wird mittels dem Markierungstoken ein Element ausgewählt, so müssen die Benutzer über die Erkennung der Markierung benachrichtigt werden. Dabei muss erkenntlich sein, welches Element ausgewählt wurde und wie lange die Auswahl gültig ist. Die Auswahl eines Elements ist grundsätzlich ein Ereignis, ist jedoch immer Teil einer umfassenderen Interaktion, in der die Benutzer das ausgewählte Element verwenden (z.B. dieses benennen). Deswegen wirkt das Markierungsergebnis einige Sekunden nach, um den Benutzern die Gelegenheit zur Fortsetzung des Interaktionsablaufs zu geben. Eine permanente Markierung eines ausgewählten Elements ist insofern nicht wünschenswert, als dass etwaige fehlerhafte Markierungen (durch Fehlauswahl oder Fehlerkennung) dann zusätzlicher Benutzerinteraktion zur Korrektur bedürften. Deswegen werden Markierungen als Ereignisse mit längerer Wirkungsdauer interpretiert.

Die Anzeige der Auswahl erfolgt auf beiden Ausgabekanälen mittels einer ovalen Markierung, die das ausgewählte Element umschließt (siehe Abbildung 5.7). Diese wird solange angezeigt, bis die Interaktion, der sie zuzuordnen ist, abgeschlossen ist oder die Gültigkeitsdauer abgelaufen ist. Danach verschwindet sie selbstständig ohne weiterer Benutzerinteraktion.

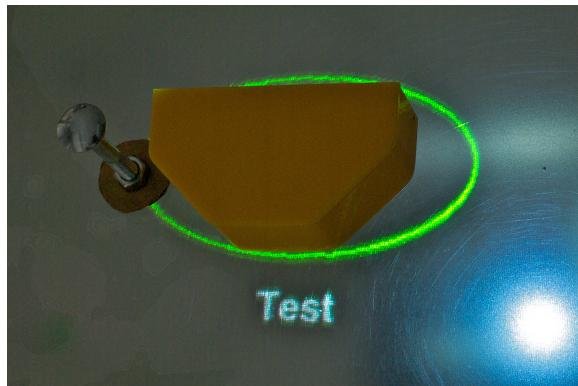


Abbildung 5.7.: Markierung von Modellelementen

Verbindungsherstellung Die Herstellung von Verbindungen kann auf zwei unterschiedliche Arten durch die Benutzer ausgelöst werden. Wird eine Verbindung durch die Auswahl zweier Modellelemente hergestellt, werden die eben beschriebenen ovalen Markierungen zur Visualisierung der Auswahl verwendet. Dabei kann es zur Auswahl eines Elements als Endpunkt einer gerichteten Verbindung kommen. Die ovale Markierung wechselt in diesem Fall die Farbe, um die erfolgreiche Erkennung einer Pfeilspitze rückzumelden. Nachdem beide Endpunkte erkannt und markiert wurden, wird unmittelbar die Verbindung hergestellt. Diese wird initial als eine Linie dargestellt, die in Farbe und Strichstärke hervorsticht, und in der Folge in einer Animation durch eine herkömmliche Verbindung ersetzt. Diese Animation dient dazu, das Ereignis der Verbindungsherstellung klar zu visualisieren und die Aufmerksamkeit der Benutzer auf dieses Ereignis zu lenken.

Werden zwei Elemente durch ihre räumliche Nähe zueinander in Beziehung gesetzt und eine Verbindung hergestellt, entfallen die ovalen Markierungen (da keine explizite Auswahl der Elemente erfolgt). Es wird lediglich die Animation zur Verbindungsherstellung dargestellt. Auf diesem Wege ist keine Herstellung von gerichteten Verbindern möglich.

explizite Snapshots Im Zusammenhang mit der Speicherung der Modellierungshistorie (also der über die Zeit veränderten Modellzustände) ist es möglich, neben der automatischen Speicherung auch explizit der Aufnahme eines Snapshots auszulösen. Während bei der automatischen Speicherung kein Feedback an die Benutzer gegeben wird (da auch keine Interaktion zum Auslösen derselben stattfindet), wird im Falle einer expliziten Speicherung den Benutzern die erfolgreiche Durchführung der Aktion rückgemeldet. Die Speicherung des Snapshots ist ein Ereignis ohne zeitliche Ausdehnung und wird dementsprechend visualisiert. Dies erfolgt in

Form eines roten Blitzes, der sowohl über die Tischoberfläche als auch den Bildschirm ausgegeben wird. Die Verwendung der gespeicherten Modellzustände und deren Visualisierung wird in Abschnitt 5.3.4 im Detail behandelt.

Löschmodus Im Gegensatz den in den vorangegangenen Abschnitten behandelten Werkzeugen löst der Einsatz des Lösch-Tokens kein Ereignis aus sondern schaltet das System in einen anderen Zustand, solange es auf der Oberfläche vorhanden ist. Dies spiegelt sich auch in der Visualisierung wieder. Solange das Lösch-Token von der Kamera erfasst wird, wird auf beiden Ausgabekanälen der Hintergrund des Modells (also die gesamte Tischoberfläche bzw. der gesamte Bildschirm) in roter Farbe dargestellt, während im Vordergrund nach wie vor der aktuelle Modellzustand visualisiert wird. Dies entspricht den Interaktionsmöglichkeiten der Benutzer – das Modell kann nach wie vor manipuliert werden, jene Interaktionen, die aber im Normalfall eine Verbindung herstellen, löschen diese in diesem Modus wieder. Wird das Lösch-Token entfernt, wechselt der Hintergrund wieder auf die Standard-Farbe, das System reagiert auf die betroffenen Interaktionen wieder mit der Herstellung eines Verbinders.

Abruf der Modellierungshistorie

Der Abruf der Modellierungshistorie wird mit dem runden Kontroll-Token ausgelöst und kontrolliert. Hinsichtlich der Darstellung ist die Modellierungshistorie die erste der hier beschriebenen Zustands- und Ereignismeldungen, bei der keine kohärente Darstellung möglich ist. Auf der Tischoberfläche befinden sich zum Zeitpunkt der Aktivierung des Historienmodus alle Tokens, die im Elemente im aktuellen Modellzustand repräsentieren. Da der Historienmodus als Referenz dient, in der die Entstehung des Models rekapituliert werden kann, die gespeicherten Modellzustände aber im Allgemeinen nicht den aktuellen Zustand ersetzen sollen, verbleiben diese Tokens auch auf der Oberfläche. Damit kann nach Deaktivierung des Historienmodus der Modellierungsvorgang unmittelbar fortgesetzt werden. Die auf der Oberfläche befindlichen Tokens stören aber die Darstellung gespeicherter Modellzustände, da sie Teile verdecken und keinen Bezug zum projizierten Modell haben.

Die Information des Historienmodus wird deshalb ausschließlich auf dem sekundären Ausgabekanal – dem Bildschirm – dargestellt (die Kontrolle verbleibt mit dem runden Kontroll-Token auf der Tischoberfläche). Die gespeicherten Modellzustände ersetzen dabei den aktuellen Modellzustand, der im Normalbetrieb synchron zur Tischoberfläche dargestellt wird. Ist das System so konfiguriert, dass der sekundäre Ausgabekanal nicht synchron betrieben wird, so wird er bei Erkennung des Historienmodus aktiviert.

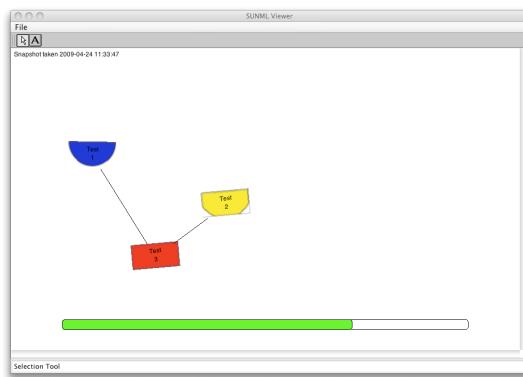


Abbildung 5.8.: Darstellung der Modellierungshistorie

Zusätzlich zur graphischen Darstellung des gespeicherten Modellzustandes wird ein Zeitstempel in der linken oberen Ecke eingeblendet, der den Zeitpunkt der Speicherung angibt. Am unteren Rand des Bildes wird ein Balken eingeblendet, der auf den relativen Zeitpunkt der Aufnahme (bezogen auf die Gesamtzahl der gespeicherten Zustände) angibt (siehe Abbildung 5.8). Die Schrittweite (also die Verlängerung des Balken, die durch das Umschalten auf einen unmittelbar folgenden Zustand verursacht wird) wird dazu dynamisch an die Anzahl der gespeicherten Modellzustände angepasst.

Ist der erste bzw. letzte Modellzustand erreicht, werden weitere entsprechende Kommandos durch Drehen des Kontroll-Tokens ignoriert. Die Benutzer werden durch einen vollständig leeren bzw. ausgefüllten Balken auf das Erreichen des jeweiligen Endpunktes hingewiesen. Wird das Kontroll-Token von der Tischoberfläche entfernt, so wird der Historienmodus deaktiviert. Die Darstellung auf dem sekundären Ausgabekanal wird wieder auf die synchrone Darstellung des aktuellen Modellzustandes geschalten bzw. wird diese deaktiviert, falls das System dementsprechend konfiguriert ist.

Wiederherstellungsunterstützung

Im Rahmen des Abrufs der Modellierungshistorie kann von den Benutzern die Wiederherstellungsunterstützung aktiviert werden. Im Rahmen der Wiederherstellungsunterstützung leitet das System die Benutzer bei der Rekonstruktion eines gespeicherten Modellzustandes an. Dazu werden auf der Tischoberfläche und am Bildschirm (sofern aktiviert) – also auf beiden Ausgabekanälen – Hinweise angezeigt, wie der aktuelle Modellzustand verändert werden muss, um den gespeicherten Zustand wieder herzustellen. Da der aktuelle Modellzustand als Ausgangspunkt dient, kann eine kohärente Visualisierung zum Einsatz kommen.

Bei der Aktivierung der Wiederherstellungsunterstützung werden die im Modell befindlichen Verbinder ausgeblendet, da diese nicht manuell verändert werden müssen. Die notwendige manuelle Intervention der Benutzer zur Wiederherstellung beschränkt sich auf die Platzierung der Modellierungstokens an die dem gespeicherten Modellzustand entsprechenden Orte. In der ersten Phase werden vom System schrittweise alle Tokens markiert, die im aktuellen Modell enthalten sind und im gespeicherten Modellzustand nicht vorhanden sind – also entfernt werden müssen. Schrittweise heißt in diesem Zusammenhang, dass immer nur ein Token markiert wird, sobald dieses entfernt wurde, wird das nächste Token zur Entfernung markiert. Die Markierung ist als rote, ovale Hinterlegung des Tokens umgesetzt.

In der zweiten Phase werden jene Tokens behandelt, die sowohl im aktuellen als auch im gespeicherten Modellzustand enthalten sind, sich aber jeweils an unterschiedlichen Positionen befinden – also verschoben werden müssen. Dazu wird wiederum schrittweise eine Markierung an der Zielposition des Tokens eingeblendet und diese mit einem Pfeil mit der aktuellen Position des betroffenen Tokens verbunden (siehe Abbildung 5.9).

In der letzten Phase werden alle Tokens hinzugefügt, die im aktuellen Modell nicht vorhanden sind, es im gespeicherten Modellzustand aber waren. Diese werden schrittweise durch grüne, ovale Markierungen an den jeweiligen Positionen angezeigt, wobei die Benennung des Tokens in die Markierung eingeblendet wird, um das jeweilige zu platzierende Element identifizieren zu können.

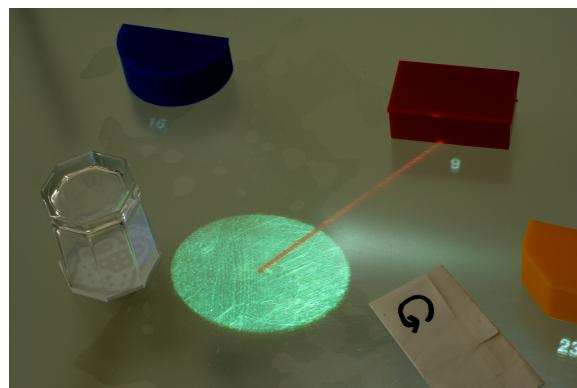


Abbildung 5.9.: Unterstützung der Wiederherstellung von Modellzuständen

Die zur Rekonstruktion des Modellzustandes notwendigen Schritte sind nicht vorberechnet sondern werden vielmehr Schritt für Schritt aus der aktuell auf der Tischoberfläche befindlichen Token-Konstellation extrahiert. Dadurch ist es möglich, auch irrtümlicherweise während der Wiederherstellung entfernte, hinzugefügte oder vor allem verschobene Tokens zu korrigieren, auch wenn die Rekonstruktion

grundsätzlich schon in eine spätere Phase getreten wäre. So würde das System beispielsweise nach Abschluss eines Schrittes in der dritten Phase (Elemente hinzufügen) auf eine Anweisung in der zweiten Phase (Verschieben) zurückgreifen, wenn durch das Hinzufügen ein anderes, bereits an der korrekten Position befindliches Element verschoben worden wäre.

Sobald sich die Positionen der Tokens mit jenen des gespeicherten Modellzustandes decken, ist die notwendige Benutzerintervention zur Wiederherstellung abgeschlossen. Die Benutzer werden nun ggf. aufgefordert, das Historien-Kontroll-Token und das Wiederherstellungs-Token zu entfernen (sofern sich diese noch auf der Oberfläche befinden). Dieser Schritt schließt die Wiederherstellungsunterstützung ab. Das System blendet die Verbinder (nun aus dem gespeicherten Modellzustand) wieder ein und zeigt damit den (neuen) aktuellen Modellzustand an.

5.4. Umsetzung der Ausgabe mit Software

Wie in Abschnitt 5.3.1 bereits beschrieben, basiert die Implementierung des Ausgabekanäle auf dem JHotDraw-Framework. Die Implementierung erfolgt dabei wieder in Modulen, die die Art und Anzahl der Ausgabekanäle flexibel erweiterbar macht. Die Ähnlichkeiten der Anforderungen, die sich im Detail zwar durchaus unterscheiden, im Allgemeinen aber stark ähneln, legt die Verwendung einer gemeinsamen Basisklasse nahe, die die verallgemeinerbaren Aufgaben bereits implementiert und von der die konkreten Implementierungen der Ausgabekanäle abgeleitet werden. So müssen auf dem bildschirmbasierten Ausgabekanal unter anderem die Modellelemente graphisch dargestellt werden, wohingegen diese auf der Tischoberfläche in Form der physischen Modellierungstokens bereits vorhanden sind. Beiden Kanälen einheitlich ist hingegen zum Beispiel die Behandlung der Verbinder, die hier wie dort dargestellt werden müssen. Durch das nur partiell unterschiedliche Verhalten der beiden Ausgabekanäle ist es möglich, diese von einer gemeinsamen Basisklasse abzuleiten und die Spezifika in Subklassen zu implementieren. Dies reduziert auch den Wartungsaufwand der Codebasis und vermindert die Gefahr von Inkonsistenzen.

Konkret wurde die Architektur wie in 5.10 dargestellt auf Klassen abgebildet. Zentrale Schnittstelle zu den informationsliefernden Modulen ist das Interface `DispatcherListener`, dass eine Reihe von Methoden definiert, die Ausgabekanäle implementieren müssen, falls sie an die Informationseingabe- und -interpretations-Infrastruktur angebunden werden sollen. Das Interface ist allgemein einsetzbar, kann also auch durch Ausgabekanäle anderer technologischer Ansätze implementiert werden. Als zentrales Element implementiert die Klasse zur Ausgabe von Information auf dem sekundären Ausgabekanal (dem Bildschirm) dieses Interface. Diese

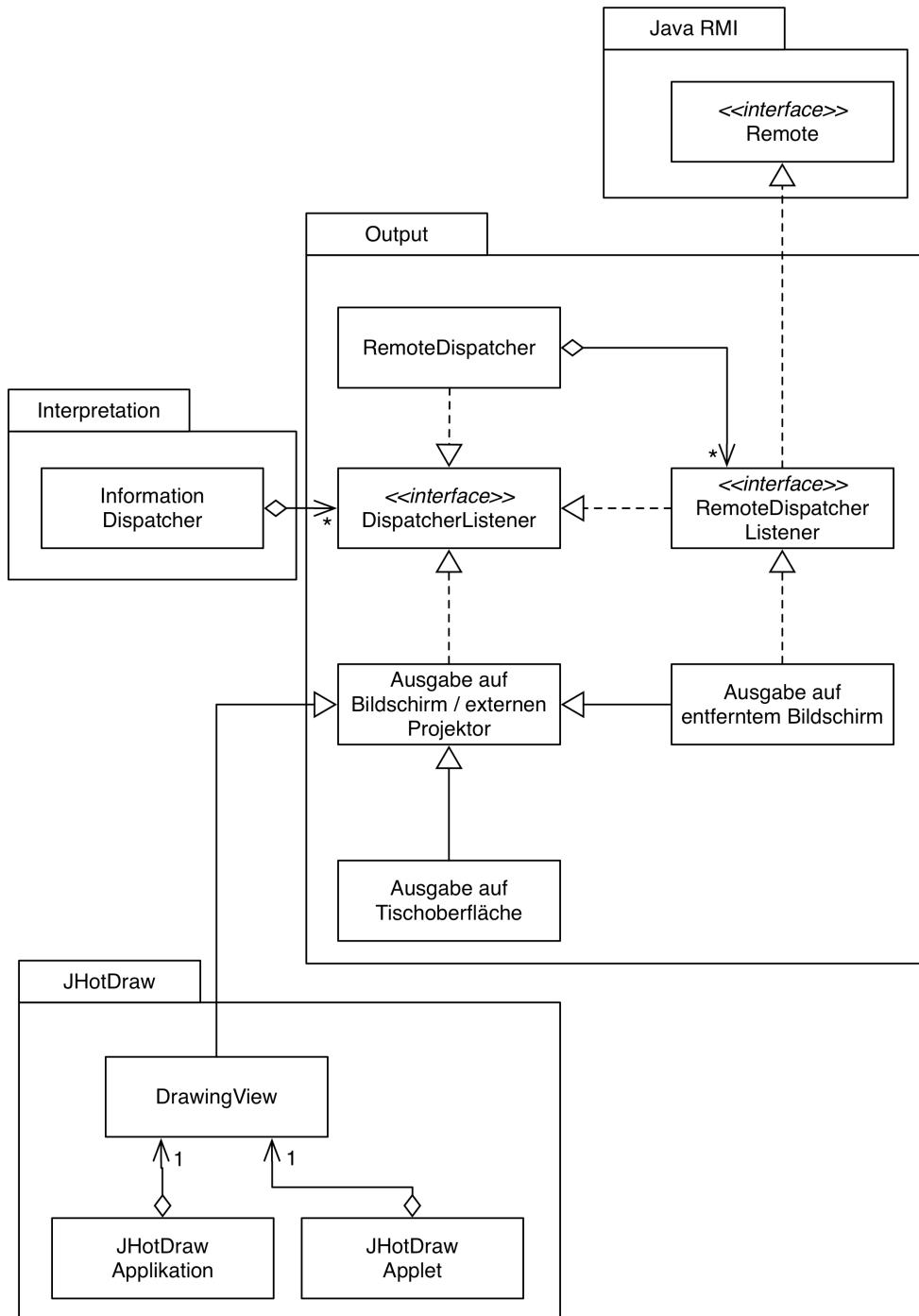


Abbildung 5.10.: Zusammenhänge der Klassen zur Ausgabebehandlung

Klasse wurde deswegen als zentraler Knotenpunkt gewählt, weil sie im Vergleich mit den anderen Ausgabekanälen den größten Anteil an durch sie ausgegebenen Information besitzt. Die Klasse zur Ausgabe von Information auf der Tischoberfläche implementiert lediglich ein Subset an Visualisierungs-Methoden (so müssen z.B. die Elemente selbst nicht ausgegeben werden). Diese Klasse wird deshalb von jener zur Bedienung des sekundären Ausgabekanals abgeleitet, die nicht benötigten Methoden werden mit leeren Methoden überschrieben. Die zur Ausgabe benötigten Methoden werden unverändert übernommen, unterschiedliche Darstellungsformen (etwa die Stichstärke bei Verbindungen) werden durch Parametrisierung der Datenklassen realisiert, die die darzustellende Information kapseln.

Beide lokale Ausgabekanäle betten die eigentliche Visualisierungs-Klasse in einen JHotDraw-Rahmen ein, der die Applikationsinfrastruktur zur Verfügung stellt. In diesem Fall ist dies die Klasse `DrawApplication`, die eine direkt ausführbare Java-Applikation erzeugt. Die Einbindung der eigentlichen Ausgabekanäle erfolgt über die Klasse `DrawingView`, die als Basisklasse für die die Ausgabekanäle bedienenden Klassen fungiert. Zur Anzeige auf der Tischoberfläche wird die JHotDraw-Applikation in den Vollbild-Modus geschalten und mit schwarzem Hintergrund versehen. Auf der Tischoberfläche ist dadurch keine Projektion zu erkennen, wenn sich keine Modellelemente auf ihr befinden. Die Anzeige am sekundären Ausgabekanal erfolgt in einem regulären Fenster.

Die Ausgabe auf entfernten (visuellen) Kanälen basiert ebenfalls auf der Klasse, die den sekundären Ausgabekanal bedient. Tatsächlich ist die Form der Visualisierung identisch mit einem mit synchroner Darstellung betriebenen sekundären Ausgabekanal. Die Implementierung von entfernten Kanälen unterscheidet sich ausschließlich in der Übermittlung der darzustellenden Information über eine Netzwerkverbindung.

5.4.1. Ausgabe des Modellzustands

Die Zustand des Modells, also Art und Parameter der auf der Oberfläche befindlichen Elemente und Verbindungen sind in Objekten der Klassen `BasicBuilding-Block` bzw. `Connector` abgebildet. Diese Klassen kapseln sämtliche Information, die zur Beschreibung des Elementzustandes notwendig ist. Diese Objekte sind außerdem in der Lage, sich durch ihre `clone`-Methode selbst vollständig zu reproduzieren. "Vollständig" bedeutet in diesem Zusammenhang, dass im Duplikat keine Referenzen mehr auf die Attribute des Originalobjekts vorhanden sind – das Objekt wird im Sinne einer "Deep-Copy" vollständig reproduziert. Dies ist notwendig, um gespeicherte Modellzustände vollständig vom aktuellen Modellzustand zu entkoppeln und persistent abzulegen. Die Ausgabe erfolgt mittels einer `CompositeFi-`

gure (als Komponente des JHotDraw-Frameworks), in die die graphische Repräsentation des Elements, dessen Benennung sowie ggf. die eingebetteten Elemente geschrieben werden. Eventuell vorhandene Markierungen (wie jenen, die durch das Auswahltoken verursacht werden oder die im Rahmen der Wiederherstellungsunterstützung als Hinweis zum Entfernen eines Elements hinzugefügt werden) werden ebenfalls direkt in die CompositeFigure aufgenommen, was den Vorteil hat, dass Markierungen an das Element gebunden bleiben und sich mit diesem bewegen, wenn das betreffende Token verschoben wird.

Eingebettete Elemente enthalten neben ihrer graphischen Repräsentation und ihrer Benennung auch eine Referenz auf die Ressource, die durch sie repräsentiert wird. Ist diese Ressource ein Teilmodell, so wird dieses gespeicherter Modellzustand referenziert und beim Abruf entsprechend am sekundären Ausgabekanal dargestellt. Sind externe Ressourcen (im Sinne von Dateien im Filesystem) angebunden, so werden diese beim Abruf mittels der durch die Java-Plattform zur Verfügung gestellten Methode `Desktop.open` geöffnet. Diese Methode greift dazu auf die Plattformspezifischen Dateitypen-Bindungen zu und öffnet die jeweilige Datei mit der zugeordneten Standard-Applikation.

Assoziationen sind von der durch JHotDraw zur Verfügung gestellten Klasse `LineConnection` abgeleitet und werden durch deren Eigenschaften bei der Erstellung explizit an den Endpunkten an zwei Figures (in diesem Fall an `BasicBuildingBlocks`) gebunden. Der Verbinde wird dadurch mit jeder Bewegung eines der Elemente mitgeführt und muss nicht manuell an den neuen Endpunkt verlegt werden. Methoden zur Anzeige Pfeilspitzen und Benennung können ebenfalls von der Klasse `LineConnection` übernommen werden.

Kalibrierung der Ausgabe

Der Projektor, der die Information auf die Tischoberfläche projiziert, ist aus Gründen der Transportierbarkeit nicht fix im Boden des Tisches eingebaut. Deswegen ist nach dem Aufbau der Systems im Allgemeinen die projizierte Version des Modells nicht deckungsgleich mit der Position der physischen Tokens. Es kann eine Verschiebung entlang beider Achsen auftreten, die alle zu den physischen Tokens ausgegebene Information von diesen absetzt. Dadurch kann die Information unter Umständen nicht mehr eindeutig zugeordnet werden.

Aus diesem Grund ist die Position der projizierten Modellversion einstellbar, die Kalibrierung muss einmalig nach dem Aufbau des Werkzeugs vorgenommen werden. Aufgrund der Verwendung des Umlenkspiegels kann es nicht nur zu einer Verschiebung der Information auf der X- oder Y-Achse kommen, es können auch Spiegelungen oder Stauchungen auftreten, welche den Projektions-Fehler von links nach

rechts bzw. von oben nach unten zunehmen lassen. Auch diese Spreizungen oder Stauchungen sind softwareseitig im Rahmen der Kalibrierung korrigierbar.

5.4.2. Ausgabe der Modellierungshistorie

Wird die Modellierungshistorie abgerufen, so wird am sekundären Ausgabekanal der zuletzt gespeicherte Modellzustand angezeigt. Am primären Ausgabekanal kommt weiterhin der aktuelle Modellzustand zur Anzeige. Die Modellierungshistorie wird in Form von **Snapshot**-Objekten in einem **History**-Objekt gespeichert. Das Objekt der Klasse **History** dient dabei der Verwaltung der gesamten Historie (also aller **Snapshots**), ermöglicht die Ablage neuer **Snapshots** und Navigation durch sowie den Abruf der bereits gespeicherten Modellzustände. In den **Snapshot**-Objekten selbst ist neben dem eigentlichen Modellzustand ein Zeitstempel abgelegt, der den Zeitpunkt der Speicherung kennzeichnet. Außerdem gibt ein Flag an, ob die Speicherung automatisch erfolgte oder explizit ausgelöst wurde. Der eigentliche Modellzustand wird als Collection von **Figures** gespeichert. Da sowohl **BasicBuildingBlocks** als auch **Connections** von der Klasse **Figure** abgeleitet sind, können diese hier einheitlich verwaltet werden. Auch bei der Darstellung muss nicht zwischen den beiden Klassen unterschieden werden, da dem **DrawingView** (also der Zeichenoberfläche) zur Darstellung auch lediglich **Figures** übergeben werden müssen.

Bei der Navigation durch die Modellierungshistorie wird entsprechend der Drehbewegung des Kontroll-Tokens aus dem **History**-Objekt der vorhergehende bzw. nachfolgende **Snapshot** abgerufen. Der aktuell auf dem sekundären Ausgabekanal dargestellte Modellzustand wird gelöscht und die im **Snapshot** gespeicherten Modellelemente und Verbinder ausgegeben. Zusätzlich wird der Zeitstempel als Text ausgegeben und am unteren Bildschirmrand der Fortschrittsbalken ausgegeben. Dieser zeigt an, wo in der gesamten Historie der aktuell angezeigte Modellzustand zu verorten ist und gibt Feedback darüber, ob eine weitere Navigation nach vor oder zurück möglich ist.

5.4.3. Umsetzung der Wiederherstellungsunterstützung

Wenn die Wiederherstellungsunterstützung ausgelöst wird, werden vor dem Start der Ausgabe der Wiederherstellungsanweisungen alle Verbinder ausgeblendet. Da die Benutzer lediglich die Element (bzw. die diese repräsentierenden Tokens) manipulieren muss, ist die Anzeige der Verbinder nicht notwendig bzw. sogar störend, da sich diese mit den auf der Oberfläche angezeigten Anweisungen zur Wiederherstellung überlappen würden.

Die eigentliche Wiederherstellungsunterstützung beginnt mit der Berechnung des ersten Schrittes, der von den Benutzern zu setzen ist. Dabei wird geprüft, ob im aktuell auf der Oberfläche befindlichen Modell ein Element enthalten ist, das im wiederherzustellenden Zustand fehlt. Ist dies der Fall, wird dieses Element markiert und die Benutzer damit aufgefordert, es zu entfernen. Die so gestellte Aufgabe wird in einem Objekt der Klasse `Task` gespeichert. Bei jeder eintreffenden Meldung über Änderungen auf der Modellierungsoberfläche wird nun mit Hilfe der `completed`-Methode der Task-Objekts überprüft, ob der erste Schritt damit ausgeführt wurde (ob im konkreten Fall also das Element entfernt wurde). Ist dies der Fall, so wird die Methode zur Berechnung des nächsten Schrittes erneut aufgerufen und ein neues Task-Objekt erzeugt, das bei Änderung auf der Oberfläche wiederum zur Prüfung der Durchführung des Schrittes herangezogen wird. Sind noch Elemente vorhanden, die im Zielzustand nicht enthalten sind, ist der nächste Schritt wiederum eine "Entfernen"-Aufgabe.

Befinden sich keine überflüssigen Elemente mehr auf der Oberfläche, so wird die nächste Aufgaben-Kategorie – "Bewegen" – geprüft. Hier werden all jene Elemente behandelt, die sowohl im Ausgangs- als auch im Zielzustand enthalten sind, sich jedoch auf unterschiedlichen Positionen befinden. Zur Anzeige dieser Art von Aufgaben wird ein Vektor berechnet, der auf den Ausgabekanälen angezeigt wird und von der aktuellen Position des zu bewegenden Elements auf die Zielposition weist, die zusätzlich mit einer Markierung gekennzeichnet wird. Auch in dieser Kategorie wird bei jeder Änderung auf der Modellierungsoberfläche geprüft, ob die Aufgabe bereits erfüllt ist.

Wurden auch alle verschobenen Elemente an die korrekte Position bewegt, wird die Prüfung der letzten Kategorie von Aufgaben – "Hinzufügen" – durchgeführt. Hier werden Aufgaben für all jene Elemente definiert, die im Zielzustand enthalten sind, im Ausgangszustand aber fehlen. Die Zielposition des hinzuzufügenden Tokens wird auf den Ausgabekanälen mittels einer Markierung und der Benennung des Elements angezeigt. Sind auch die Aufgaben dieser Kategorie abgeschlossen, werden die Verbindelemente des Zielzustandes eingeblendet (indem die gespeicherten `Connector`-Objekte der Zeichenoberfläche einfach hinzugefügt werden) und das System wieder in den Modellierungs-Modus versetzt.

Implementierungstechnisch ist hier noch auf die Entkopplung zwischen Identifikation des nächsten Schrittes und der Prüfung dessen Durchführung mittels Objekten der Klasse `Task` hinzuweisen. Dies ist notwendig, weil Wiederherstellungsaufgaben über mehrere Ereignisse auf der Modellierungsoberfläche (also das Verschieben, Hinzufügen oder Wegnehmen von Elementen) aktuell bleiben können und so der die Erfüllung der Aufgabe unabhängig von deren Erstellung geprüft werden muss. Dies hat mehrere Implikationen für die Implementierung.

Zum einen bringt die Klasse Task eine eigene Methode zur Prüfung der Erfüllung der in ihr gekapselten Aufgabe mit – Objekte von Task kennen also die Kriterien ihrer Erfüllung und können diese auch überprüfen. Zum anderen ist es nicht sinnvoll bzw. in machen Fällen nicht möglich, die durchzuführenden Aufgaben bei der Aktivierung des Wiederherstellungsmodus vorzuberechnen. Durch den Ablauf der Wiederherstellung kann der Ausgangszustand auch außerhalb der durch die Aufgaben vorgegebenen Modifikation verändert werden. Dadurch können vorberechnete Aufgaben obsolet bzw. falsch sein und können deshalb nicht sinnvoll zur Rekonstruktion eingesetzt werden. Tatsächlich wird nach jeder abgeschlossenen Aufgabe der nächste Schritt so bestimmt, als wäre der Wiederherstellungsmodus eben aktiviert worden. Der aktuelle Zustand auf der Modellierungsoberfläche wird als Ausgangspunkt herangezogen und wie oben beschrieben mit dem Zielzustand verglichen. So ist es auch möglich, dass auf eine Aufgabe der zweiten Kategorie ("Verschieben") wieder ein Aufgabe der ersten Kategorie ("Entfernen") folgt, falls das Modell im vorhergehenden Schritt entsprechend verändert wurde (also etwa ein nicht benötigtes Element hinzugefügt wurde). Erst wenn in allen drei Kategorien keine Differenzen zwischen aktuellem Zustand und Zielzustand mehr festgestellt werden, ist die Wiederherstellungsunterstützung abgeschlossen.

5.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden alle Aspekte dargestellt, die in Zusammenhang mit der Ausgabe von Information durch das hier entwickelte Werkzeug stehen. Die Struktur des Kapitels wurde dabei analog zu jener des vorhergehenden Kapitels erstellt um eine konsistente Darstellung der technischen Aspekte des Systems zu gewährleisten. Im ersten Teil wurde auf Basis der in Kapitel XY definierten Anforderungen abgeleitet, welche Arten von Information den Benutzern zur Unterstützung der Modellierung zur Verfügung gestellt werden müssen. Die dort identifizierten Aspekte bilden die Grundlage der Technologieentscheidung und der konkreten Umsetzung des Systems.

Im zweiten Abschnitt wurden die technologischen Grundlagen der Informationsausgabe behandelt. Nach der Identifikation der Kohärenz von Ein- und Ausgabekanälen als wesentliches Designkriterium bei Tangible User Interfaces wurden unterschiedliche technische Lösungen für kohärente und nicht kohärente Informationsausgabe beschrieben. Die Klassifikation der Ansätze erfolgt dabei auf Basis der von (Fishkin, 2004) vorgeschlagenen Taxonomie. Auf Basis der bereits vorhandenen technologischen Einschränkungen durch die Technologie-Entscheidung in Kapitel 4 wurde in der Folge für jede auszugebende Informationsart ein Zuordnung zu kohärenten oder nicht-kohärenten Ausgabeformen getroffen. Daraus resultiert die

Entscheidung, mehr als einen Ausgabekanal zu verwenden, da eine ausschließlich kohärente Ausgabe nicht möglich ist. Für die Umsetzung der Ausgabekanäle, die auf visuellem Weg realisiert werden, wurden geeignete Software-Frameworks beschrieben und einander gegenübergestellt. Auf Basis der festgelegten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen kommen die Frameworks JHotDraw (REF) und GEF (REF) in Frage, von denen für die Erstellung des Prototypen JHotDraw als das System mit der fokussierteren Funktionalität und geringerem Einarbeitungsaufwand ausgewählt wurde. Im Rahmen einer Diplomarbeit (Feiner, 2008) wurde jedoch daneben ein auf GEF basierender Ausgabekanal implementiert.

Der dritte Abschnitt widmet sich auf Basis der auszugebenden Information und der zuvor getroffenen Technologieentscheidung der konzeptuellen Architektur der Ausgabekanäle. Hier wurde festgelegt, welche Information in welcher Form auf welchen Ausgabekanal dargestellt wird. Dabei wurde zur besseren Strukturierung in Ausgaben unterschieden, die dem Modell selbst zuzuordnen sind und in solche, die der Unterstützung der Modellbildung dienen.

Die Beschreibung der konkreten Umsetzung der Ausgabekanäle ist Gegenstand des vierten Abschnitts. Anhand eines Klassendiagramms der konkreten Umsetzung wurden die Zusammenhänge zwischen den Implementierungen der Ausgabekanäle gezeigt, die so ausgelegt sind, dass Änderungen mit minimalem Aufwand an nur einer Stelle für beide Ausgabekanäle durchgeführt werden können. Außerdem wurde beschrieben, wie die Anbindung entfernter Ausgabekanäle realisiert wurde. Für jede Art von auszugebender Information (Modellzustand, Modellierungshistorie und Wiederherstellungsunterstützung) ist außerdem angeführt, welche Abläufe innerhalb des Systems letztendlich zur Ausgabe der korrekten Visualisierung führt.

Mit der Beschreibung der Softwarekomponenten, die für die Ausgabe der Information sorgen, ist die eigentliche Benutzungsschnittstelle vollständig definiert. Auf Basis dieses und des vorhergehenden Kapitels wird in Kapitel 7 das System in die in Kapitel 3 beschriebenen Erklärungs- und Strukturierungsansätze für Tangible Interfaces eingeordnet. Ein weiterer Aspekt der Implementierung, der in dieser Arbeit zu berücksichtigen ist, ist die Persistierung der Modell-Information in einer Form, die eine vollständige Abbildung der Semantik der Modelle und eine Weiterverarbeitung durch externe Systeme erlaubt. Dieser Aspekt ist Gegenstand des folgenden Kapitels.

6. Persistierung

In den vorangegangen drei Kapiteln wurde die Umsetzung des eigentlichen Werkzeugs beschrieben. Neben der Unterstützung des Modellierungsvorgangs ist aber auch die persistente Speicherung der erstellten Modelle zum Zwecke der Weiterverarbeitung ein hier zu beleuchtender Aspekt. Auf die Persistierung wirken vor allem zwei der in Kapitel XY identifizierten Anforderungen ein. Zum ersten ist die Nachvollziehbarkeit des Modellierungsvorganges sicherzustellen – dies gilt nicht nur während des Vorgangs selbst, sondern auch danach. Dementsprechend ist sämtliche Information zu persistieren, die zur Wiederherstellung nicht nur des Modells selbst sondern auch der gesamten Modellierungshistorie notwendig ist. Zum zweiten hat die Forderung nach semantischer Offenheit bei der Modellierung auch unmittelbare Auswirkungen auf die Persistierung. Neben dem Modell selbst muss aufgrund dieser Anforderung auch die Bedeutung der verwendeten Modellierungselemente miterfasst undpersistiert werden, so dass diese bei der Weiterverarbeitung der Modelle verwendet werden kann.

In diesem Kapitel werden nun aufgrund der eben genannten Forderungen technologische Ansätze identifiziert, beschrieben und schließlich hinsichtlich ihrer Eignung für den konkreten Einsatz beurteilt. Der ausgewählte Ansatz wird im darauf folgenden Abschnitt konzeptuell beschrieben. Die Abbildung der Modelle und der ebenfalls zu persistierenden zusätzlichen Information in ein geeignetes Datenmodell ist Gegenstand des darauf folgenden Abschnitts. Schließlich wird die konkrete technische Umsetzung der Persistierung dargelegt und die dazu notwendigen Software-Module im Detail beschrieben.

6.1. Möglichkeiten der Persistenzsicherung

- Serialisierung von Java-Objekten
- Relationale Datenbanken
- XML¹ Topic Maps

¹Extensible Markup Language

6.2. Topic Maps

Topic Maps (ISO JTC1/SC34/WG3, 2008) sind wie bereits in Abschnitt XY beschrieben ein Mittel zur Abbildung von semantischen Netzen. In Topic Maps können beliebige Daten strukturiert aufbereitet und zueinander in Beziehung gesetzt werden. Die Art der zu repräsentierenden Daten ist dabei irrelevant, eine Topic Map trifft keine Aussage über ein den repräsentierten Daten zugrundeliegendes Begriffssystem (sie ist „ontology-agnostic“ (Vatant, 2004)).

Historisch stammen Topic Maps aus dem Bereich der technischen Repräsentation von Thesauri und Indizes (Pepper, 2000) (Rath, 2003). Aus diesen Bereichen motivieren sich auch die Bausteine einer Topic Map, wenngleich der Verwendung durch diesen Ursprung nicht eingeschränkt wird. Die grundlegenden Elemente einer Topic Map sind „Topics“, „Associations“ und „Occurrences“ (siehe Abbildung 6.1).

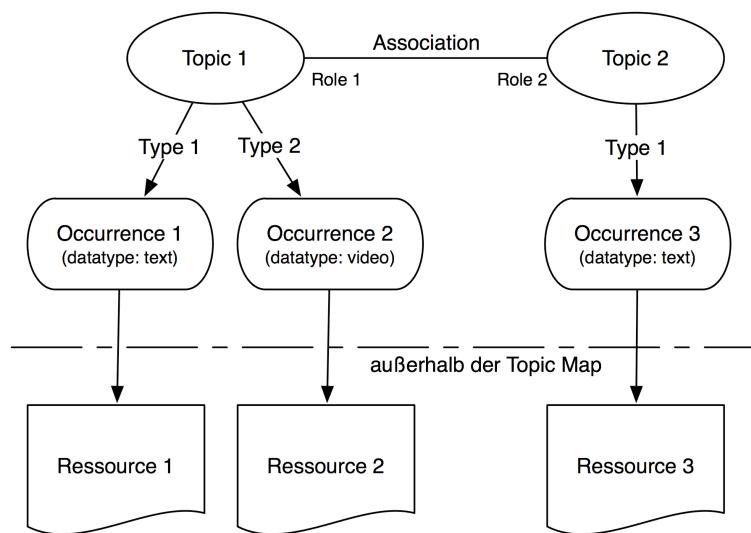


Abbildung 6.1.: Grundlegende Elemente einer Topic Map

„Topics“ sind Begriffe dar und bilden die Knoten des semantischen Netzwerks. Ein Topic kann beliebige Information darstellen, repräsentiert aber immer genau ein Phänomen der realen Welt (d.h. zu einem Topic muss es eine Entsprechung außerhalb der Topic Maps geben, die beobachtbar oder beschreibbar ist und auf die die modellierende Person Bezug nehmen will²). Eine Topic Map ist damit im Sinne

² „A subject can be anything whatsoever, regardless of whether it exists or has any other specific characteristics, about which anything whatsoever may be asserted by any means whatsoever. In particular, it is anything about which the creator of a topic map chooses to discourse.“ (ISO JTC1/SC34/WG3, 2008, S.8)

von Stachowiak (1973) ein diagrammatisches Modell, das einen bestimmten, für den Modellersteller relevanten Ausschnitt der Realität abbildet.

“Associations“ bilden die Beziehungen zwischen Topics ab und stellen damit die Kanten des semantischen Netzes dar. Eine Association verknüpft Topics semantisch miteinander und kann frei mit Bedeutung belegt werden. Die Art der Beziehungen ist also nicht festgelegt und wird wie die Bedeutung der Topics frei gewählt werden. Topics und Associations decken historisch den Bereich der Darstellung von Thesauri ab, in denen Begriffe definiert und zueinander in Beziehung gesetzt werden.

Der zweite historische Ursprung von Topic Maps, die Indizes, werden durch das Konstrukt der „Occurrences“ abgedeckt. Occurrences (“Auftreten“) sind Referenzen aus der Topic Map in die reale Welt. Sie setzen die Topics einer Topic Map in Bezug zu beliebiger referenzierbarer Information (z.B. Dokumente). Im Kontext der eben genannten Indizes, kann eine Topic Map als der mit Querverweisen versehene Index eines Buches verstanden werden, in dem durch die Angabe von Seitenzahlen auf den Text des Buches verwiesen wird. Diese Verweise durch Angabe der Seitenzahlen sind in diesem Zusammenhang die Occurrences.

Die Ansammlung von durch Associations verknüpften und mit Occurrences versehenen Topics bilden eine Topic Map. Darüber hinaus kann in Topic Maps jedoch noch weiterführende Information repräsentiert werden (siehe Abbildung 6.2), die Gegenstand der folgenden Abschnitte sein werden.

6.2.1. Topics, Subjects, Topic Names und Variants

Wie oben bereits beschrieben, repräsentiert ein Topic ein Phänomen der realen Welt in einer Topic Map. Dieses Phänomen der realen Welt, das durch das Topic repräsentiert wird, wird als „Subject“ bezeichnet. In einer Topic Map darf es zu einem Subject nur exakt ein Topic geben, umgekehrt kann ein Topic auch nicht mehrere Subjects repräsentieren, die Zuordnung zwischen Subject und Topic ist also eindeutig (bijektiv). Im Topic wird dazu exakt ein „Subject Identifier“ registriert, der auf eine Informationsressource verweist, die das Subject für Menschen eindeutig identifizierbar macht (diese Ressource wird als „Subject Indicator“ bezeichnet). Zusätzlich kann ein „Subject Locator“ angegeben werden, der auf das tatsächlich in der realen Welt vorhandene Subject verweist. In Abgrenzung dazu kann es bei der anderen Brücke zwischen realer Welt und Topic Map, den Occurrences, für jeder Topic beliebig viele Zuordnungen geben. Eine Occurrence referenziert auch auf die reale Welt, zeigt aber dort nicht auf das Subject selbst, sondern auf ein dieses Subject beschreibendes Objekt in der realen Welt. Beispielhaft ist dazu in Abbildung 6.3 dieser Zusammenhang anhand des Topics „Tasse“ dargestellt. Ein anderes Beispiel ist ein Topic „London“, das als Subject die reale Stadt London repräsentiert und dem eine

6. Persistierung

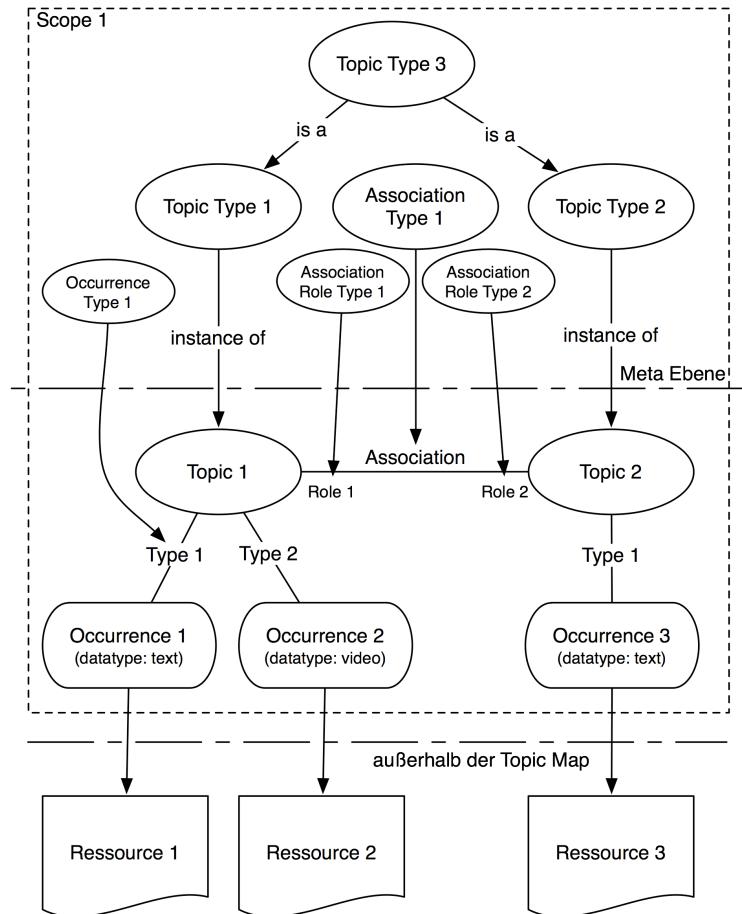


Abbildung 6.2.: Umfassende Darstellung der Elemente einer Topic Map

Occurrence zugeordnet werden könnte, die auf eine Landkarte (als in der Realität vorhandene Beschreibung der realen Stadt London) referenziert.

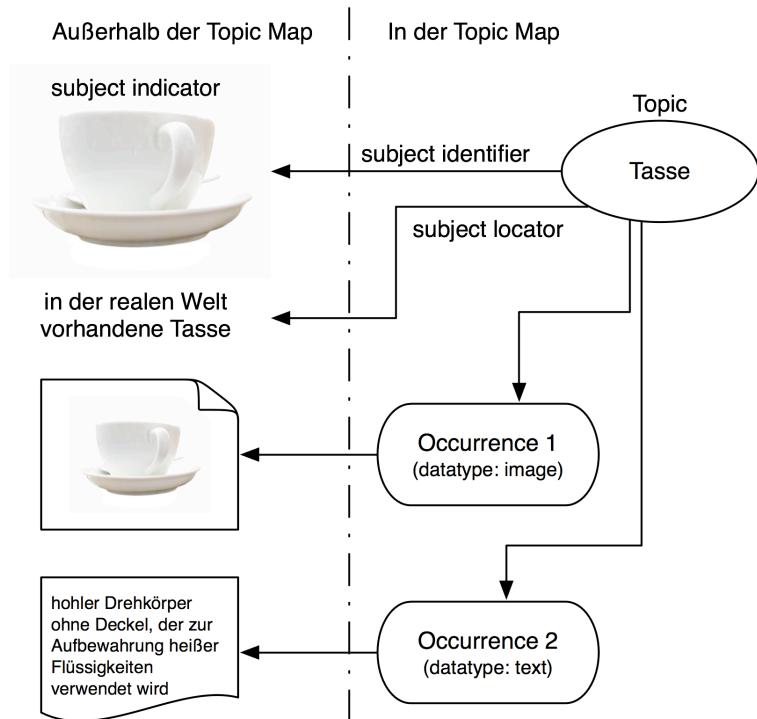


Abbildung 6.3.: Abgrenzung zwischen Subject und Occurrence in Topic Maps

Bislang wurde vereinfacht ein Topic immer mit einem direkt zugeordneten Namen dargestellt. In einer Topic Map besitzt ein Topic jedoch keinen eindeutigen Namen. Es wird vielmehr durch seinen Subject Identifier eindeutig gekennzeichnet. Dieser ist jedoch nicht unbedingt für Menschen les- und/oder interpretierbar – der Subject Identifier hat das Ziel, ein Subject für die Verarbeitung durch Software eindeutig zuordenbar zu machen. Für die Bezeichnung eines Topics in einer für Menschen interpretierbaren Form ist die Verwendung von „Topic Names“ vorgesehen (siehe Abbildung 6.4). Topic Names werden immer textuell angegeben und beschreiben das Subject, das durch das betreffende Topic referenziert wird. Durch einen Topic Name soll das Subject für Menschen erkennbar sein, wobei die Zuordnung nicht notwendigerweise eindeutig sein muss (Beispiel: der Topic Name „Jaguar“ kann ein Fahrzeug oder eine Großkatze bezeichnen und ist dementsprechend ein zulässiger Name für zwei unterschiedliche Topics). Einem Topic können beliebig viele Topic Names zugewiesen werden – es ist so zum Beispiel möglich, eine mehrsprachige Topic Map zu realisieren, in der zu jedem Topic Topic Names in unterschiedlichen Sprachen angegeben werden.

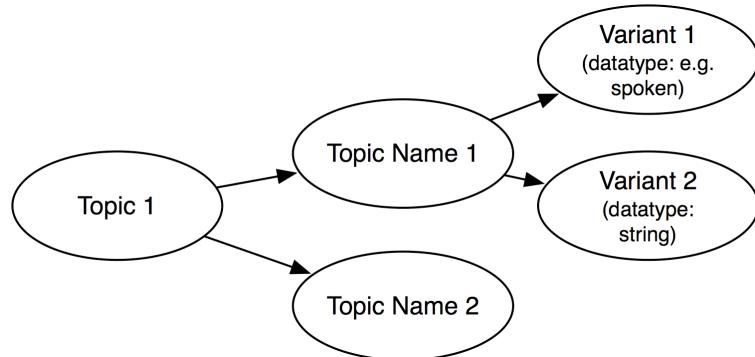


Abbildung 6.4.: Benennung von Topics

Als weitere Detaillierungsstufe können zu jedem Topic Name „Variants“ angegeben werden. Wie durch den Namen angedeutet, handelt es sich dabei um Varianten eines Topic Names, die in bestimmten Zusammenhängen oder für gewisse Anwendungszwecke besser geeignet sein können als der eigentlich Topic Name. Ein Beispiel für eine mögliche Variante ist die Angabe einer gesprochenen Version des Topic Names. Ein weiteres Anwendungsgebiet für Varianten ist die im Standard explizit vorgesehene Angabe eines „Sort Name“ (ISO JTC1/SC34/WG3, 2008, S. 18), der es erlauben soll, Topic Maps in eine durch diesen Namen vorgegebene Ordnung bringen zu können. Varianten werden durch die Angabe eines dezidiert dafür gewidmeten Topics in deren Scope (siehe Abschnitt 6.2.5) als Sort Names gekennzeichnet.

6.2.2. Associations und Roles

„Associations“ stellen Verbindungen zwischen den einzelnen Topics einer Topic Map her. Associations haben beliebig viele Endpunkte, mindestens jedoch einen (sind also nicht von vorneherein immer binär sondern können auch unär sein oder mehr als zwei Topics verknüpfen). Eine Associations enthält wie ein Topic nicht unmittelbar einen für Menschen lesbaren Namen. Diese wird durch ein Topic festgelegt, das die Kategorie festlegt, der die Association zuzuordnen sind (siehe Abschnitt 6.2.4). Diesem Topic kann wiederum mindestens ein Topic Name zugeordnet werden, welcher letztendlich die Benennung der Association festlegt.

Associations werden jedoch nicht direkt mit Topics verknüpft. Um ausdrucksstärkere Verknüpfungen realisieren zu können, agieren „Roles“ als Verknüpfung zwischen Association und den betreffenden Topics. Roles legen die „Rolle“ – also die Bedeutung – eines Topics in exakt der betrachteten Association fest. Diese Bedeutung kann generisch sein und zum Beispiel dazu verwendet werden, die per se ungerichteten Associations unabhängig von ihrer konkreten Bedeutung mit einer Richtung

zu verstehen (zum Beispiel durch die Zuordnung von Roles „Anfang“ und „Ende“) aber auch um die Beziehung semantisch anzureichern (zum Beispiel durch die Zuordnung von Roles „Verantwortlicher“, „Ausführender“ und „Prozessschritt“ in einer Association „durchzuführen“). Die Anzahl der in einer Association referenzierten Roles gibt damit auch die Kardinalität der Association (also die Anzahl ihrer Endpunkte) an. Aus den konkreten Roles wird dann auf die Topics verwiesen, die diese Roles einnehmen bzw. „spielen“ (tatsächlich heißt die betreffende Eigenschaft einer Role „player“). Genau wie Associations werden Roles nicht direkt benannt sondern über ein Topic, das ihre Kategorie bestimmt, mit einer Benennung versehen (Detail wiederum in Abschnitt 6.2.4).

6.2.3. Occurrences und Datatypes

Wie zu Beginn dieses Abschnitts bereits beschrieben und in den Erläuterungen zur Thematik der Subjects (siehe Abschnitt 6.2.1) angedeutet, bilden „Occurrences“ die Brücke aus der Topic Map in die reale Welt, indem sie auf Ressourcen referenzieren, die in einem beliebigen Zusammenhang mit den jeweiligen Topic stehen. Ein Topic kann beliebig viele Occurrences haben. Anders als bei Associations existieren für Occurrences keine Roles (was auch nur bedingt sinnvoll wäre, da jede Occurrence nur zu exakt einem Topic gehören kann). Die Bedeutung der Occurrence für das Topic kann wie bei Associations über die Kategorie der Occurrence festgelegt werden, die wiederum durch ein separates Topic repräsentiert wird (siehe dazu auch Abschnitt 6.2.4). Beispielsweise kann eine Occurrence zur Kategorie „Karte“ gehören und so angeben, dass die so klassifizierte Occurrence zum Topic „London“ auf eine Karte des Stadtgebiets verweist.

Zusätzlich zu der Kategorie wird in einer Occurrence auch der Datentyp der Information angegeben, in dem die referenzierte Information vorliegt. Dabei können beliebige URI (Uniform Resource Identifiers³) verwendet werden. Da URIs beliebigen Inhalt haben können, wäre es in obigen Beispiel möglich durch den Datentyp einer Occurrence festzulegen, ob es sich bei der Karte um eine Rastergrafik oder eine Vektorgrafik handelt und so Information über deren möglich Einsatzgebiete zu einzubetten.

6.2.4. Metamodellierung in Topic Maps

Wie oben bereits mehrmals angedeutet kann in einer Topic Map neben den eigentlichen zu repräsentierenden Informationen (Topics, Associations, Roles und Occurrences) auch Information über die Topic Map selbst eingebettet werden (neben

³wie in RFC 3986 definiert und unter <http://www.ietf.org/rfc/rfc3986.txt> abzurufen

6. Persistierung

dem Model also auch das Meta-Modell abgebildet werden kann). Die Information umfasst Angaben über die in der jeweiligen Topic Map existierenden Kategorien von Topics, Topic Names, Associations, Roles und Occurrences. Hinsichtlich der Repräsentation dieser Information sind zwei Ansätze zu unterscheiden, von denen der erste bei Kategorieangaben von Topics zum Einsatz kommt, der andere bei Kategorieangaben jeder anderen Art von Information. Allen Kategorien ist gemein, dass sie selbst wiederum als Topics repräsentiert werden und auch als solche verwendet werden können. Es ist also möglich, zu einem Topic, das als Kategorie verwendet wird, selbst wiederum eine Kategorie anzugeben, wodurch die Einführung beliebig vieler Meta-Ebenen möglich ist. Außerdem können als Kategorien verwendete Topics ebenfalls wieder mit Associations verknüpft und mit Occurrences versehen werden. Hinsichtlich der Nomenklatur ist noch darauf hinzuweisen, dass Kategorien im Allgemeinen als „Types“ bezeichnet werden, man also von „Topic Types“, „Topic Name Types“, „Association Types“, „Role Types“ und „Occurrence Types“ spricht.

Topic Types

Topic Types werden in einer Topic Map durch ein spezielle, im Standard festgelegte Association definiert. Soll einem Topic ein Type zugewiesen werden, muss eine Association der Kategorie „type-instance“ eingefügt werden, bei der das Topic selbst die Role „instance“ einnimmt und dem Topic, das die Kategorie repräsentiert, die Role „type“ zugewiesen wird. Diese Beziehung entspricht einer Konkretisierung einer (abstrakten) Kategorie oder Klasse von Topics auf eine bestimmte Instanz, die die Merkmale dieser Klasse trägt. In Abbildung 6.5 besteht eine type-instance-Beziehung (dort als „instance-of“ bezeichnet) zwischen der Kategorie „VW Golf“ und der konkreten Instanz „SR-174 AU“ (also einem Topic, bei dem das amtliche Kennzeichen als Topic Name verwendet wurde). „VW Golf“ fungiert hier also als Topic Type, wobei es selbst ein Topic ist, das sich durch nichts als die eingenommene „type“-Rolle von einem anderen Topic unterscheidet und dementsprechend behandelt werden kann.

Einem Topic können beliebig viele Topic Types zugewiesen werden, indem es in mehr als einer Association die Role „instance“ einnimmt. Es wird so als mehreren Kategorien zugehörig gekennzeichnet. Umgekehrt kann ein Topic Type mehr als einem Topic zugewiesen werden, indem das betreffende den Topic Type repräsentierende Topic die Role „type“ mehrfach einnimmt.

Auch ist es möglich, Hierarchien von Types zu bilden, in dem einem Topic, das als Topic Type fungiert, selbst wieder ein Topic Type zugewiesen wird. Dieses Konstrukt ist jedoch mit Vorsicht zu gebrauchen, da zur Abbildung der Struktur einer Domäne ein semantisch ähnliches, bei näherer Betrachtung aber eine unterschiedliche Bedeutung tragendes Konstrukt zum Einsatz kommt. Grundsätzlich muss un-

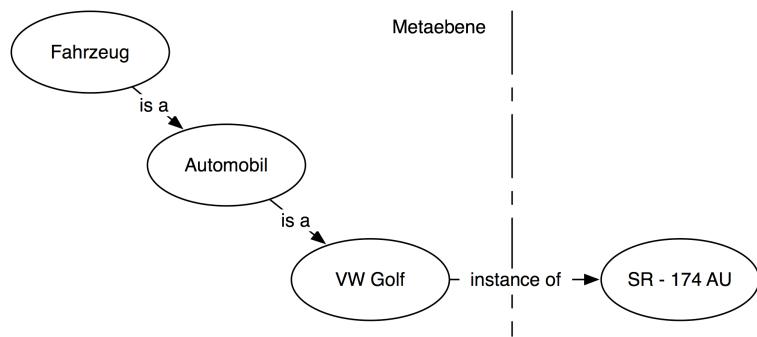


Abbildung 6.5.: Beziehungen in der Metamodellbildung in Topic Maps

terschieden werden, ob ein Topic eine konkrete Instanz eines anderen ist oder lediglich eine Spezialisierung darstellt. Im ersten Fall kommt eine „type-instance“ zum Einsatz, das übergeordnete Topic befindet sich semantisch auf einer anderen, abstrakteren Ebene und stellt eine Kategorie (also einen Topic Type) dar. Im Falle einer Spezialisierung kommt eine „supertype-subtype“-Association zum Einsatz, deren Rollen „supertype“ vom übergeordneten, allgemeineren bzw. „subtype“ vom untergeordneten, spezielleren Topic eingenommen wird. Hier befinden sich beide Topics semantisch auf einer Ebene, keines ist abstrakter als das andere. Der Unterschied liegt vielmehr in der mehr oder weniger konkreten Festlegung der durch die Topics repräsentierten Subjects. So ist wie in Abbildung 6.5 dargestellt das Topic „VW Golf“ ein Subtype des Topics „Automobil“ welches wiederum ein Subtype des Topics „Fahrzeug“ ist. Hier ist erkennbar, dass „Automobil“ insofern eine Spezialisierung von „Fahrzeug“ ist, als dass es im Allgemeinen motorisiert ist und vier Räder besitzt. „VW Golf“ ist wiederum eine Spezialisierung von Fahrzeug, die hinsichtlich der Form der Karosserie, der Anzahl der Türen und anderen Merkmalen mehr spezialisiert. Zwischen keinem der Topics findet jedoch eine Konkretisierung in dem Sinne statt, als dass auf der untergeordneten Seite von einem konkreten, real existierenden Fahrzeug die Rede wäre – dazu ist die „type-instance“-Beziehung zu verwenden. Die „subtype-supertype“-Beziehung ist transitiv, d.h. dass ein „VW Golf“ nicht nur ein „Automobil“ ist, sondern auch ein „Fahrzeug“. Für „type-instance“-Beziehungen ist diese Eigenschaft nicht gegeben.

Andere Types

Bei allen anderen Types (konkret also Topic Name Types, Association Types, Role Types und Occurrence Types) wird die Kategorie nicht durch eine separate Association abgebildet sondern durch eine im jeweiligen Informationselement enthaltene Referenz auf ein Topic, das als Type fungiert. Die Darstellung der Kategorie-

6. Persistierung

Information ist damit nicht so explizit wie bei Topic Types, wo sich direkt in der Repräsentation der eigentlichen Nutzinformation niederschlägt. Auch semantisch ist sind die hier behandelten Types gegenüber Topic Types insofern eingeschränkt, als das jedem Element exakt ein Type zugeordnet sein muss (der Type kann also nicht leer sein, auch können nicht mehrere Types zugeordnet werden). Wie oben bereits erwähnt sind Topic Types hier flexibler, einem Topic können beliebig viele oder auch keine Topic Types zugeordnet werden. Dies ist aber nur vordergründig eine Einschränkung. Topics dürfen wie oben beschrieben für jedes Subjekt nur einmal existieren. Hat aber ein Subject und damit ein Topic in unterschiedlichen Domänen unterschiedliche Bedeutungen, muss dies über mehrere Topic Types (in Verbindung mit Scopes, siehe Abschnitt 6.2.5) abgebildet werden. Alle anderen Informationskategorien in der Topic Map unterliegen nicht dieser Eineindeutigkeitsregel und können bzw. müssen, sollten sie unterschiedlichen Kategorien zuzuordnen sein, auch mehrfach vorhanden sein. Eine Assoziation, die einen anderen Namen trägt (also einer anderen Kategorie angehört) ist beispielsweise nicht identisch mit der ursprünglichen Assoziation, deren Name ebenfalls bereits durch die Zuordnung zu einer Kategorie festgelegt wurde.

Modellieren von Einschränkungen

Der Topic Map Standard erlaubt zwar die Angabe von Metamodellelementen (Types), ermöglicht es aber nicht Regeln anzugeben, anhand derer der semantisch korrekte Aufbau einer Topic Map geprüft werden. Ed ist beispielsweise möglich, einen Association-Type „hat Mitglieder“ zu definieren, der mittels den Roles „Organisationseinheit“ und „Mitarbeiter“ die Zuordnung von Mitarbeitern zu den Organisationseinheiten eines Unternehmens zuzuordnen. Es ist jedoch in der Topic Map nicht möglich zu spezifizieren, dass beispielsweise mindestens drei Mitarbeiter zugeordnet werden müssen oder dass es in dieser Beziehung nur eine Organisationseinheit geben darf. Weiters kann nicht spezifiziert werden, durch Topics welchen Types die jeweiligen Roles eingenommen werden dürfen – beispielsweise ist eine Zuordnung von Produktionsmitteln in der Role „Mitarbeiter“ zulässig bzw. kann sie nicht als unzulässig gekennzeichnet werden.

Ist eine derartige semantische Einschränkung bei der Topic Map Erstellung und die Einführung verbindlicher Strukturvorgaben notwendig, so muss dies außerhalb der Topic Map oder durch externe Interpretation spezifischer Topic Map Elemente geschehen. In ersterem Fall kann die noch nicht in finalem Zustand vorliegende TM-CL (Topic Map Constraint Language, (ISO JTC1/SC34, 2008)), eine Regelsprache zur Einschränkung der Repräsentationsmöglichkeiten in einer Topic Map, verwendet werden. Im zweiten Fall können die Metamodell-Elemente (also alle Topics, die als Types verwendet werden) durch zusätzliche Associations verknüpft werden, die

semantisch so interpretiert werden, dass sie eine zulässige Kombination von Topics der jeweiligen Kategorie anzeigen.

6.2.5. Statements und Scopes

Topic Maps bieten die Möglichkeit, Gültigkeitsbereiche für die in ihnen abgebildeten Informationen zu spezifizieren. Ein Gültigkeitsbereich definiert, in welchem Kontext eine Information gültig ist. Außerhalb dieses Kontext kann über die Gültigkeit keine Aussage getroffen werden. Der Gültigkeitsbereich wird als „Scope“ bezeichnet. Ein Scope kann für jedes „Statement“ in der Topic Map gesetzt werden. Statements sind alle „Aussagen“ über Topics, die in der Topic Map abgebildet werden, nicht aber Topics selbst. Als Statement werden Topic Names, Associations und Occurrences betrachtet. Roles und Variants besitzen keinen Scope, da sie keine direkte Aussage über Topics treffen, sondern nur im Zusammenhang mit Associations bzw. Topic Names existieren, deren Scope sich quasi auf sie vererbt.

Ein Scope für ein Statement wird durch die Angabe eines oder mehrerer Topics festgelegt. Wird kein Topic angegeben, so gilt der „unconstrained scope“, das Statement ist unbeschränkt gültig. Topics zur Abbildung von Scopes können explizit angelegt werden (z.B. Topics „Deutsch“ und „Englisch“, die Sprach-Scopes ermöglichen, Topics „Tierwelt“ und „Transportwesen“ zur Domänenabgrenzung – siehe Abbildung 6.6), es ist jedoch grundsätzlich auch möglich, die Gesamtheit der Topics einer Domäne zur Definition eines betreffenden Scopes heranzuziehen (also alle in der Topic Map vorhandenen Topics, die Tiere repräsentieren, als Scope zu verwenden, um den Gültigkeitsbereich „Tierwelt“ abzubilden). Obwohl der Topic Map Standard hier explizit offen bleibt, erscheint jedoch erstere Variante hinsichtlich der Verwaltbarkeit aber auch der semantischen Vollständigkeit wegen als ratsamer (das Konzept „Tierwelt“ käme ansonsten z.B. nicht notwendigerweise vor, sondern wäre nur implizit vorhanden, was eine Auswertung schwierig macht).

Wird mehr als ein Topic angegeben, so bilden alle Topics gemeinsam den Kontext, indem das Statement gültig ist. Bei der Auswertung des Gültigkeitsbereichs müssen also alle angegebenen Topics zutreffen, damit ein Statement gültig ist. Ein Statement dessen Scope die Topics „Tierwelt“ und „Deutsch“ enthält, ist also nur gültig, wenn beide Topics zutreffen (also z.B. zur Filterung ausgewählt wurden). Die gültigen Statements sind also die Schnittmenge jener der Statements, die im Scope „Tierwelt“ und im Scope „Deutsch“ gültig sind (siehe Abbildung 6.6). Die Angabe eines Scopes zu einem Statement, das in beiden Scopes (unabhängig voneinander gesehen) gültig sein soll, ist nicht direkt möglich. In diesem Fall muss das Statement zweimal jeweils unter Angabe eines der beiden Scopes eingefügt werden.

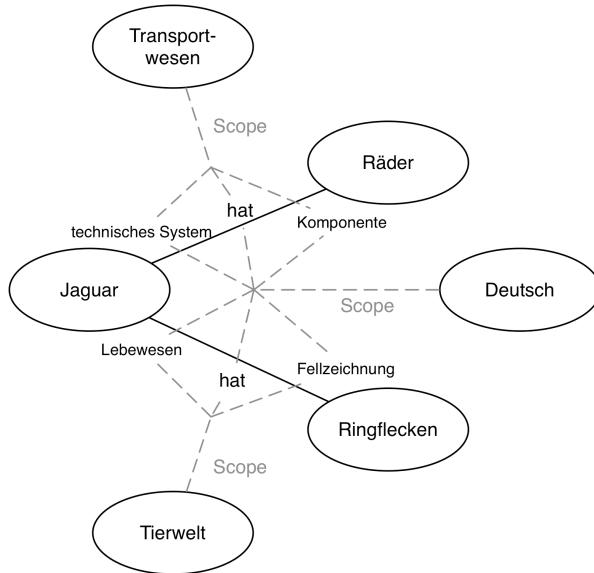


Abbildung 6.6.: Abbildung von Gültigkeitsbereichen durch Scopes

Für Topics selbst kann kein Scope angegeben werden. Das ist hinsichtlich des Topic Maps zugrunde liegenden Konzepts auch nicht sinnvoll, da Topics immer ein Phänomen der realen Welt, das Subject, repräsentieren, das selbst immer vorhanden ist und dessen Gültigkeit bzw. Existenz nicht von anderen Rahmenbedingungen wie anderen Subjects abhängt. Dementsprechend existiert ein Topic immer, lediglich seine Bezeichnung, die Beziehungen zu anderen Topics oder seine Occurrences können abhängig vom einem Scope unterschiedlich sein.

6.2.6. Reification

Wie bereits zu Beginn angeführt, können in einer Topic Map beliebige Inhalte abgebildet werden, jegliche Phänomene der realen Welt können durch Topics repräsentiert werden. Konsequenterweise können nun auch Elemente der Topic Map selbst oder sogar die Topic Map ansich durch ein Topic dargestellt werden. Eine derartige selbstbezügliche Abbildung wird als „Reification“ bezeichnet. Der Ausgangspunkt für eine Reification kann ein Statement sein oder eine Topic Map selbst. Topics können nicht verwendet werden, da ein sie repräsentierendes Topic semantisch äquivalent mit dem Ausgangspunkt wäre und damit zwei Topics vorhanden wären, die das gleiche Subject referenzieren. Nachdem die Abbildung zwischen Subject und Topic eineindeutig sein muss, ist ein derartiges Konstrukt nicht erlaubt.

In Abgrenzung zur Types (Association Types, Occurrence Types,...) repräsentiert ein reifizierendes Topic nicht die Kategorie eines Elements sondern das konkrete Element selbst. Es ist so möglich, einem konkreten Element wie einer Association zusätzliche Information hinzuzufügen (etwa eine Occurrence) oder auch eine bestehende Topic Map als Ganzes zu kapseln und durch das sie reifizierende Topic Bezug zu nehmen.

6.2.7. Merging

Unter „Merging“ versteht man die Vereinigung zweier voneinander getrennter Topic Maps zu einer gemeinsamen Map. Dabei ist vor allem die Eineindeutigkeitsregel zu beachten, für ein Subject darf also in der resultierenden Topic Map nur ein Topic existieren. Strukturell nicht kritisch, jedoch die Verwendbarkeit einschränkend sind mehrfach auftretende semantisch identische Statements. Soweit möglich, sollten auch diese Duplikate im Merging-Prozess entfernt werden.

Der Topic Map Standard definiert für jede Art von Element Regeln, anhand der festgestellt werden kann, ob zwei Elemente dieser Art identisch sind oder nicht. Ausgangspunkt sind immer die Topics, wobei beim Vergleich ausschließlich vom abgebildeten Subject ausgegangen werden muss. Sind die Subjects identisch, sind im Wesentlichen auch die beiden Topics identisch und können durch eine gemeinsame Topic ersetzt werden. Auf Basis der vereinigten Topic Menge werden nun die enthaltenen Statements verglichen. Damit Statements als identisch erkannt werden, müssen nicht nur ihr eigentlicher Inhalt sondern auch ihre Kategorie (Type), ihr Gültigkeitsbereich (Scope) und das/die ihnen zugeordnete(n) anderen Element(e) identisch sein. Eine Role ist also nur dann mit einer anderen Role identisch, wenn ihr Type, ihr Scope, die Association, der sie angehört und das referenzierte Topic identisch ist. Daraus folgt, das in der Merging-Reihenfolge zuerst die Topics, dann die eigenständigen Statements wie Topic Names, Associations und Occurrences und letztendlich die abgängigen Statements wie Roles und Variants behandelt werden müssen.

6.3. Abbildung von Modellen auf Topic Maps

Diagrammatische Modelle (Oppl und Stary, 2005) können direkt ohne zusätzliche Transformationen auf Topic Maps abgebildet werden. Derartige Modelle bestehen aus Knoten und Kanten, die Verwendung dieser im konkreten Anwendungskontext ist durch die Modellierungssprache festgelegt. In den folgenden Abschnitten wird nun beschrieben, wie die einzelnen Aspekte eines diagrammatischen Modells auf eine Topic Map abgebildet werden können.

6.3.1. Grundlegende Abbildung

Der nahe liegendste Ansatz, um diagrammatische Modelle auf Topic Maps abzubilden, werden nun die Knoten auf Topics, die Kanten auf Associations abzubilden (siehe Abbildung 6.7, Variante 1). Ist in den Kanten mehr Information als die bloße Anzeige der Verbindung von zwei Knoten abgebildet (wie z.B. in UML⁴ State Charts (Rumbaugh et al., 2004), bei denen die zu einem Zustandsübergang führenden Ereignisse inkl. Bedingungen und ablaufende Aktionen in den Kanten repräsentiert werden), so kann es sinnvoll sein, auch die Kanten auf Topics abzubilden, da diesen auf dem Wege der Occurrences zusätzliche Information zugewiesen werden kann (siehe Abbildung 6.7, Variante 2). Associations würden in diesem Fall verwendet, um die Knoten und Kanten des Modells zu verbinden, spielen also in der Repräsentation der Information nur noch eine untergeordnete Rolle. Ein Weg, die direkte Abbildung beizubehalten (indem Knoten auf Topics und Kanten auf Associations abgebildet werden) ist, zur Repräsentation der zusätzlich in den Kanten liegenden Information die Möglichkeit der Reification zu nutzen, den Associations also Topics zuzuweisen, die genutzt werden können, um diese zusätzliche Information zu verwalten (siehe Abbildung 6.7, Variante 3).

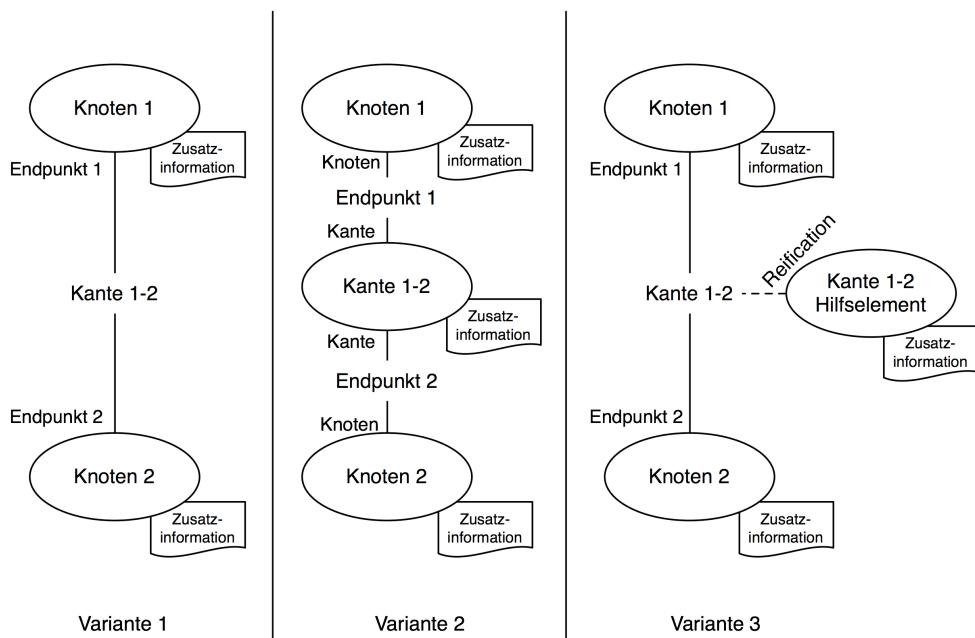


Abbildung 6.7.: Abbildung von Modellinformation in Topic Maps

⁴Unified Modelling Language

Die Bedeutung der Knoten des abzubildenden Modells im Kontext einer bestimmten Kante muss in den direkt abbildenden Varianten (in denen Kanten auf Associations abgebildet werden) durch Roles dargestellt werden. In der indirekten Abbildung (bei der Kanten auf Topics abgebildet werden), kann diese Information auch in den Associations repräsentiert werden, die die Topics die Knoten darstellen und jene die Kanten darstellen miteinander verbinden.

6.3.2. Abbildung des Metamodells

Da Topic Maps von vorne herein nicht auf eine bestimmte semantische Bedeutung der Topics und Associations festgelegt sind, muss auch das Meta-Model der abgebildeten Modellierungssprache mit eingebettet werden. Dies wird in Topic Maps durch die Einbindung von Types ermöglicht. In den nun folgenden Ausführungen wird nur noch auf die direkt abbildende Variante Bezug genommen, da deren Ausdrucksstärke durch die Möglichkeit zur Reification gegenüber dem indirekt abbildenden Ansatz nicht eingeschränkt ist und die unmittelbare Abbildung zu insgesamt kleineren, einfacher zu verwaltenden Topic Maps führt (für eine Kanten wird nur eine Association benötigt, im Gegensatz dazu benötigt der alternative Ansatz ein Topic und mindestens zwei Associations zu Abbildung einer Kante).

Die in der Modellierungssprache festgelegten Arten von Knotentypen (also den eigentlichen Modellierungselementen) werden auf Topic Types abgebildet. Durch die Referenzierung eines einen Knoten repräsentierenden Topics auf diesen Topic Type wird die Bedeutung zugewiesen.

Ebenso wird mit Kanten verfahren. Durch die Einführung von Topics die als Association Types und Role Types fungieren, kann die Bedeutung einer Kante im abzubildenden Modell definiert werden. Dazu wird ein Association Type festgelegt, der die eigentliche Bedeutung der Kante festlegt, die zugehörigen Role Types definieren, wie viele Endpunkte existieren und welche Bedeutung diese haben. Für eine konkrete Kante wird dann eine Association und eine der Anzahl der Endpunkte entsprechende Nummer an Roles erstellt, denen der jeweilige Association bzw. Role Type zugewiesen wird.

Die Verwendung von Occurrences und dementsprechend die Erstellung von Occurrence Types ist zur reinen Abbildung von diagrammatischen Modellen nicht notwendig. Die Verwendung von Occurrences kann aber sinnvoll sein, wenn aus dem ursprünglichen Modell ebenfalls Ressourcen referenziert werden, die für die weitere Verarbeitung des Modells notwendig sind. Occurrences werden dann im Sinne der Topic Map zur Referenzierung dieser Ressourcen verwendet, wobei sich die zu verwendenden Occurrence Types an der Bedeutung der Ressourcen im abzubildenden Modell orientiert.

6. Persistierung

Wie in Abschnitt 6.2.4 bereits beschrieben, bietet die Topic Map selbst jedoch keine Möglichkeit, eine explizite Zuordnung zwischen Topic Types, Association Types und Role Types zu definieren, so dass ein in einer Topic Map repräsentiertes Modell auf semantische Korrektheit hin überprüft werden kann. Die einzige ohne zusätzliche Information überprüfbarer Bedingungen sind die Prüfungen, ob alle Knoten und Kanten (also Topics, Associations und Roles) einer Kategorie (also einem Type) zugewiesen wurden.

Zusätzlich muss also eine externe Möglichkeit geschaffen werden, semantische Korrektheits-Bedingungen zu formulieren und zu überprüfen:

1. Zulässige Kategorien von Knoten (Topic Types)
2. Zulässige Kategorien von Kanten (Association Types, Role Types und eine Zuordnung zwischen diesen, die eine Aussage über die Anzahl und Bedeutung der Endpunkte der Kante zulässt)
3. Zulässige Verbindungen zwischen Knoten und Kanten (Zuordnung zwischen Endpunkten einer Kantenkategorie und den Knotenkategorien, die diese Endpunkte belegen dürfen – also eine Zuordnung zwischen Role Types und Topic Types)

Wie bereits oben beschrieben, können derartige Bedingungen innerhalb oder außerhalb der Topic Map formuliert werden. Die Interpretation der formulierten Bedingungen und deren Anwendung auf konkrete Anwendungsfälle muss immer von außerhalb der Topic Map durchgeführt werden. Hier wird der Ansatz der Repräsentation der Bedingungen innerhalb der Topic Map verfolgt, um durch die Übermittlung einer Topic Map nicht nur ein Modell an sich zu übertragen sondern auch jene Information zu liefern, die zur Interpretation derselben notwendig ist.

Die Formulierung der Bedingungen erfolgt auf Ebene der als Types eingesetzten Topics und vervollständigt so das in der Topic Map enthaltene Meta-Modell der Sprache in der das zu repräsentierende Modell erstellt wurde. Die Information über zulässige Knoten und Kanten wird über die Festlegung von entsprechenden Types definiert. Für jeden Typen wird ein Topic eingeführt, das aus dem auf die Topic Map abgebildeten Modell referenziert werden kann. Alle oben notwendigen Zuordnungen zwischen diesen Types werden über Associations abgebildet, die die als Types verwendeten Topics verbinden (siehe Abbildung 6.8).

Die Definition der Kantentypen erfolgt über eine Association mit mindestens drei Roles. Eine dieser Roles referenziert den Association Type, die anderen Roles verweisen auf die zu verwendenden Role Types, die zur Beschreibung der Endpunkte der Kante verwendet werden (wovon mindestens zwei vorhanden sein müssen). Die Angabe der Kardinalität (d.h. wie oft ein bestimmter Endpunkt im konkreten Modell auftreten darf) wird durch eine die jeweilige Role reifizierendes Topic festgelegt.

Meta-Modell

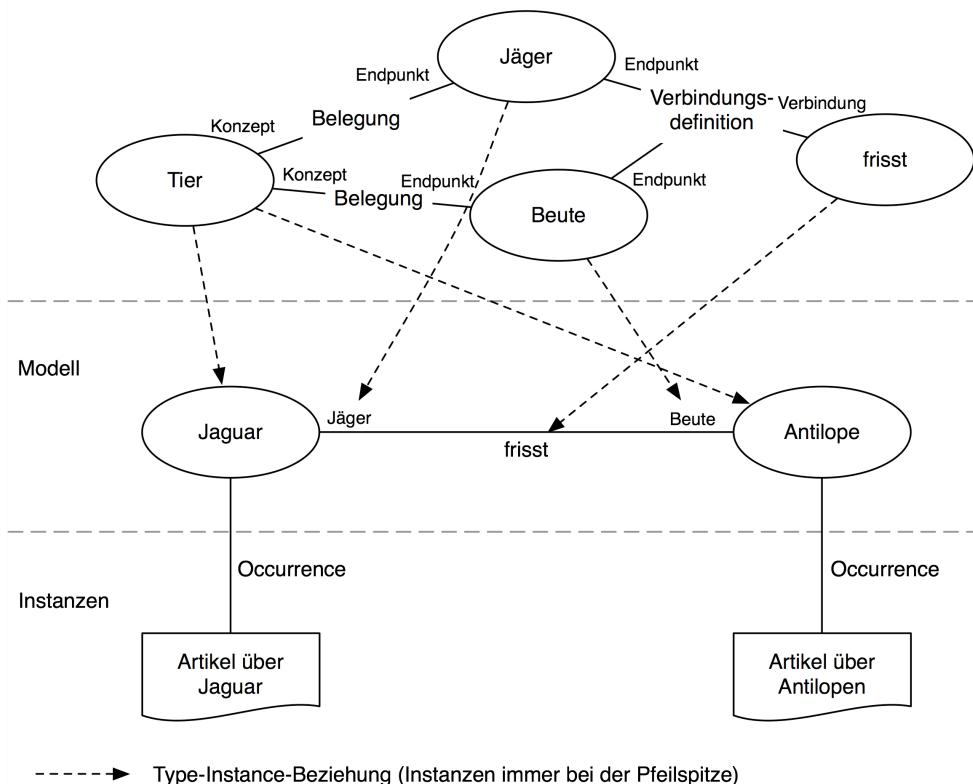


Abbildung 6.8.: Definition des Meta-Models (ohne Kardinalitäten)

Ähnlich wird die Zuordnung zwischen Endpunkten und Knotenkategorien realisiert. Zwischen den entsprechenden Topic Types und Role Types werden Associations erstellt, die festlegen, ob eine bestimmte Knotenkategorie einen Endpunkt einnehmen darf oder nicht. Dazu enthält die betreffende Association mindestens zwei Roles, von denen eine auf den Role Type verweist, der den Endpunkt realisiert und eine entsprechende Anzahl von Roles, an die die zulässigen Topic Types (also Knotenkategorien) angebunden werden.

Die eben beschriebenen Abbildungsvorschriften selbst werden ebenfalls in der Topic Map abgebildet. Die Topic Map enthält damit auch das Meta-Meta-Modell das die Elemente die zur Festlegung eines Meta-Models und deren Zusammenspiel festlegt. Eine so definierte Topic Map ist also semantisch vollständig definiert und ermöglicht eine Rekonstruktion eines Modells, das in einer im Vorfeld unbekannten Sprache modelliert wurde, sofern lediglich das Meta-Meta-Modell bekannt ist, dass zur Interpretation der Sprachbeschreibung (Meta-Modell) notwendig ist (siehe Abbildung 6.9).

6.3.3. Abgrenzung von Submodellen

In einem Modell kann es sinnvoll oder notwendig sein, unterschiedliche Modellbereiche voneinander abzugrenzen. Der Grund für die Abgrenzung kann ein inhaltlicher sein (z.B. eine Partitionierung nach Akteuren bei Aktivitätsdiagrammen (Rumbaugh et al., 2004)) oder aus dem Modellierungsvorgang heraus motiviert sein (etwa bei der Abgrenzung von Teilmodellen, die durch verschiedene Personen erstellt wurden). Außerdem ist es möglich, in einer Topic Map mehrere Modelle zu repräsentieren, die ebenfalls voneinander abgrenzt werden müssen.

Für diese Abgrenzung bietet sich die Verwendung von Scopes an. Scopes haben zwar keinen Einfluss auf die vorhandenen Topics, wirken jedoch auf die Statements und – hier relevant – vor allem auf die die Topics verbindenden Associations. Werden also Scopes eingesetzt, um Teilmodelle voneinander zu unterscheiden bzw. zu trennen, so können die im Moment nicht relevanten Teilmodelle zwar nicht „ausgeblendet“ werden (im Sinne von „temporär vollkommen entfernt“, durch die Entfernung der nicht relevanten Statements sind jedoch nur noch jene Topics untereinander verbunden, die dem aktuell betrachteten Submodell angehören. Ausgehend von einer beliebigen, im Scope gültigen Association oder einem Topic, das bekannterweise dem aktuellen Teilmodell angehört kann so der gesamte relevante Teil der Topic Map erschlossen werden.

Die Realisierung der Trennung zwischen Teilmodellen durch das Ausblenden irrelevanter Verbindungen zwischen Topics birgt einen weiteren potentiellen Vorteil. Werden in einer Topic Map mehrere untereinander zusammenhängende Modelle

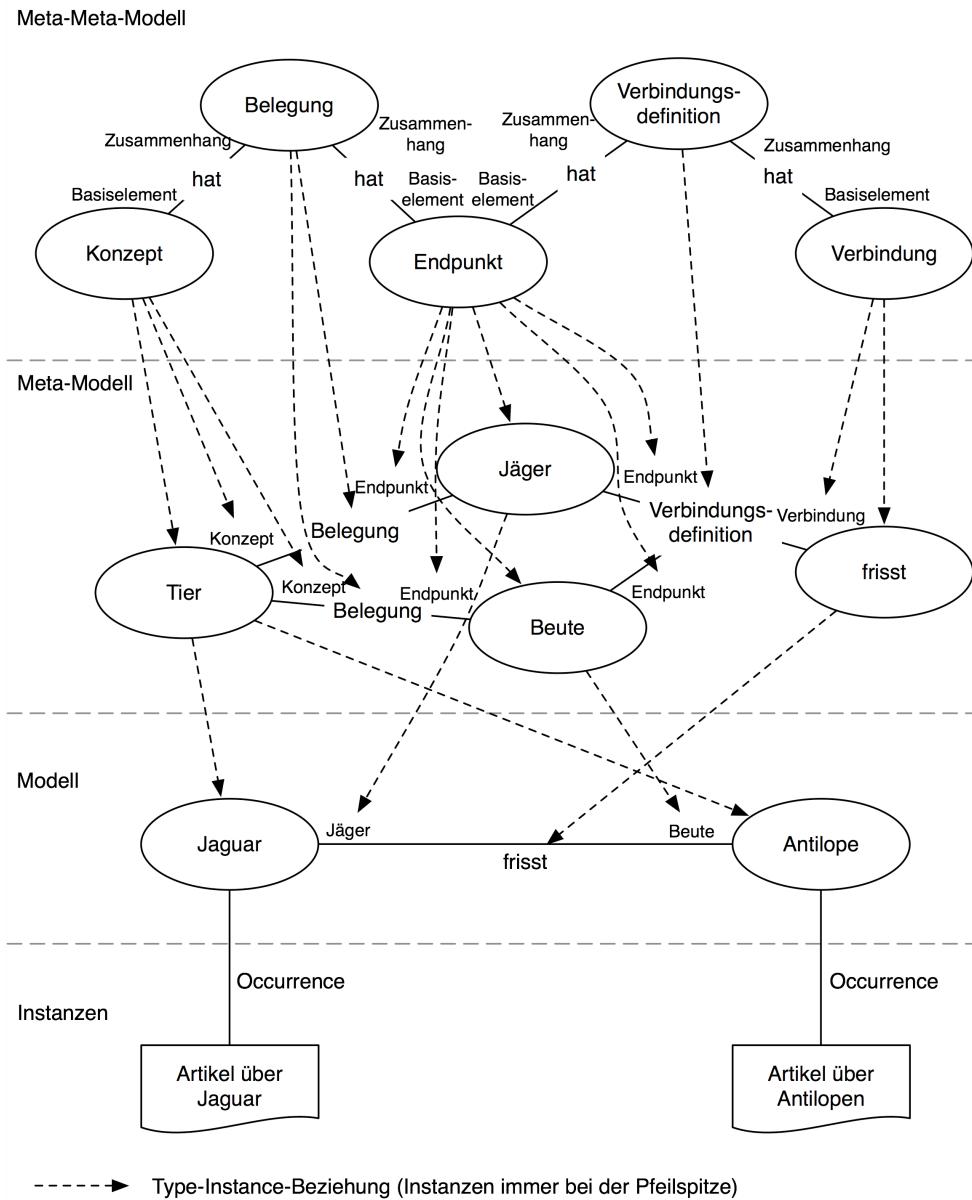


Abbildung 6.9.: Einbindung des Meta-Meta-Modells

abgebildet, so wird – der Grundforderung einer Topic Map nach Eineindeutigkeit entsprechend – jedes Element nur einmal abgebildet, egal ob es in nur einem Modell verwendet wird oder in mehreren. Durch den Einsatz von Scopes bilden in mehreren Modellen verwendete Elemente automatisch eine Schnittstelle, an der zwischen den Modellen navigiert werden kann. Dieser Vorteil muss in herkömmlichen Modellierungsansätzen mit mehreren untereinander verknüpften Modellen wie der UML (Rumbaugh et al., 2004) oder ARIS (Scheer, 2003) technisch durch explizite Verknüpfung bzw. Referenzierung der äquivalenten Modellelemente in den unterschiedlichen Modellen erzeugt werden.

Zur Kennzeichnung des Scopes muss zumindest ein Topic verwendet werden. Im Meta-Modell muss festgelegt werden, ob dazu ein Topic eines bestehenden Types verwendet wird oder ein neuer Type eingeführt werden, dessen Topics ausschließlich zum Aufspannen eines Scopes verwendet werden. Dazu wird im Meta-Meta-Modell ein Type „Partition“ eingeführt, der für alle Elemente des Meta-Modells verwendet werden muss, deren konkrete Instanzen einen Scope im Modell kennzeichnen sollen.

6.3.4. Flexibilisierung der Abbildung

Wie in Kapitel XY beschrieben, ist das Meta-Modell von Modellen die im vorgestellten Ansatz entstehen, nicht im vorhinein festgelegt. Die Modellierungssprache – also das Meta-Modell – wird während der Modellbildung semantisch definiert und ist damit erst zur Modellierungszeit bekannt. Das Metamodell kann außerdem während der Modellierung erweitert werden, es ist auch möglich, dass sich die Bedeutung bereits existierender Meta-Modell-Elemente ändert.

Für die Persistierung bedeutet dies, dass das Meta-Modell nicht im Vorhinein sondern erst zum Zeitpunkt der Speicherung festgeschrieben werden kann. Außerdem kann die Prüfung auf semantische Korrektheit des Modells ebenfalls nur durchgeführt werden, sobald das Modell definiert ist.

Um die geforderte Flexibilität bei der Sprachdefinition in Form und Zeitpunkt zu gewährleisten, wurde von Neubauer (2008) ein System entwickelt, dass es erlaubt, dynamisch zur Laufzeit Modellelemente zu definieren, die Regeln zu deren Verwendung festzulegen und diese ohne Unterbrechung des Modellierungsvorgangs unmittelbar zu verwenden (wobei auch die Prüfung der semantischen Korrektheit zur Laufzeit adaptiert wird). Die technische Umsetzung dieses Ansatzes wird in Abschnitt 6.4.2 beschrieben.

6.4. Technische Umsetzung der Persistierung von Modellen

Die oben beschriebenen Konzepte zur Persistierung von Modellen wurden wie die übrigen Software-Komponenten des Systems in Java implementiert. Die Basis der Persistenz-Komponente bildet eine Topic Map Engine, die im Rahmen einer Arbeit über flexible Content-Repräsentation vom Autor entwickelt wurde (Oppl, 2007). Das in (Neubauer, 2008) entwickelte System zur Generierung und Verwendung dynamischer Metamodelle, das bereits in Abschnitt 6.3.4 konzeptuell beschrieben wurde, wird in der Folge hinsichtlich seiner technischen Umsetzung betrachtet. Basierend auf diesen beiden Komponenten wurde die eigentlichen Persistierung implementiert. Der dort verfolgte Ansatz ist Thema des letzten Teils dieses Abschnitts.

6.4.1. Topic Map Engine

Als Topic Map Engine bezeichnet man ein Software-Modul, mit dessen Hilfe Topic Maps verwaltet werden können und das im Normalfall auch Funktionalität zur Persistierung der Topic Map anbietet. Für den Topic Map Standard REF, der dieser Arbeit zugrunde liegt, war zum Zeitpunkt der Erstellung der Software nur eine derartige Engine vertrieben, die von Ontopia⁵ kommerziell vertrieben wird und keine offenen Schnittstellen bietet. Zu diesem Zeitpunkt noch nicht für den verwendeten Topic Map Standard verfügbar war die Open-Source-Engine TinyTIM⁶, die auf Basis der ebenfalls erst seit einigen Monaten verfügbaren Topic Map API⁷ eine offene Schnittstelle zur Verwaltung von Topic Maps in Java anbietet und unterschiedliche Formate zur Persistierung und zum Import unterstützt.

Für diese Arbeit wurde mangels verfügbarer Alternativen eine eigene Topic Map Engine erstellt, deren Funktionalität und Aufbau hier nur kurz umrissen werden soll. Die detaillierte Beschreibung der Implementierung und die allgemeine Verwendung der Engine sind in (Oppl, 2007) beschrieben.

Kernkomponenten

Die Topic Map Engine bildet die Komponenten einer Topic Map direkt auf Java Klassen ab.

⁵<http://www.ontopia.com>

⁶<http://??>

⁷Application Interface

Einführung von Domänenmodellen

Schnittstelle zur Persistierung

Die Topic Map Engine bietet zur Persistierung ein einfaches Interface an, über welches Topic Maps auf der Engine exportiert werden können bzw. in die Engine geladen werden. Das Interface abstrahiert dabei von der konkreten Persistierungs-Technologie und erlaubt die Einbindung unterschiedlicher Ansätze zur Speicherung von Topic Maps.

Konkret wurden drei Implementierungen des Persistenz-Interfaces erstellt. Die erste Implementierung liest und schreibt Topic Maps von bzw. in im XTM⁸-Format REF abgelegten XML-Dateien. So wird ein standardkonformer Datenaustausch zwischen Topic Map Engines ermöglicht. Die zweite Implementierung bindet die Topic Map Engine via Hibernate REF an eine relationale Datenbank an. Im Gegensatz zur Speicherung in XML-Files ermöglicht die Ablage der Daten in einem RDBMS einen effizienteren, selektiven Zugriff, sodass nicht unter allen Umständen die gesamte Datenbasis einer Topic Map im Arbeitsspeicher gehalten werden muss.

Die dritte Implementierung des Persistenz-Interfaces ermöglicht lediglich den Export einer Topic Map in ein von GraphViz REF interpretierbares Format, das eine graphische Darstellung der Topic Map mit automatische Anordnung der Topics ermöglicht. Da das GraphViz-Format jedoch nicht so ausdrucksstark ist wie der Topic Map Ansatz, geht beim Export Information verloren. Dadurch ist es nicht möglich, eine Topic Map aus einem GraphViz-File zu rekonstruieren, der Import in die Engine ist also nicht möglich.

Zusätzlich zur Ausgabe der gesamten Topic Map ist das GraphViz-Export-Modul auch in der Lage eine mittels HTML ImageMaps navigierbare Version der Topic Map zu exportieren, in der jeweils immer nur ein Topic mit dessen Kontext (also allen Topics, die mit dem zentralen Topic verbunden sind) dargestellt wird (siehe Abbildung XY). Durch die ImageMap werden die Kontext-Topics mit jenen Ansichten verknüpft, wo jeweils diese im Fokus der Betrachtung stehen. Damit ist eine schrittweise Navigation durch die Topic Map möglich.

⁸XML Topic Map



Abbildung 6.10.: Ausschnitt einer mittels GraphViz visualisierten Topic Map

6.4.2. Dynamische Metamodelle

6.4.3. Persistierung

6.5. Export graphischer Repräsentationen

Neben der Persistierung der Modelle in Form einer Topic Map ist es auch sinnvoll, die Modelle in deren graphischer Form als Referenz abzulegen. Das hier entwickelte Werkzeug bedient sich der graphischen Ausgabefunktionalitäten, die der Java Klassenbibliothek mit der Version 1.4 hinzugefügt wurden, um das aktuelle Modell in unterschiedlichen Formen als Grafik auszugeben und zur späteren Referenz zu speichern.

6.5.1. Ausgabeformen

Zur Speicherung der graphischen Repräsentation eines Modells wird grundsätzlich die Visualisierung verwendet, die auf dem sekundären Ausgabekanal (also dem Bildschirm) zur Anwendung kommt. Beim Export sind nun unterschiedliche Modellaspekte zu berücksichtigen, die je nach intendiertem Verwendungszweck einzeln oder in Kombination in die Ausgabe eingehen können. Diese Aspekte sind im Einzelnen

- der aktuell auf der Oberfläche befindliche Modellzustand
- die hierarchisch in diesen eingebetteten Submodelle
- die Modellierungshistorie, also die Entwicklung des Modells über die Zeit

Die Darstellung dieser Aspekte in einer graphischen Repräsentation ist (außer im erstgenannten Fall) insofern komplex, als dass eine beliebig lange zeitliche Abfolge bzw. eine beliebig tief verschachtelte Hierarchie in den zweidimensionalen Raum abgebildet werden muss. Im Falle einer Kombination des zweit- und drittgenannten Aspektes müssen zwei Dimensionen zugleich abgebildet werden, was die Darstellung zusätzlich erschwert.

Der aktuell auf der Oberfläche befindliche Modellzustand wird exakt wie dargestellt in eine Grafik transformiert und als Bild abgespeichert. Zur Abbildung der Modellierungshistorie bietet sich an, die einzelnen gespeicherten Modellzustände chronologisch anzutragen. Der sich so ergebende Zeitstrahl beginnt links oben und setzt sich von links nach rechts und oben nach unten bis in die rechte untere Ecke fort, wo wiederum der aktuelle Modellzustand dargestellt wird. Die zweidimensionale Abbildung des Zeitstrahls erfolgt dabei derart, dass sowohl die horizontale als auch die vertikale Ausdehnung des resultierenden Bildes minimal sind (siehe Abbildung 6.11).

6.5. Export graphischer Repräsentationen

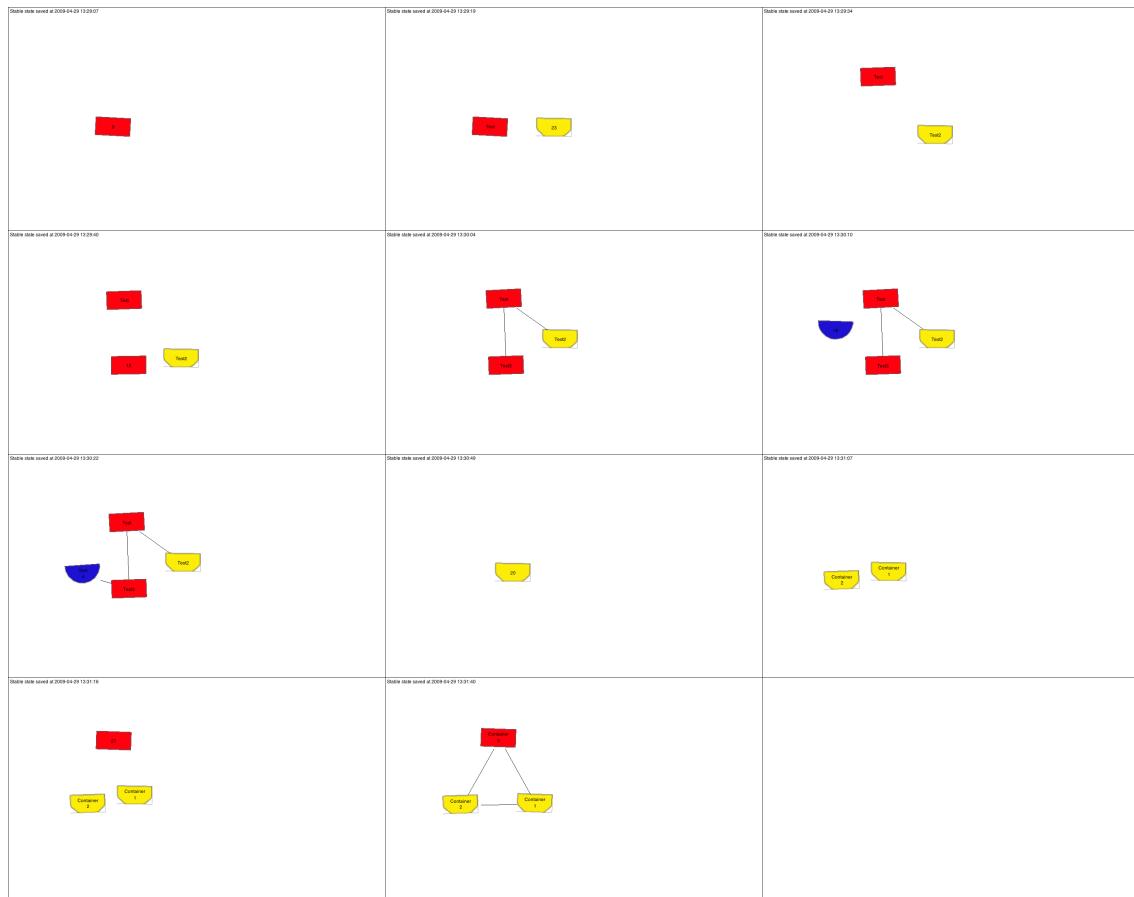


Abbildung 6.11.: Modellierungshistorie als exportierte Grafik

6. Persistierung

Bei der Darstellung eines Modells mit hierarchisch verschachtelten Teilmodellen bietet sich eine baumartige Darstellung mit dem aktuellen Modellzustand als Wurzelknoten an. Diese ist aufgrund der notwendigen Detaildarstellung der einzelnen Modelle jedoch platzintensiv und kann nur schwer als physisches Dokument abgelegt werden. Deshalb wurde alternativ die hierarchische Struktur auf eine der Darstellung der zeitlichen Modellentwicklung ähnliche Darstellungsform abgebildet. Dabei wird die Hierarchie flach ausgerollt, die Einbettungen zeigen sich durch einen graduell dunkler werdenden Modellhintergrund für tiefere verschachtelte Ebenen. Zusätzlich wird in jedes Submodell farblich abgesetzt auch das jeweilige Container-element eingebettet. Die Abfolge der einzelnen Modelle startet mit dem aktuellen Modellzustand als erstem Knoten. Dahinter wird das erste im aktuellen Modell eingebettete Teilmodell angezeigt. Besitzt dieses Teilmodell wiederum eingebettete Teilmodelle, so werden diese in der Folge mit erneut abgedunkeltem Hintergrund dargestellt. Diese Form der Darstellung wird fortgesetzt bis keine weiteren eingebetteten Modelle mehr vorhanden sind. Es folgt (sofern vorhanden) das zweite Submodelle des aktuellen Modellzustandes (mit dem abgedunkelten Hintergrund der ersten Einbettungsebene). Diese Hierarchie wird wiederum bis zu den Endpunkten nach unten verfolgt, es folgt ggf. das dritte Submodell auf der ersten Einbettungsebene. Die sich so ergebende Linie an Modellzuständen wird wie der chronologischen Darstellung der Modellierungshistorie so umgebrochen dass sich sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung eine minimale Ausdehung ergibt (siehe Abbildung 6.12).

In der komplexesten Ausprägung der Darstellung eines Modells als graphische Repräsentation werden sowohl die Historie der Modellentstehung als auch die Hierarchie der eingebetteten Submodelle zugleich dargestellt. Dies erfolgt hier durch die Kombination der beiden eben beschriebenen Ansätze. Die Darstellung der Modellierungshistorie bildet die oberste Ebene der Modelldarstellung. Beginnend mit dem ältesten gespeicherten Modellzustand werden die einzelnen Modelle in der Reihenfolge ihrer Entstehung abgebildet, wobei zu jedem Modellzustand unmittelbar folgend dessen eingebetteten Submodelle ausgegeben werden (deren Entstehung nicht mehr separat dargestellt wird). So ergibt sich eine kombinierte Linie aus chronologischer Modellentwicklung und eingebetteten Teilmodellen. Diese wird wie schon oben mit minimaler Ausdehnung in horizontaler wie vertikaler Richtung auf eine Grafik abgebildet. Die Entwicklung des Modells ist dabei wie gehabt von links oben nach rechts unten zu verfolgen, wobei nur jene Modellzustände mit weißem Hintergrund auf oberster Ebene der Zeitlinie angehören. Alle dunkler hinterlegten Modelle sind Teilmodelle und sind dem nach vorne nächstgelegenen weiß hinterlegten Modell zuzuordnen.

6.5. Export graphischer Repräsentationen

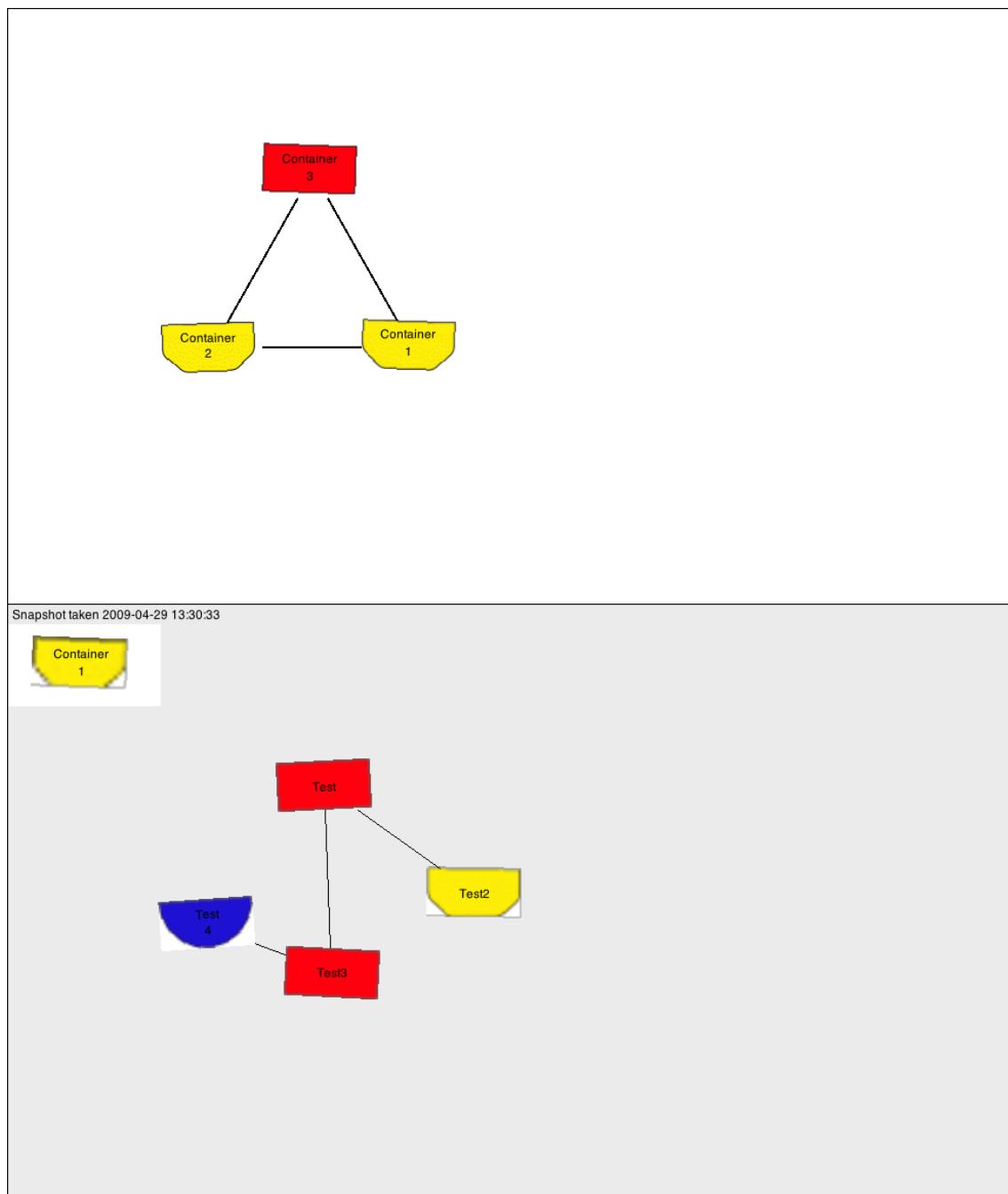


Abbildung 6.12.: Modell-Hierarchie als exportierte Grafik

6.5.2. Technische Umsetzung des graphischen Exports

Zur Umsetzung des graphischen Exports wird auf die mit der Java Plattform in der Version 1.4 eingeführten Klassen zu Verarbeitung von Grafikformen zurückgegriffen. Diese unterstützen standardmäßig gängige Grafikformate wie JPEG⁹, GIF¹⁰ oder PNG¹¹. Im konkreten Fall wurde ein verlustfrei komprimierendes Format gewählt, verlustbehaftete Verfahren wie JPEG sind für die hier abzubildenden feinen Strukturen nicht geeignet, da es durch Kompressionsartefakte zu Qualitätsminderungen in der Darstellung von Details kommt.

Die Ausgabe einer Datei im gewählten Grafikformat wird vollständig von der Klasse `ImageIO` übernommen. Der Schnittstellen-Methode `write` sind als Parameter der Dateiname, das Grafikformat sowie ein Objekt der Klasse `BufferedImage` (allgemeiner: einer Klasse, die das Interface `RenderedImage` implementiert) zu übergeben, dass die eigentlichen Bilddaten enthält.

Das `BufferedImage`-Objekt kann durch einen Methoden-Aufruf mit der graphischen Repräsentation einer Klasse, die von der Java AWT¹²-Klasse `Component` abgeleitet ist, befüllt werden. Da alle graphischen Komponenten des JHotDraw-Frameworks Subklassen eben dieser Klasse sind (inklusive der Zeichenoberfläche selbst), können diese durch einen Aufruf ihrer `paint`-Methode in ein ausreichend großes `BufferedImage` (bzw. dessen `Graphics`-Objekt) geschrieben werden.

In den aus mehr als einem Teilmodell bestehenden Ausgaben (also der Historie, der hierarchischen Darstellung der Teilmodelle oder der Kombination dieser beiden Fälle) muss das Bild aus den graphischen Repräsentationen der einzelnen Teilmodelle zusammengesetzt werden. Dazu werden (im Falle der hierarchischen Teilmodelle rekursiv) die logischen Modelle erzeugt und bereits in der korrekten linearisierten Darstellungsform in einem Vektor gespeichert. Die einzelnen logischen Modelle werden dann in graphische Repräsentationen umgewandelt und in je einem `BufferedImage` gespeichert. Diese werden in der Folge so zusammengesetzt, dass die horizontale und vertikale Ausdehung der Gesamtfläche minimal ist.

6.6. Zusammenfassung

⁹Joint Photographic Experts Group (File Interchange Format)

¹⁰Graphics Interchange Format

¹¹Portable Network Graphics

¹²Abstract Window Toolkit

Teil III.

Evaluierung

7. Konzeptuelle Evaluierung

7.1. Einordung in das Ordnungssystem von Holmquist et al.

Grundlage der Einordung in diesem Abschnitt ist der Ansatz von (Holmquist et al., 1999), der in Abschnitt 3.2.3 beschrieben wurde.

7.1.1. Abbildung

Die von Holmquist et al. verwendete Terminologie ist im Wesentlichen direkt auf jene abbildbar, die in dieser Arbeit verwendet wurde. Die Modellierungstokens und einbettbaren Tokens entsprechen im Wesentlichen *Tokens*. Dies ist dadurch begründbar, dass die Art eines Modellierungstokens in einem Modell immer im gleichen Zusammenhang mit der Art der Information steht, die durch dieses repräsentiert wird. Eine Eigenschaft, die eher *Containern* zuzuordnen ist, ist jedoch die dynamische Festlegbarkeit der Bedeutung einer Art von Modellierungstokens - die physischen Elemente ansich sind vor Beginn der Modellbildung generisch (also *Container*), werden aber im Zuge der Modellierung mit Bedeutung belegt (die dann für alle Instanzen dieser Art von Modellierungstokens gilt) und sind dann eher als *Tokens* zu klassifizieren.

Die Werkzeugtokens des hier vorgestellten Systems entsprechen in ihrer Konzeption den *Tools*. Sie manipulieren digitale Information, lösen Aktionen aus oder versetzen das System in einen anderen Zustand und entsprechen damit exakt der Definition von *Tools*, die von den Autoren gegeben wird.

Information Faucets sind im Kontext des hier vorgestellten Systems einerseits die Tischoberfläche, über die Information zu Modellierungstokens abgerufen werden kann, andererseits ist die Registrierungskamera ein klassisches Faucet im Sinne der Definition, da sie dem Abruf oder der Assoziation von Information an ein Token dient, sobald dieses in den Erfassungsbereich der Kamera gerät.

7.1.2. Bewertung

Die konzeptuellen Elemente des hier vorgestellten Systems sind also auf das Ordnungsstern von Holmquist et al. (1999) abbildbar. Die Problematik der nicht eindeutigen Zuordnung von Modellierungstokens zur Kategorie *Tokens* oder *Constraints* ist einerseits auf eine der grundlegenden Design-Paradigmen des hier entwickelten Werkzeugs – der Flexibilität der Abbildung – zurückzuführen, weist aber andererseits auch auf mögliches Verbesserungspotential hin.

Durch die Flexibilisierung nicht nur der Bindung zwischen physischen Elementen und digitaler Repräsentation sondern auch der Verwendung von unterschiedlichen physischen Elementen selbst könnten Modellierungstokens eher *Token*-artiger werden. Indem Modellierende eigenen physische Elemente (auf ihrem Arbeitskontext) einbringen können, könnte die Erfassbarkeit der Bedeutung der physischen Repräsentation unter Umständen verbessert werden können.

7.2. Einordnung in die Taxonomie von Fishkin

Grundlage der Einordnung in diesem Abschnitt ist der Ansatz von (Fishkin, 2004), der in Abschnitt 3.2.9 beschrieben wurde.

7.2.1. Abbildung

Das in dieser Arbeit entwickelte Werkzeug überspannt aufgrund seiner komplexen Struktur in beiden von Fishkin vorgeschlagenen Dimensionen zur Klassifikation von Tangible Interfaces mehrere Ausprägungen. Um eine umfassende und ins Detail gehende Einordnung vornehmen zu können, werden im Folgenden Einzelaspekte des Systems betrachtet und eingeordnet. Während die Dimension "Embodiment" bereits in Kapitel 5 betrachtet wurde, um eine strukturierte Zuordnung der Ausgabekanäle vornehmen zu können, werden hier die einzelnen Funktionalitäten des Systems (siehe Abschnitt 4.3) jeweils beiden Dimensionen zugeordnet (siehe Tabelle 7.1)

Beim *Platzieren und Benennen von Modellelementen*, ist die Benennung auf zwei Arten möglich, die unterschiedlich in die Taxonomie einzuordnen sind. Bei Benennung mittels Auswahl und Tastatur ist durch die Projektion der Benennung die Embodiment-Ausprägung "nearby" zu wählen. Der Vorgang der Auswahl und Benennung kann als analog zur realen Welt gesehen werden, die eingesetzten Werkzeuge sind aber generischer Natur – Metaphor ist also als "verb" zu klassifizieren. Bei der Benennung mittels Haftnotitz ist durch die unmittelbar auf den Tokens angebrachten Benennungen Embodiment "full", Der Vorgang des Beschriftens wird analog

	Embodiment	Metaphor
Platzieren und Benennen von Modellelementen	distant, nearby (Tastatur), full (Haftnotiz)	verb (Tastatur), verb + noun (Haftnotiz)
Erstellen von Verbindern	nearby	verb bis noun+verb (Werkzeug- tokens), verb (räumliche Nähe)
Löschen von Verbindern	environmental bis nearby	noun
Einbetten von Information	full	noun + verb
Abrufen von Information	distant	verb
Erstellen von Snapshots	environmental bis nearby	none
Navigation in der Modell-Historie	distant	verb
Wiederherstellen eines Modell-Zustandes	nearby	noun + verb

Tabelle 7.1.: Einordnung des Systems in die Taxonomie nach Fishkin

zur realen Welt durchgeführt, auch die Informationsträger (Haftnotizen) entsprechen jenen der realen Welt, Metaphor ist also "verb + noun", wobei der notwendige Vorgang der expliziten Erfassung einer Beschriftung durch das System eine Klassifikation "full" verhindert und sogar die Einstufung "noun + verb" etwas abschwächt (keine Analogie des Vorgangs zur realen Welt).

Zur *Herstellung von Verbindern* existieren ebenfalls zwei Möglichkeiten. In beiden Fällen ist durch die Projektion der Verbindung die Ausprägung in Embodiment "nearby", sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich "Metaphor". Bei der Verwendung von Werkzeugtokens ist der Vorgang der Auswahl der Endpunkte analog zur realen Welt zu sehen und somit als "verb" einzustufen. Die Verwendung von spezifischen Werkzeugtokens zur Herstellung gerichteter Verbinder zeigt sogar Züge von "noun + verb", da die durch das Token dargestellte Pfeilspitze eine Analogie zur realen Welt bildet.

Das *Löschen von Verbindern* wird durch das Lösch-Token vorgenommen. Dieses ist durch einen Radiergummi symbolisiert, der jedoch nicht als solche eingesetzt wird sondern das System nur in einen Löschmodus versetzt. Die Klassifikation in Metaphor ist demnach "noun". Die Visualisierung des Löschezustandes erfolgt unspezifisch durch die Umfärbung der gesamten Tischoberfläche, womit ein Embodiment von "nearby" oder "environmental" (aufgrund der Unspezifität) gerechtfertigt wäre.

Einbetten von *Information* erfolgt durch die Verwendung der Modellierungstokens als Container und Hineinlegen von kleineren Tokens. Embodiment ist in diesem Fall "full", die die Einbettung physisch nachvollzogen wird. Metaphor ist durch die Analogie des "Hineinlegens" von Information in "Container" in die Ausprägung "noun + verb" einzuordnen.

Das *Abrufen von Information* wird über den sekundären Ausgabekanal abgewickelt und ist daher in Embodiment als "distant" einzuordnen. Der Vorgang des Herausnehmens von Information aus einem Container existiert analog zur realen Welt, das bei diesem Vorgang im Zentrum stehende Objekt, das einbettbare Token, ist jedoch generisch und weist nicht auf die Art der eingebetteten Information hin. Eine Klassifikation von "verb" in Metaphor erscheint daher gerechtfertigt.

Beim *Erstellen von Snapshots* wird die gesamte Tischoberfläche als Feedbackkanal genutzt. Insofern ist Embodiment wie im Falle des Löschens von Verbindern im Bereich "environmental" bis "nearby" anzusiedeln. Das Snapshot-Token selbst ist ein generisches Objekt, das keine Analogie zur realen Welt aufweist. Metaphor ist daher "none".

Die *Navigation in der Modell-Hierarchie* erfolgt mit dem runden Navigations-Token. Zur Ausgabe der gespeicherten Modell-Zustände wird der sekundäre Ausgabekanal verwendet. Embodiment ist deshalb "distant". Metaphor beschränkt sich

auf "verb", da der Drehvorgang zur Navigation analog zum Einstellen einer Uhr erfolgt, das Token selbst aber bis auf seine runde Form generisch ist.

Das *Wiederherstellen eines Modellzustandes* erfolgt durch spezifische Anweisungen auf der Modellierungsoberfläche. Embodiment ist also als "nearby" einzustufen. Der Vorgang der Wiederherstellung erfolgt durch Verschieben der Modellierungstokens, was im Wesentlichen analog zur realen Welt abläuft. Da unmittelbar die Objekte manipuliert werden, kann Metaphor als "noun + verb" eingestuft werden.

7.2.2. Bewertung

Die Taxonomie nach Fishkin ermöglicht eine strukturierte Erfassung einzelner Aspekte eines Tangible User Interfaces. Eine aussagekräftige Gesamteinordnung ist nur bei einfachen TUIs möglich, komplexe, mit vielen Interaktionsmöglichkeiten ausgestattete Systeme tendieren dazu, ein sehr breites Spektrum der Taxonomie abzudecken. Für die detaillierte Betrachtung eines komplexen Gesamtsystems erscheint die Taxonomie dennoch geeignet, da einerseits aus den einzelnen Teileinordnungen für den jeweiligen Anwendungsfall ggf. Verbesserungspotentiale abgeleitet werden können und andererseits (nach der Betrachtung des hier entwickelten Systems) scheint, als ob ein die Taxonomie breit abdeckendes Gesamtsystem potentiell Inkonsistenzen im Interaktionsdesign aufweist bzw. unterschiedliche Interaktionsparadigmen vermischt wurden. Vor allem "Ausreißer" aus einem vorwiegend einheitlichen Gesamtbild scheinen einer näheren Betrachtung hinsichtlich eines möglichen Redesigns wert.

Konkret können diese Vermutungen im vorliegenden System vor allem an der Konzeption des Lösch-Tokens und des Snapshot-Tokens festgemacht werden. Der Großteil der Interaktionen mit dem System beinhaltet in der Dimension Metaphor den "verb"-Aspekt (zu etwa gleichen Teilen ausschließlich und in der Kombination mit "noun"). Die Funktionalitäten, die die beiden erwähnten Tokens einbeziehen, laufen diesem Trend entgegen und zeigen in Metaphor die Ausprägung "noun" bzw. "none". Tatsächlich zeigt sich in der Praxis, dass die Anwendbarkeit dieser Tokens von Benutzern missverstanden bzw. nicht verstanden wird. Ein Redesign dieser Tokens mit expliziterer bzw. eher aktivitätsorientierter Metaphor erscheint deshalb untersuchenswert.

Zusammenfassend scheint die Taxonomie vor allem im Zusammenhang mit der Sicherung von konsistenter Interaktion an der Benutzungsschnittstelle sinnvoll anwendbar zu sein. Der Mehrwert des Ansatzes zeigt sich hier nicht so sehr in den absoluten Ausprägungen auf den beiden Dimensionen sondern vielmehr in den relativen Unterschieden, die zwischen den einzelnen Teilen des Tangible User Interfaces auftreten.

7.3. Zusammenfassung

8. Untersuchungsdesign

Die Evaluierung des in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Werkzeuges wurde entsprechend der in Kapitel XY vorgestellten konzeptuellen Zusammenhänge mit Fokus auf unterschiedliche Gesichtspunkte durchgeführt. Die beiden grundlegenden Untersuchungsfragen sind

- Unterstützen Werkzeug und Methode Articulation Work?
- Ermöglichen und unterstützen die Teilwerkzeuge des Modellierungstisches Articulation Work?

Die erste Frage setzt im oberen Bereich der Argumentationskette an (**Bild einfügen**) und untersucht, ob Articulation Work bei Einsatz des Werkzeugs tatsächlich auftritt bzw. ob diese unterstützt wird. Die zweite Frage geht wiederum von der Unterstützung von Articulation Work aus, betrachtet hierbei jedoch den Beitrag der vorhandenen Teilwerkzeuge und zielt auf die Untersuchung der Übereinstimmung zwischen intendierter (bzw. aus den Anforderungen ableitbaren) und tatsächlicher Einsatzgebiete ab. Die diesen Fragen zugrunde liegenden Annahmen und die jeweiligen Ansätze zur Messung werden in den nächsten beiden Abschnitten behandelt. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels beschreibt dann die konkrete Planung der Untersuchung und die im Einzelnen durchgeführten Untersuchungs-Phasen.

8.1. Frage I – Unterstützung von Articulation Work

Axiom 1: Erfolgreiche Articulation Work zeigt sich an der Production Work (-> Ref. Strauss)

Axiom 1,5: Erfolgreiche Production Work zeigt sich an der Zielerreichung (-> Erfolg) (-> Ref. Fujimura)

Axiom 2: (Geschäfts-)Erfolg steht in direktem Zusammenhang mit funktionierender Interaktion (-> Ref.

Messung: Die Unterstützung der Articulation Work kann an Ihren Auswirkungen auf die Production Work gemessen werden, dort im speziellen an der Qualität der

8. Untersuchungsdesign

Interaktion ("Work rests ultimately on Interaction"). Messpunkte können dabei die Akteure oder die Ergebnisse der kollaborativen Arbeit sein.

Misst man an den Akteuren, so kann die subjektive Zufriedenheit mit dem Arbeitsprozess (Verlauf der Interaktion) und/oder das beobachtbare Verhalten der Akteure als Merkmal herangezogen werden. Ersteres kann methodisch durch qualitative Interviews (ggf. unterstützt durch Modelle -> Herrmann, Jahnke 2008) beurteilt werden. Zweiteres kann durch Techniken der Interaktionsanalyse bewertet werden, wobei insbesondere die Gegenüberstellung der tatsächlichen zu den vereinbarten Interaktionsmodalitäten und die Veränderung dieser Vereinbarung über die Zeit von Interesse ist. Dazu ist eine Externalisierung der Vereinbarungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten notwendig.

Misst man an den Ergebnissen der kollaborativen Arbeit, so kann die subjektive Zufriedenheit mit dem Ergebnis und die "verobjektivierte" (Experten)-Beurteilung der Qualität des Ergebnisses als Merkmal verwendet werden. Ersters wird wiederum qualitativ in Befragungen zu erheben sein. Die Qualität des Ergebnisses wird von Experten an noch zu definierenden Merkmalen gemessen werden, an denen sich die Interaktion bei der Erstellung zeigt (etwa: Stilbrüche, etc.). Bei der Beurteilung der Qualität der Ergebnisse ist vor allem die Gegenüberstellung zu Ergebnissen von Interesse, die ohne Unterstützung der Articulation Work entstanden sind. Dementsprechend kann der Einsatz einer Kontrollgruppe sinnvoll sein.

8.2. Frage 2 – Beitrag und Verwendung der Teilwerkzeuge

Axiom: Articulation Work kann durch Strukturlegetechniken unterstützt werden

Messung: Die Verwendung der einzelnen Werkzeuge kann durch Beobachtung und Befragung modellierender Personen sowie der Untersuchung der Modellierungsresultate beurteilt werden. Messpunkte sind damit wiederum die Aktion und die Ergebnisse der Artikulation. Bei der Messung ist in diesem Zusammenhang kein kollaboratives Setting notwendig, da nicht die Auswirkungen des Werkzeugs auf Interaktion sondern die Verwendung des Werkzeugs selbst untersucht werden soll. Die Modellierung wird also von einzelnen Personen durchgeführt (Selbst-Artikulation, Externalisierung eigneter mentaler Modelle). Durch Auswertung der Modellierungen aus Evaluierung I lässt sich ein etwaiger Unterschied in der Verwendung der Werkzeuge bei kollaborativen Settings belegen.

8.3. Untersuchungsablauf

Die Evaluierung selbst wurde in drei Phasen gegliedert, deren Untersuchungsfokus auf

- der Verwendbarkeit des Werkzeugs an sich,
- dessen Eignung zur Unterstützung von "Articulation Work" in Lehr- und Lern-Szenarien und
- dessen Eignung zur Unterstützung von "Articulation Work" beim Einsatz in Unternehmen

lag. Die erste Phase ist als Vorlauf zu sehen, der nicht unmittelbar der Beantwortung der Untersuchungsfragen diente, sondern auf die rein explorative Untersuchung der tatsächlichen Verwendbarkeit des Werkzeuges (im Sinne der Verständlichkeit und Robustheit) abzielte. Die beiden folgenden Phasen decken die Bearbeitung der eigentlichen Untersuchungsfragen ab, wobei durch den unterschiedlichen Einsatzkontext versucht wurde die verschiedenen Anwendungsbereiche des Werkzeugs in die Untersuchung einfließen zu lassen.

Im Zuge der Evaluierungen wurde das Werkzeug unter realen Einsatzbedingungen getestet. Unter "real" ist hier zu verstehen, dass die testenden Benutzer mit der Bedienung des Werkzeugs vorab nicht vertraut waren und dass die Aufgabenstellung stets einen konkreten Bezug zu einem für die jeweiligen Personen relevanten Arbeitsszenario aufwies. In den folgenden Abschnitten wird im Detail auf die Konzeption der einzelnen Phasen und den jeweiligen Beitrag zur Beantwortung der Untersuchungsfragen eingegangen.

8.3.1. Phase I – Verwendbarkeit

8.3.2. Phase 2 – Lehr- und Lern-Szenarien

8.3.3. Phase 3 – Unternehmenseinsatz

9. Untersuchungsergebnisse

9.1. Erhobene Daten

9.1.1. Phase 1

In Phase 1 wurden 9 Modellierungsdurchgänge mit insgesamt 18 Personen durchgeführt. An dem vorangegangenen Pretest nahmen 12 Personen teil.

9.1.2. Phase 2

In Phase 2 wurden Untersuchungen im Rahmen zweier Lehrveranstaltungen durchgeführt. An der ersten Untersuchung nahmen 18 Studierende der Wirtschaftsinformatik teil, die in Gruppen zu 2 Personen insgesamt 17 Modellierungsdurchgänge durchführten. An der zweiten Untersuchung nahmen 54 Studierende in Gruppen zu 3 Personen an insgesamt 18 Modellierungsdurchgängen teil.

9.1.3. Phase 3

9.2. Auswertung & Interpretation

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Struktur von Arbeitsabläufen	4
1.2.	Konzeptualisierung von „Arbeit“ nach (Strauss, 1985) und (Fujimura, 1987)	5
4.1.	Architektur des TUIpist-Framework	39
4.2.	Zusammenspiel der Komponenten in TUIpist	40
4.3.	AR Toolkit Marker	41
4.4.	Visual Codes – Aufbau und Features	42
4.5.	ReacTIVision Code	43
4.6.	Überblick über den Aufbau des Werkzeugs – Eingabekomponenten .	51
4.7.	An Tokens angebrachte ReacTIVision-Codes zur Identifikation . .	53
4.8.	Arten von Modellierungstokens	53
4.9.	Rückwand von Container Tokens	54
4.10.	Geöffnetes Container Token	55
4.11.	Modellelemente – Taxonomie	56
4.12.	Einbettbare Tokens	57
4.13.	Markierung-Token	58
4.14.	Lösch-Token	59
4.15.	Registrierungstoken	60
4.16.	Snapshot-Token	61
4.17.	History-Token	61
4.18.	Softwarearchitektur zur Erkennung von Benutzerinteraktion . . .	74
5.1.	Überblick über den Aufbau des Werkzeugs – Ausgabekomponenten .	102
5.2.	Softwarearchitektur zur Verwaltung der Ausgabekanäle	109
5.3.	Darstellung von Modellelementen	110
5.4.	Darstellung von Verbindern	111
5.5.	Darstellung gerichteter Verbinder	111
5.6.	Darstellung von Containern und eingebetteten Elementen	112
5.7.	Markierung von Modellelementen	114
5.8.	Darstellung der Modellierungshistorie	116
5.9.	Unterstützung der Wiederherstellung von Modellzuständen . . .	117
5.10.	Zusammenhänge der Klassen zur Ausgabebehandlung	119

Abbildungsverzeichnis

6.1.	Grundlegende Elemente einer Topic Map	128
6.2.	Umfassende Darstellung der Elemente einer Topic Map	130
6.3.	Abgrenzung zwischen Subject und Occurrence in Topic Maps	131
6.4.	Benennung von Topics	132
6.5.	Beziehungen in der Metamodellbildung in Topic Maps	135
6.6.	Abbildung von Gültigkeitsbereichen durch Scopes	138
6.7.	Abbildung von Modellinformation in Topic Maps	140
6.8.	Definition des Meta-Models (ohne Kardinalitäten)	143
6.9.	Einbindung des Meta-Meta-Modells	145
6.10.	Ausschnitt einer mittels GraphViz visualisierten Topic Map	149
6.11.	Modellierungshistorie als exportierte Grafik	151
6.12.	Modell-Hierarchie als exportierte Grafik	153

Tabellenverzeichnis

4.1.	Gegenüberstellung der Frameworks für video-basierten Input	47
4.2.	Gegenüberstellung der generischen Frameworks	49
7.1.	Einordnung des Systems in die Taxonomie nach Fishkin	159

Index

AR Toolkit, 31

Barcode, 18

Bluetooth, 24

Context Toolkit, 26

Positionsbestimmung, 18

akustisch, 21

elektromagnetisch, 20

kapazitiv, 19

optisch, 18

ReacTIVision, 32

RFID, 20

SmartIT, 23

Token

aktive, 23

passive, 22

Ultraschall, 21

Visual Codes, 31

ZigBee, 24

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Interface
AWT	Abstract Window Toolkit
CSCW	Computer Supported Cooperative Work
EMF	Eclipse Modeling Framework
GEF	Graphical Editing Framework (Eclipse-Komponente)
GIF	Graphics Interchange Format
GMF	Graphical Modeling Framework (Eclipse-Komponente)
GPS	Global Positioning System
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IP	Internet Protocol
JPEG	Joint Photographic Experts Group (File Interchange Format)
JRE	Java Runtime Environment
LCD	Liquid Crystal Display (Flüssigkristallanzeige)
LED	Light Emitting Diode (Leuchtdiode)
MVC	Model-View-Controller
OLED	Organic Light Emitting Diode
PNG	Portable Network Graphics
RFID	Radio Frequency Identification
TCP	Transport Control Protocol

Acronyms

TUI Tangible User Interface

UML Unified Modelling Language

XML Extensible Markup Language
XTM XML Topic Map

Abbildungquellen

Dieser Anhang enthält Quellenangaben für alle in dieser Arbeit verwendeten Abbildungen, sofern sie nicht vom Autor erstellt wurden. Sofern nicht anders angegeben sind alle Abbildungen und Fotos Werke des Autors und dürfen nicht ohne ausdrückliche Zustimmung verwendet werden.

Abbildung 4.3 Bild des AR Toolkit Markers entnommen von www.hitl.washington.edu/artoolkit/ (Website der Entwickler)

Abbildung 4.4 Bild des Visual Code Markers entnommen aus Rohs und Gfeller (2004)

Abbildung 6.3 Foto der Tasse lizenfrei unter <http://www.oldskoolman.de/bilder/freigestellte-bilder/essen-trinken/kaffee-tasse-freigestellt/>, übrige Abbildung eigene Darstellung

Grafiken aus ImplementierungInput fehlen noch

Literaturverzeichnis

- Allied Vision Technologies GmbH (2008). AVT Guppy. Technical Manual V6.2.0, Allied Vision Technologies GmbH, Stadtroda, Germany. S. 62
- Arnold, K., Scheifler, R., Waldo, J., O'Sullivan, B., und Wollrath, A. (1999). *Jini Specification*. Addison-Wesley Longman Publishing, Boston, MA, USA. S. 40, 48
- Beer, W., Christian, V., Ferscha, A., und Mehrmann, L. (2003). Modeling Context-aware Behavior by Interpreted ECA Rules. In *Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Computing (EUROPAR '03)*, volume 2790 of LNCS, Seiten 1064–1073. Springer. S. 37
- Bloks, R. H. J. (1996). The IEEE-1394 high speed serial bus. *Philips Journal of Research*, 50(1-2):209–216. S. 62
- Bluetooth SIG (2007). Bluetooth Specification Version 2.1 + EDR. Specification, Bluetooth SIG. S. 34
- Carriero, N. und Gelernter, D. (1989). Linda in context. *Communications of the ACM*, 32(4):444–458. S. 38
- Curbera, F., Duftler, M., Khalaf, R., Nagy, W., Mukhi, N., und Weerawarana, S. (2002). Unraveling the Web services web: an introduction to SOAP, WSDL, and UDDI. *IEEE Internet Computing*, 6(2):86–93. S. 48
- Dey, A. K., Salber, D., und Abowd, G. D. (2001). A conceptual framework and a toolkit for supporting the rapid prototyping of context-aware applications. *Human-Computer Interaction (HCI) Journal*, 16(2-4):97–166. S. 36, 38
- Downing, T. (1998). *Java RMI: remote method invocation*. IDG Books Worldwide, Inc., Foster City, CA, USA. S. 48
- Feiner, T. (2008). Modelleditor auf Basis dynamischer Metamodelle zur Unterstützung partizipativer Modellerfassung und -reflexion. Master's thesis, University of Linz. S. 104, 125

- Ferscha, A., Vogl, S., Emsenhuber, B., und Wally, B. (2008). Physical shortcuts for media remote controls. In *Proceedings of the 2nd international conference on INtelligent TEchnologies for interactive enterTAINment table of contents*. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering) ICST, Brussels, Belgium, Belgium. S. 34
- Fishkin, K. P. (2004). A taxonomy for and analysis of tangible interfaces. *Personal and Ubiquitous Computing*, 8(5):347–358. S. 22, 23, 24, 93, 94, 95, 98, 101, 124, 158, 161
- Fitzmaurice, G. (1996). *Graspable User Interfaces*. Phd-thesis, University of Toronto. S. 18, 19
- Fitzmaurice, G., Ishii, H., und Buxton, W. (1995). Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human-factors in computing systems (CHI)*, Seiten 442–449. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. New York, NY, USA. S. 18
- Fjeld, M. (2001). *Designing for tangible interaction*. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology. S. 25
- Fjuk, A., Nurminen, M., und Smørdal, O. (1997). Taking Articulation Work Seriously: An Activity Theoretical Approach. Technical Report TUCS TR 120, Turku Centre for Computer Science. S. 6, 7
- Fujimura, J. (1987). Constructing 'Do-Able' Problems in Cancer Research: Articulating Alignment. *Social Studies of Science*, 17(2):257–293. S. 3, 5, III
- Furtmüller, F. (2007). Implementierung eines Frameworks für berührbare Benutzungsschnittstellen. Master's thesis, University of Linz. S. 38
- Furtmüller, F. und Oppl, S. (2007). A Tuple-Space based Middleware for Collaborative Tangible User Interfaces. In *Proceedings of WETICE '07*. IEEE Press. S. 38, 39, 40, 92
- Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., und Vlissides, J. (1995). *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. Addison-wesley Reading, MA. S. 75, 87, 91
- Gellersen, H., Kortuem, G., Schmidt, A., und Beigl, M. (2004). Physical prototyping with smart-its. *IEEE Pervasive Computing*, 3(3):74–82. S. 33
- Gerson, E. und Star, S. (1986). Analyzing due process in the workplace. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 4(3):257–270. S. 4
- Glaser, B. und Strauss, A. (1977). *The discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research*. Aldine. S. 9

- GSI (2008). Introduction to GS1 DataMatrix. Guideline, GS1. S. 42
- Hampson, I. und Junor, A. (2005). Invisible work, invisible skills: interactive customer service as articulation work. *New Technology, Work & Employment*, 20(2):166 – 181. S. 6
- Hanke, U. (2006). *Externe Modellbildung als Hilfe bei der Informationsverarbeitung und beim Lernen*. PhD thesis, University of Freiburg. S. 11
- Holmquist, L., Redström, J., und Ljungstrand, P. (1999). Token-Based Access to Digital Information. In *Proceedings of the 1st international Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, Seiten 234–245. Springer-Verlag London, UK. S. 19, 24, 157, 158
- Hornecker, E. (2004). *Tangible User Interfaces als kooperationsunterstützendes Medium*. Phd-Thesis, University of Bremen. Dept. of Computing. S. 25
- Hughes, F. (1971). *The Sociological Eye*. Aldine de Gruyter. S. 3, 6
- Ishii, H. (2008). Tangible bits: beyond pixels. In *Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction*. ACM New York, NY, USA. S. 25
- Ishii, H. und Ullmer, B. (1997). Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI)*, Seiten 234–241. ACM Press New York, NY, USA. S. 18, 19
- ISO JTC1/SC31 (2006). Information technology – automatic identification and data capture techniques – qr code 2005 bar code symbology specification. International Standard 18004:2006, ISO/IEC. S. 29, 42
- ISO JTC1/SC34 (2008). Topic Maps Constraint Language. draft standard, ISO/IEC. S. 136
- ISO JTC1/SC34/WG3 (2008). Information Technology - Topic Maps - Part 2: Data Model. International Standard 13250-2, ISO/IEC. S. 128, 132
- James, M. (1997). *Microcontroller Cookbook - PIC & 8051*. Butterworth-Heinemann. S. 33
- Kaltenbrunner, M. und Bencina, R. (2007). reactivision: a computer-vision framework for table-based tangible interaction. In *TEI '07: Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, Seiten 69–74, New York, NY, USA. ACM Press. S. 42, 92

- Kato, H., Billinghurst, M., Poupyrev, I., Imamoto, K., und Tachibana, K. (2000). Virtual object manipulation on a table-top AR environment. In *IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, 2000. (ISAR 2000). Proceedings*, Seiten III–II9. S. 29, 41
- Klemmer, S., Li, J., Lin, J., und Landay, J. (2004). Papier-mâché: Toolkit support for tangible input. *CHI Letters, Human Factors in Computing Systems: CHI2004.*, 6(1). S. 22, 37
- Koleva, B., Benford, S., Ng, K., und Rodden, T. (2003). A Framework for Tangible User Interfaces. In *Workshop-Proceedings on Real World User Interfaces, Mobile HCI Conference 03*, Seiten 257–264. S. 22
- Neubauer, M. (2008). Abbildung generischer Modelle auf Topic Maps. Master's thesis, University of Linz. S. 146, 147
- Nonaka, I. und Takeuchi, H. (1995). *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. Oxford University Press. S. 6
- Oppl, S. (2004). Context-aware Group-Interaction. Master's thesis, University of Linz, Department for Pervasive Computing. S. 37
- Oppl, S. (2007). Flexibility of Content for Organisational Learning - A Topic Map Approach. Master's thesis, University of Linz. S. 147
- Oppl, S. und Stary, C. (2005). Towards Human-Centered Design of Diagrammatic Representation Schemes. In Dix, A. und Dittmar, A., editors, *Proceedings of the 4th International Workshop on Task Models and Diagrams for User Interface Design (TAMODIA 2005)*, Seiten 55–62. ACM Press New York, NY, USA. S. 139
- Patten, J., Ishii, H., Hines, J., und Pangaro, G. (2001). Sensetable: a wireless object tracking platform for tangible interfaces. In *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems 2001 (CHI '01)*. S. 25
- Pepper, S. (2000). The tao of topic maps. In *Proceedings of XML Europe*. S. 128
- Rath, H. (2003). *The Topic Maps Handbook*. empolis GmbH. S. 128
- Rohs, M. (2005). Visual code widgets for marker-based interaction. In *25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2005*, Seiten 506–513. IEEE Press. S. 42
- Rohs, M. und Gfeller, B. (2004). Using camera-equipped mobile phones for interacting with real-world objects. In *Advances in Pervasive Computing*, Seiten 265–271. Austrian Computer Society (OCG). S. 42, XI

- Rumbaugh, J., Jacobson, I., und Booch, G. (2004). *Unified Modeling Language Reference Manual, The*. Pearson Higher Education. S. 140, 144, 146
- Rumelhart, D. und Norman, D. (1978). Accretion, tuning, and restructuring: Three modes of learning. In Cotton, J. und Klatzky, R., editors, *Semantic factors in cognition*, Seiten 37–53. Erlbaum, Hillsdale, N.J. S. 11
- Scheer, A.-W. (2003). *ARIS – Business Process Modeling*. Springer, 3 edition. S. 146
- Schilit, B., Adams, N., und Want, R. (1994). Context-aware computing applications. In *Proceedings of the Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, Seiten 85–90. S. 36
- Schmidt, K. (1990). Analysis of Cooperative Work. A Conceptual Framework. Technical Report Risø-M-2890, Risø National Laboratory. S. 6
- Seel, N. M. (1991). *Weltwissen und mentale Modelle*. Hogrefe, Göttingen u.a. S. 11
- Semmer, N. und Udris, I. (2004). Bedeutung und Wirkung von Arbeit. In Schuler, H., editor, *Lehrbuch Organisationspsychologie*, Seiten 157–195. Huber, Bern, 3rd edition. S. 4
- Shaer, O., Leland, N., Calvillo-Gamez, E., und Jacob, R. (2004). The TAC paradigm: specifying tangible user interfaces. *Personal and Ubiquitous Computing*, 8(5):359–369. S. 22
- Siegrist, J. (2005). *Medizinische Soziologie*. Elsevier, Deutschland. S. 9
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Springer Wien. S. 129
- Stary, C. (1994). *Interaktive Systeme: Softwareentwicklung und Softwareergonomie*. Vieweg. S. 40
- Strauss, A. (1985). Work and the Division of Labor. *The Sociological Quarterly*, 26(1):1–19. S. 3, 5, 9, III
- Strauss, A. (1988). The Articulation of Project Work: An Organizational Process. *The Sociological Quarterly*, 29(2):163–178. S. 5, 6
- Strauss, A. (1993). *Continual Permutations of Action*. Aldine de Gruyter, New York. S. 4, 6, 10, 11
- Ullmer, B. und Ishii, H. (2000). Emerging frameworks for tangible user interfaces. *IBM Systems Journal*, 39(3):915–931. S. 22, 24, 93

- Ullmer, B., Ishii, H., und Jacob, R. (2005). Token + constraint systems for tangible interaction with digital information. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 12(1):81–118. S. 24
- Underkoffler, J. und Ishii, H. (1999). Urp: A luminous-tangible workbench for urban planning and design. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: the CHI is the limit*, Seiten 386–393. ACM New York, NY, USA. S. 22, 24
- Van Laerhoven, K., Villar, N., Schmidt, A., Gellersen, H., Hakansson, M., und Holmquist, L. (2003). Pin&Play: the surface as network medium. *IEEE Communications Magazine*, 41(4):90–95. S. 33
- Vatant, B. (2004). Ontology-driven Topic Maps. In *Proceedings of XML Europe 2004*, Amsterdam. S. 128
- Wagner, D. und Schmalstieg, D. (2003). ARToolKit on the PocketPC platform. In *IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop, 2003*, Seiten 14–15. IEEE Press. S. 45
- Weiser, M. (1991). The computer for the 21st century. *Scientific American*, 265. S. 35
- ZigBee Alliance (2007). Zigbee Specification. Specification r17, ZigBee Alliance. S. 34