

Ein Abstraktionsmodell für oberflächenbasierte gegenständliche Benutzerschnittstellen

Martin Kaltenbrunner¹

Abstract: Die kumulative Dissertation mit dem englischen Originaltitel *An Abstraction Framework for Tangible Interactive Surfaces* diskutiert - am Beispiel vier aufeinander folgender Publikationen - die einzelnen Schichten eines gegenständlichen Interaktionsmodells, das im Zusammenhang mit einem elektronischen Musikinstrument mit gegenständlicher Benutzerschnittstelle entwickelt wurde. Basierend auf den Erfahrungen die während der Gestaltung und Implementierung dieser konkreten musikalischen Anwendung gesammelt wurden, konzentriert sich diese Forschungsarbeit hauptsächlich auf die Definition eines generell einsetzbaren Abstraktionsmodells für die digitale Repräsentation physischer Interfacekomponenten welche üblicherweise im Kontext interaktiver Oberflächen verwendet werden. Gemeinsam mit einer detaillierten Beschreibung des zugrundeliegenden Abstraktionsmodells, behandelt diese Dissertation auch dessen konkrete Implementierung in Form einer detaillierten Protokollsyntax, die das verbindende Element einer verteilten Architektur für die Realisierung von oberflächenbasierten gegenständlichen Benutzerschnittstellen darstellt. Die eigentliche Implementierung des vorgestellten Abstraktionsmodells als konkretes Toolkit besteht aus dem *TUIO Protokoll* und der damit verbundenen Computervision Anwendung für Objekt- und Fingergestentracking *reactIVision*, gemeinsam mit deren primärer Anwendung in der Realisierung des *Reactable* Synthesizers. Die Dissertation schliesst mit einer Evaluierung und Erweiterung des ursprünglichen TUIO Modells, mit der Präsentation von TUIO2 - einem Abstraktionsmodell der nächsten Generation, das für eine weitergehendes Genre von gegenständlichen Interaktionsplattformen und die dazugehörigen Anwendungsszenarien entworfen wurde.

Forschungsthese

Diese Dissertation dokumentiert den Forschungsprozess und die damit verbundene Design- und Entwicklungsarbeit mit dem Ziel folgende These zu etablieren:

Die Einführung einer Abstraktionsschicht in Form einer semantischen Klassifizierung und der digitalen Darstellung physischer Interfacekomponenten einer gegenständlichen Interaktionsumgebung, unterstützt die sensor- und anwendungsunabhängige Gestaltung von oberflächenbasierten gegenständlichen Benutzerschnittstellen, durch die Bereitstellung einer allgemeinen Infrastruktur für die Integration der zugrundeliegenden Interfacetechnologien mit übergeordneten anwendungsspezifischen Modellen.

¹ Fakultät Medien, Bauhaus-Universität Weimar, martin.kaltenbrunner@ufg.at

Forschungskontext

Das Paradigma gegenständlicher Interaktion (Tangible User Interfaces) repräsentiert heute ein relativ gut entwickeltes Forschungsfeld im Bereich der Mensch-Maschine Interaktion. Zahlreiche Anwendungsmodelle wurden etabliert um die fundamentalen Designprinzipien zu beschreiben, die aus der Forschungs- und Entwicklungspraxis der vergangenen Jahrzehnte hervorgegangen sind. Die meisten dieser Modelle konzentrieren sich jedoch auf die Darstellung allgemeiner Gestaltungsmuster oder semantischer Klassifikationen der Funktion, dem Inhalt oder der Beziehung physischer Designelemente auf der Anwendungsebene und aus der Perspektive der Benutzer.

Da gegenständliche Benutzerschnittstellen per Definition die physische Welt mit digitaler Information koppeln, vereinen die meisten aktuellen Konzepte die Beschreibung von physischen Interfacekomponenten mit ihrer jeweiligen Rolle auf der Anwendungsebene. Obwohl diese Modelle aus einer Designperspektive eine solide theoretische Grundlage für die Gestaltung gegenständlicher Interfaces durch ihre konzeptionelle Verkörperung digitaler Information in der Form physischer Artefakte bieten, maskieren diese jedoch oft den jeweiligen technischen Hintergrund, der für die Realisierung derartig komplexer Hardware-Plattformen notwendig ist.

Andererseits können Entwickler heute auch auf eine Vielzahl von frei verfügbaren Hard- und Software Werkzeugen zurückgreifen, welche für die Herstellung der vielfältigen Manifestationen von physischen Interface-Komponenten verwendet werden können. Dies inkludiert Computer-Vision Anwendungen oder Unterhaltungselektronik mit fortschrittlicher Sensortechnologie, welche die notwendigen Kontrolldaten für die Integration physischer Interfacekomponenten in die Interaktionsebene zur Verfügung stellen. Da diese Werkzeuge und Geräte oft nur generische Sensordaten liefern, erfordert dies aus der Entwicklerperspektive eine zusätzliche Übersetzung der Rohdaten.

Diese Dissertation etabliert ein Modell für die semantische Beschreibung der Arten, Zustände und Beziehungen physischer Interfacekomponenten. Dieses Abstraktionsmodell liefert eine generische Beschreibung deren Zustände und Attribute an die Anwendungsebene, welche auf der zugrundeliegenden Semantik interaktiver Oberflächen aufbaut. Das Modell dient daher als eine vereinende Zwischenschicht zur Integration der physischen Umgebung mit einer digitalen Anwendung, und bietet daher eine durchgehend konsistente Repräsentation aus einer Entwickler-, Designer und Benutzerperspektive.

Forschungsbeiträge

Diese Forschung wurde in aufeinanderfolgenden Schritten durchgeführt, welche das Design, die Implementierung, eine Anwendung und die abschliessende Evaluierung des ursprünglichen Modells beinhalten, und letztendlich zur Definition des erweiterten Abstraktionsmodell führten, welches im abschliessenden Kapitel dieser Dissertation behandelt wird. Die folgenden Beiträge sind das Ergebnis dieser einzelnen Forschungsphasen:

- Die Definition eines Abstraktionsmodells für die semantische Beschreibung der physischen Interaktionsumgebung, die als Mediator zwischen den physischen Interfacekomponenten und der digitalen Anwendungsebene dient, und damit eine sensor- und anwendungsunabhängige Klassifizierung der physischen und gestenbasierten Elemente im Kontext interaktiver Oberflächen bereitstellt.
- Die Implementierung des oben genannten Abstraktionsmodells innerhalb der offenen TUIO Protokolldefinition und einer zugehörigen Programmierschnittstelle, welche eine dezidierte Syntax und die semantischen Deskriptoren zur Kommunikation der Eigenschaften gegenständlicher Interfacekomponenten an die Anwendungsebene bereitstellen.
- Eine Hard- und Software Referenzplattform dieses physischen Abstraktionsmodells in Form der Computer-Vision basierten Anwendung reacTIVision, welche auch die konkrete Implementierung der oben genannten Protokollinfrastruktur integriert.
- Das Interaktionsdesign des gegenständlichen Musikinstruments Reactable, welches die praktischen Implikationen und die konkrete Anwendung des Modells im Bereich musikalischer Interfaces demonstriert, indem es die direkte Manipulation von Klang in der Form physischer Objekte auf einer Tischoberfläche ermöglicht.
- Die Weiterentwicklung des ursprünglichen Abstraktionsmodells auf der Basis einer Analyse weiterer gegenständlicher Interaktionsplattformen und dessen Erweiterung und Implementierung anhand des TUIO 2.0 Protokolls, um die erweiterten Eigenschaften gegenwärtiger tischbasierter Interaktionsmodelle zu reflektieren.

Forschungsmethoden

Während der Entwicklung des präsentierten Modells, seiner Protokoll- und Referenzimplementierung habe ich eine konsequente *Open Science* Methodik angewendet, indem ich eine *Public Domain* Protokollspezifikation gemeinsam mit einem *Open Source* Toolkit zur Verfügung gestellt habe, welches unter Anderem auch die Aktivitäten einer kreativen *Open Design* Community unterstützt hat. In diesem Kontext bezieht sich der Begriff *Public Domain* auf die lizenzfreie Verwendung des TUIO Protokolls, während das *Open Source* Konzept den vollständigen Zugriff auf den Quellcode seiner Implementierung garantiert. *Open Design* erweitert diese Idee auf weitergehende Details zu den spezifischen Hardwaredesign-Aspekten, die in Zusammenhang mit einer konkreten Anwendung dieser Technologien stehen. Dies stellt in Kombination mit einer formalen Veröffentlichung aller relevanten wissenschaftlichen Ergebnisse und einer entsprechenden Dokumentation das elementare *Open Science* Werkzeug im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion dar.

Diese offene Methodologie wurde zusätzlich durch das modulare Design des dokumentierten Frameworks erleichtert, wodurch auch die Integration von zahlreichen Communitybeiträgen in meine eigene Forschungspraxis ermöglicht wurde. Dieser Open Science Ansatz generiert ausserdem vergleichbare Resultate, welche auf einer gemeinsamen Forschungsinfrastruktur aufbauen, die eine Evaluierung und die weitere Verbesserung individueller

Forschungsaspekte innerhalb eines geteilten Ökosystems erst ermöglichen. Diese Forschungspraxis besteht daher nicht nur aus einer *peer-reviewed* Veröffentlichung von wissenschaftlichen Ergebnissen, sondern zusätzlich auch aus der *peer-improved* Veröffentlichung einer entsprechenden Open-Source Implementierung. Ich erachte dies als die notwendigen Elemente für die Herstellung einer *Open-Experiment* Situation, auch mit Unterstützung durch *Crowd-Source* Beiträge aus der Community.

Eine konkrete Anwendung wurde durch einen *praxisorientierten Forschungsansatz* innerhalb eines musikalischen Anwendungsfeldes im Reactable evaluiert, einem tischbasierten modularen Synthesizer mit gegenständlicher Benutzerschnittstelle. Dies inkludierte auch die Anwendung *künstlerischer Forschungsmethoden* durch die Integration von Komponisten und Performern in den Designprozess. Die Erfahrungen aus meiner eigenen Performancepraxis in Kombination mit dem Feedback aus den verschiedenen künstlerischen Kooperationen wurden in einem *Iterativen Designprozess* in die weitere Verbesserung der technischen Grundlagen und des Interaktionskonzeptes dieses Musikinstrumentes integriert.

Das finale Abstraktionsmodell dieser Dissertation beruht auf einer umfassenden Analyse und Klassifikation zahlreicher interaktiver Oberflächen und deren grundlegenden physischen Komponenten, und wurde auch durch eine exemplarische Kodierung dieser Interaktionsplattformen im Rahmen dieses Modells evaluiert.

Ausgewählte Publikationen

Diese Dissertation ist in drei Abschnitte gegliedert. Der erste Abschnitt bietet eine allgemeine Einführung in den Forschungsbereich der gegenständlichen Interaktion und definiert die spezifischen Eigenschaften von interaktiven Oberflächen, welche den konkreten Anwendungsbereich meiner Forschung darstellen.

Die folgenden vier Artikel, welche ich als Erstautor in den Jahren von 2005 bis 2009 veröffentlicht habe, bilden den zentralen Abschnitt dieser kumulativen Dissertation. Laut Google Scholar hat diese Forschung seit ihrer ursprünglichen Veröffentlichung mittlerweile mehr als 1100 Zitate akkumuliert.³

- [1] Martin Kaltenbrunner, Till Bovermann, Ross Bencina und Enrico Costanza. "TUIO - A Protocol for Table Based Tangible User Interfaces". In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Gesture in Human-Computer Interaction and Simulation (GW 2005)*. Vannes, France, 2005.
- [2] Martin Kaltenbrunner, Sergi Jordà, Günter Geiger und Marcos Alonso. "The reacTable: A Collaborative Musical Instrument". In: *Proceedings of the Workshop on Tangible Interaction in Collaborative Environments (TICE)*. Manchester, U.K., 2006.

³ <http://scholar.google.com/citations?user=G7rN7JUAAAAJ>

- [3] Martin Kaltenbrunner und Ross Bencina. “reactIVision: A Computer-Vision Framework for Table-Based Tangible Interaction”. In: *Proceedings of the first international conference on Tangible and Embedded Interaction (TEI07)*. Baton Rouge, Louisiana, 2007.
- [4] Martin Kaltenbrunner. “reactIVision and TUIO: A Tangible Tabletop Toolkit”. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS2009)*. Banff, Canada, 2009.

Diese Kernpublikationen stellen die Modelldefinition in der Form des TUIO Protokolls, seine Implementierung innerhalb des reactIVision Frameworks, eine Anwendung im Rahmen des Musikinstruments Reactable und eine abschliessende Evaluierung des Abstraktionsmodells für gegenständliche interaktive Oberflächen in Form der weitergehenden Evolution des reactIVision und TUIO Frameworks dar.

Jedem Publikationskapitel ist eine einleitende Klarstellung meiner eigenen Beiträge im jeweiligen Forschungskontext vorausgestellt, und wird mit einer nachträglichen Analyse der ursprünglichen Publikation und weiterführenden Anmerkungen im Gesamtkontext abgeschlossen. Die Kommentare zur letzten Publikation in diesem Abschnitt beinhalten eine tiefergehende Analyse der Stärken und Schwächen des Modells im Zusammenhang aller vier Publikationen und dokumentiert auch zahlreiche Verbesserungen des reactIVision und TUIO Frameworks seit ihrer originalen Veröffentlichung.

Diese Arbeit schliesst mit einem dritten Abschnitt, welcher auf den Forschungsergebnissen dieser Kernpublikationen aufbauend ein erweitertes Abstraktionsmodell und seine Implementierung in Form des TUIO 2.0 Protokolls definiert. Der Abschnitt enthält neben der vollständigen Spezifikation dieser neuen Protokollgeneration auch eine Reihe von Beispielkodierungen, welche dessen Potential anhand einiger gegenständlicher Interaktionsplattformen, Anwendungen und Geräte illustriert.

Das TUIO Protokoll

Am Beginn dieser Dissertation steht die Veröffentlichung der ursprünglichen Spezifikation des TUIO 1.0 Protokolls, welche die Beschreibung und Übertragung einfacher Multipointer-Positionsdaten als generische *Cursor* Komponenten ermöglicht. Ausserdem beschreibt das Protokoll auch abstrakte Gegenstände als *Object* Komponenten, welche zusätzlich zu ihrer Oberflächenposition und ihrem Rotationswinkel auch durch eine eindeutige Identifikationsnummer unterschieden werden können. Mit diesen beiden Kernkomponenten lassen sich sowohl Multitouch-Interaktion als auch die Manipulation markierter Objekte im Kontext einer interaktiven Oberfläche realisieren. Mit einer späteren Publikation wurde dieses Modell noch um eine dritte *Blob* Komponente ergänzt, um auch die Beschreibung unmarkierter Objekte ihrer vereinfachten Geometrie erlaubt. Diese drei Komponenten stellen die Kernelemente der finalen TUIO 1.1 Spezifikation dar, welche trotz ihres einfachen Designs die Realisierung relativ komplexer Anwendungen für interaktive Oberflächen ermöglichte.

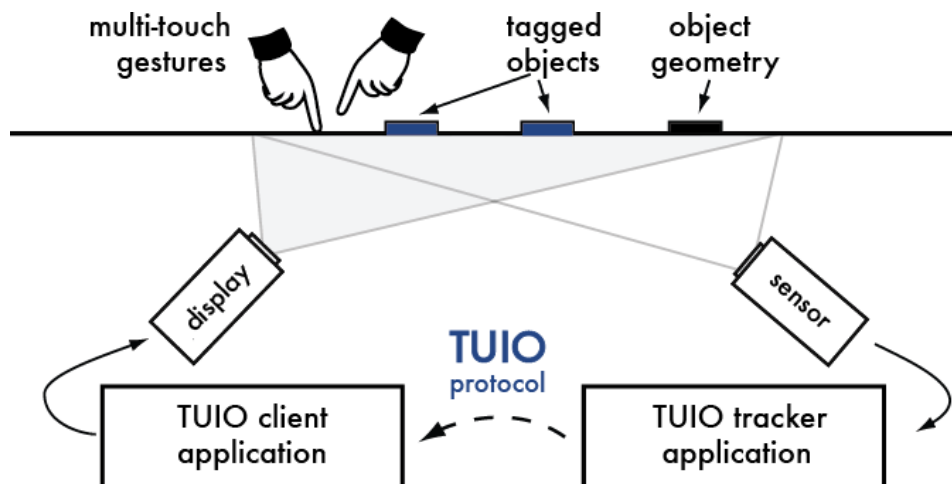


Abb. 1: Die verteilte TUIO 1.1 Architektur

Das TUIO Protokoll baut als verteilte Architektur auf dem *Open Sound Control* Format auf, und erlaubt daher eine getrennte Entwicklung der Hardware- und Anwendungsebene. Gemeinsam mit der frei verfügbaren Protokollspezifikation, wurden auch eine Reihe quell-offener Bibliotheken für die Integration des TUIO Protokolls in zahlreichen Programmiersprachen und Entwicklungsumgebungen zur Verfügung gestellt. Dieser Umstand führte letztendlich auch zu einer weiteren Verbreitung des Protokolls, und seiner Implementierung in zahlreichen Soft- und Hardwareprojekten für die Realisierung von interaktiven Oberflächen. Auch wenn das Protokoll selbst auch explizit Objektinteraktion ermöglichte, so konzentrierte sich ein Großteil der Entwicklungen vor allem auf Multitouch-Interaktion, da diese zu jenem Zeitpunkt von Standardsystemen noch nicht ausreichend unterstützt wurden. Auch wenn Das TUIO Protokoll in diesem konkreten Anwendungsbereich heute weitgehend obsolet geworden ist, so stellt seine zusätzliche Möglichkeit der Objektbeschreibung nach wie vor ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal dar.

Das reacTIVision Framework

Die zweite Publikation in der vorliegenden Dissertation beschreibt mit dem reacTIVision Framework eine Implementierung des TUIO Modells in der Form einer Computer-Vision Anwendung. reacTIVision wurde im Kern für das Tracking spezieller Markersymbole entwickelt, welche auch auf beliebige Gegenständen angebracht werden können. Dies erlaubt in der Folge die eindeutige Identifikation und exakte Lokalisierung dieser Objekte, sowie die Erfassung ihres Rotationswinkels. Zusätzlich zum Symboltracking wurde reacTIVision auch um eine einfache Methode erweitert, die auch das Tracking von Fingerkuppen in Kontakt mit einer halbdurchlässigen Oberfläche erlaubt. In einem späteren Entwicklungsschritt wurde die Anwendung letztendlich auch noch um die Analyse generischer Objektgeometrien erweitert, womit reacTIVision heute eine vollständige Referenzimplementierung des TUIO 1.1. Abstraktionsmodells darstellt.

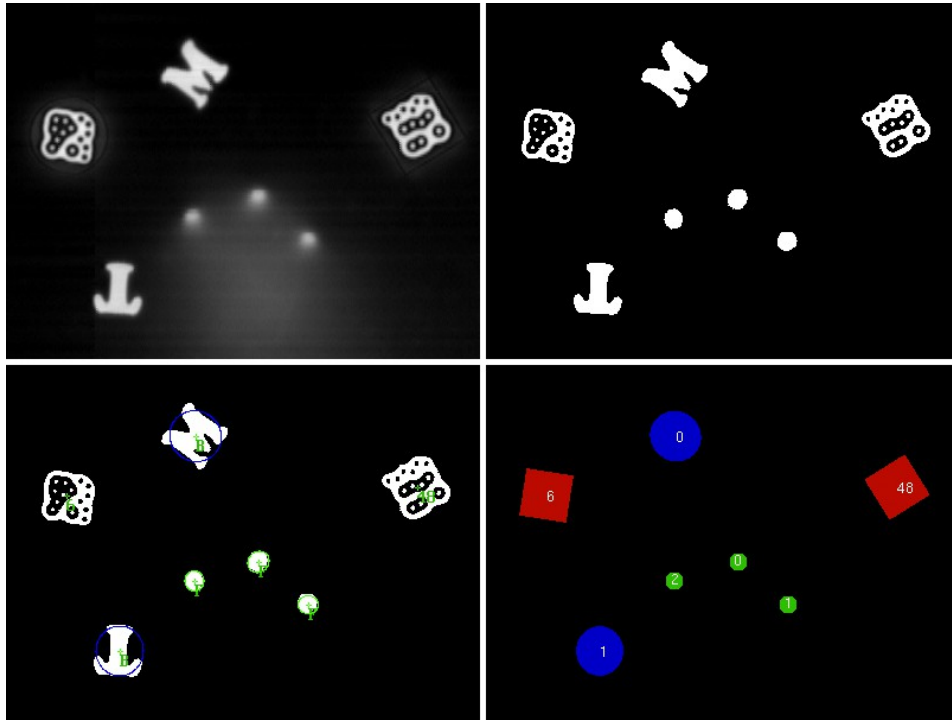


Abb. 2: Implementierung der TUIO 1.1 Abstraktion in reactIVision

reactIVision zeichnet sich aufgrund seines topologischen Markerdesigns durch eine relativ hohe Robustheit und Effizienz aus. Die Bildverarbeitung wurde dahingehend optimiert, dass diese lediglich aus einem Thresholding und Segmentierungsschritt besteht. Die Objekterkennung und die Blobanalyse finden bereits in dafür optimierten Datenstrukturen statt. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal der Software ist die spezielle Ästhetik der *Amoeba* Symbole, welche auf einem genetischen Algorithmus für das Rendering seiner optimierter Formen beruht. Die Software ist ebenfalls gemeinsam mit seinem Quellcode für mehrere Standardplattformen verfügbar und wurde in der Folge für die Umsetzung zahlreicher künstlerischer und wissenschaftlicher Projekte genutzt.

Der Reactable Synthesizer

Der Reactable ist ein elektronisches Musikinstrument in der Form eines runden Tisches, auf dessen Oberfläche einfache geometrische Objekte arrangiert werden können. Diese Objekte repräsentieren die Kernelemente eines modularer Synthesizers, in der Form verschiedener Klangerzeuger, Filter und Klangeffekte, sowie Controllerobjekte und Sequencer. Im Prinzip stellt der Reactable eine Arte gegenständliche Klangprogrammiersprache dar, welche vor allem durch die Manipulation physischer Objekte und deren Beziehungen zueinander gestaltet werden kann. Im Rahmen der Entwicklung dieses Musik-

instrumentes war es auch notwendig geworden, die dafür notwendigen Basistechnologien zu entwickeln. Dies führte letztendlich auch zur Spezifikation des TUIO Protokolls und seiner Implementierung im reacTIVision Framework, welche im Wesentlichen die für die Realisierung des Reactables notwendigen Interface-Komponenten zur Verfügung stellen, sowie die Herstellung einer kamerabasierten interaktiven Oberfläche ermöglichte.



Abb. 3: Der Reactable in seiner heutigen Form.

Die in der Dissertation behandelte Publikation konzentriert sich vor Allem auf den kollaborativen Charakter dieses Musikinstrumentes, welcher unter Anderem auch durch seine spezielle runde Tischform betont wird. Das erste öffentliche Reactable-Konzert im Jahr 2005 wurde außerdem gleichzeitig an zwei Orten aufgeführt, wobei die beiden Instrumente über das Internet miteinander verbunden waren, und über eine Distanz von mehreren hundert Kilometern eine kooperative Performance innerhalb einer gemeinsam genutzten interaktiven Oberfläche stattfinden konnte. Das besonders robuste Design des TUIO Protokolls garantierte dabei die stabile Übertragung der entfernten Interaktionen und damit eine konsistente visuelle und akustische Darstellung des Instruments an beiden Konzertorten. Das TUIO Protokoll leitet das Erscheinen und Entfernen von Komponenten aus den Veränderungen einer Liste aller aktiven Elemente ab.

Forschungsergebnisse

Basierend auf den umfassenden Erfahrungen, die ich im Rahmen der Entwicklung dieses Modells sowie seiner Implementierung als Teil eines gemeinschaftlich entwickelten Soft- und Hardware Ökosystems gesammelt habe, habe ich eine erweiterte und neue Generation dieses Abstraktionsmodells gestaltet, welche aktuelle Forschungsergebnisse und

Technologien für gegenständliche interaktive Oberflächen berücksichtigt. Ich hoffe, dass dieses aktualisierte Modell die weitere Forschung nicht nur im Bereich der gestenbasierten Multitouch-Interaktion unterstützt, sondern vor Allem auch die weitere Entwicklung des Paradigmas gegenständlicher Interaktion in der physischen und begreifbaren Domäne fördert.

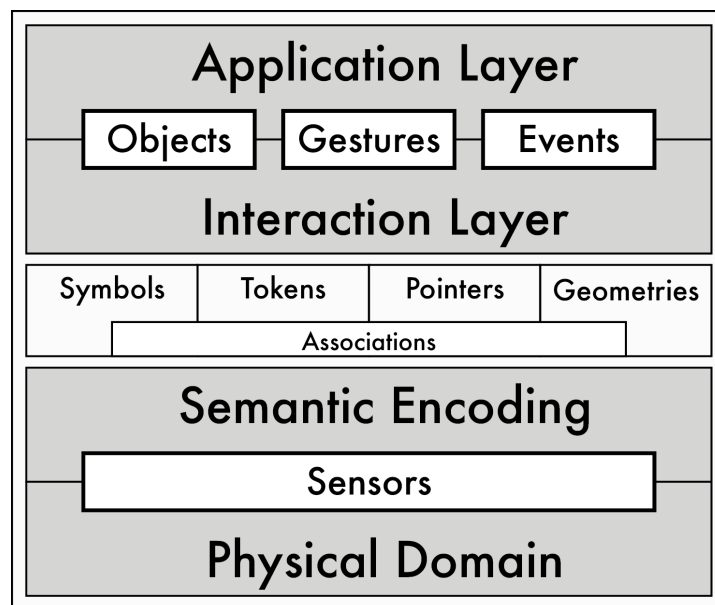


Abb. 4: Schichten des allgemeinen TUIO Abstraktionsmodells

Das **ursprüngliche Abstraktionsmodell** hat die drei grundlegenden Interfacekomponenten von **Tokens** (als Objekte), **Pointers** (als Cursors) und **Bounds** (als Blobs) definiert, welche die fundamentalen Elemente gegenständlicher interaktiver Oberflächen darstellen. Auf der Grundlage dieses Modells wurde das heute de-facto Standard **TUIO-Protokoll** definiert, welches die Zustände und Eigenschaften dieser Komponenten darstellt. Diese Protokollabstraktion stellt eine semantische Beschreibung physischer Interfacekomponenten unabhängig von den eigentlichen Hardwareeigenschaften und Sensortechnologien dar, und erlaubt damit die Entwicklung plattformunabhängiger Anwendungen.

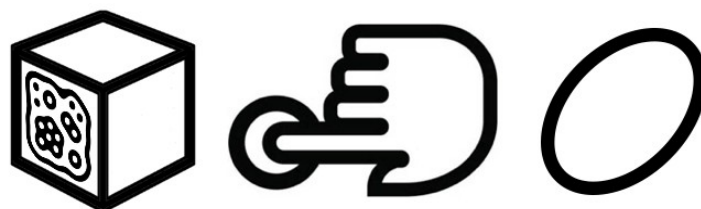


Abb. 5: TUIO 1.1 Komponenten: Objekte, Cursor & Blobs

Dafür habe ich auch eine umfassende Sammlung von Softwarewerkzeugen bereitgestellt, welche nicht nur das TUIO Protokoll implementieren sondern dessen Kernfunktionalität

auch in Form eines Computer-Vision Toolkits zur Realisierung tischbasierten Anwendungen illustrieren. Dieser **Open-Source Ansatz** führte auch zur Entwicklung zahlreicher weiterer auf diesem Protokoll aufbauender Werkzeuge und Anwendungen. Auch wenn die meisten dieser externen Lösungen die vielseitige Anwendbarkeit des generischen Abstraktionsmodells belegen, haben einige spezifische Anwendungsfälle auch diverse Einschränkungen dieser Vereinfachung aufgezeigt.

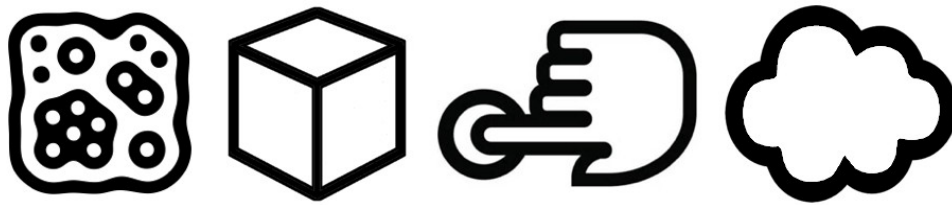


Abb. 6: TUIO2 Komponenten: Symbole, Token, Pointer & Geometrien

Die detaillierte Analyse von zahlreichen Communitybeiträgen und weiteren gegenständlichen Interaktionsplattformen, haben mich daher zur Definition eines **erweiterten Abstraktionsmodells** motiviert. Während **Tokens**, **Pointers** & **Bounds** mit einem erweiterten Set von Attributen nach wie vor die Kernkomponenten dieses neuen Abstraktionsmodells darstellen, habe ich eine zusätzliche generische **Symbol** Komponente eingeführt, sowie auch eine Reihe von **Geometrien**, welche die physische Objekterscheinung detailliert beschreiben. Das erweiterte Modell erlaubt ausserdem die Einbindung von **Control** Elementen, sowie die Beschreibung physischer oder logischer **Assoziationen** und den Austausch von **Signalen** zwischen Komponenten.

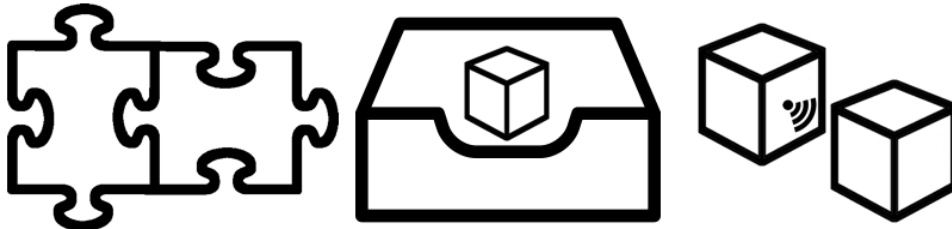


Abb. 7: TUIO2 Beziehungen: Physischer Link, Container & Signal

Es bleibt zu hoffen, dass das TUIO 2.0 Protokoll und die damit verbundenen Anwendungen, Bibliotheken und Werkzeuge eine ausreichend attraktive Funktionserweiterung darstellen um auch die weitere Community-Unterstützung dieser neuen Protokollgeneration zu gewährleisten, in ähnlicher Form wie die vielfältigen Beiträge zum bestehenden TUIO 1.1 Ökosystem.