

Kapitel 12

Tangible User Interfaces

In den ersten beiden Kapiteln dieses Buchteils ist bereits deutlich geworden, welche vielfältigen Alternativen es zu traditionellen WIMP-Interfaces aktueller Computer gibt. Formen gestischer Interaktion sowie das direkte Interagieren mit Oberflächen, bei denen Ein- und Ausgaberaum verschmelzen, erlauben eine natürlichere Interaktion. Die inzwischen bei Smartphones und Tablets omnipräsente Eingabe mit Multitouch oder auch Stiften nähert sich unseren Alltagsgewohnheiten und erworbenen Fähigkeiten, z. B. beim Schreiben und Skizzieren, deutlich an. Im Unterschied zu Graphical User Interfaces (GUIs) ist also eine viel direktere Interaktion mit angezeigten Inhalten möglich. Allerdings besteht bei interaktiven Oberflächen nach wie vor die Beschränkung, dass ein Display – ob nun als Smartphone, Tablet, Tisch oder digitale Tafel – nur eine rechteckige Fläche zur Verfügung stellt, auf der Benutzer interagieren.

Im Gegensatz dazu sind wir in unserer alltäglichen, physisch-materiellen Welt jedoch nicht darauf beschränkt, auf klar umrissenen, ebenen Oberflächen zu arbeiten. Seit Jahrtausenden haben die Menschen eine unglaubliche Vielfalt von Werkzeugen entwickelt, mit denen häufig spezialisierte Aufgaben bzw. ein bestimmter Typ von Aufgaben erledigt werden kann. Ob Säge, Korkenzieher, Lenkrad oder Musikinstrument – immer ist es eine hochgradig optimierte Produktgestalt mit reichen *Affordances*¹ [Gibson, 1979, Norman, 1999], die uns ein effektives Interagieren erlaubt. Ein Touchscreen bietet nur ein geringes taktilen Feedback und ist (bisher) sensorisch arm, während ein Wasserhahn durch seine greifbare Form zur Bedienung auffordert.

Um den Bruch zwischen unseren realen Umgebungen und der digitalen Welt zu vermeiden und von der erfolgreichen haptischen Interaktion mit realen Gegenständen zu profitieren, schlugen Ishii und Ullmer [1997] in ihrem einflussreichen Artikel das Konzept der *Tangible User Interfaces* (TUIs) vor. Mit TUIs ist eine Erweiterung der realen Welt um digitale Informationsräume möglich, indem Informationen und Funktionen an be-greifbare Gegenstände gekoppelt sind, die sogenannten

¹ Die wahrgenommenen Eigenschaften eines Gerätes, die einen Eindruck von der möglichen Bedienung vermitteln, werden als Affordances bezeichnet. Im Band I wird im 4. Kapitel detailliert auf die Interaktion mit Alltagsgegenständen eingegangen, und Affordances werden in einem eigenen Abschnitt (4.1.1) behandelt.

Tangibles. Deren physische Manipulation dient als Eingabe, während die Ausgabe typischerweise hybrid durch angezeigte digitale Informationen sowie die räumliche Lage bzw. den Zustand eines Tangibles erfolgt. Indem bei TUIs Alltagsgegenstände als Schnittstelle zur digitalen Informationswelt genutzt werden, erfüllt sich auch ein Teil der Vision des *Ubiquitous Computing* [Weiser, 1991]: Computer werden verschwinden und in unsere Alltagswelt so nahtlos integriert sein, dass man sie kaum noch davon unterscheiden kann.

In diesem Kapitel stellen wir das Konzept der *Tangible Interaction* im Detail vor, wofür die deutsche Umschreibung „be-greifbare Interaktion“ eine schlüssige Doppeldeutung liefert. Erfolgreiche akademische und kommerzielle Anwendungsbeispiele werden ebenso diskutiert, wie grundlegende Klassifikationen und Frameworks in diesem Bereich. Es gibt bereits Monografien zu TUIs (z. B. [Shaer und Hornecker, 2010, Robben und Schelhowe, 2012]). Dieses Kapitel kann somit nur eine kompakte thematische Einführung sein. Mit dem Konzept der *Tangible User Interfaces* wurde ein wichtiger Trend innerhalb der modernen Mensch-Computer-Interaktion begründet, der nicht nur zahlreiche Forschungsarbeiten, eine eigene Konferenz und eine eigene Fachgruppe innerhalb der Gesellschaft für Informatik hervorbrachte, sondern auch erfolgreiche kommerzielle Produkte im Bereich Edutainment.

Gliederung. Im Abschnitt 12.1 wird erläutert, was *Tangible User Interfaces* charakterisiert und aus welcher Historie diese Form der Mensch-Computer-Interaktion entstanden ist. Anhand von Beispielen werden wichtige Kernaspekte von TUIs diskutiert. Im folgenden Abschnitt 12.2 werden Anwendungsdomänen und zahlreiche erfolgreiche Beispiele vorgestellt. Da das Gebiet der *Tangible User Interfaces* noch verhältnismäßig jung ist, dominieren dabei akademische Arbeiten, aber auch kommerzielle Systeme werden behandelt. Die Kenntnis von Beispielanwendungen ermöglicht schließlich im Abschnitt 12.3 eine Systematisierung von TUIs, die Diskussion von Designdimensionen und -prinzipien sowie eine kritische Reflektion von Vor- und Nachteilen in Abschnitt 12.4. In 12.5 werden dann aktuelle Trends diskutiert, wozu automatisch bewegte und in der Form veränderliche Tangibles gehören, bevor das Kapitel in 12.6 mit einer Zusammenfassung schließt.

12.1 Einführung, Grundlagen und Historie

Menschen haben über die Jahrhunderte erstaunliche Fähigkeiten im Umgang mit materiellen Objekten und Werkzeugen erworben. Sehr viele Alltagsgegenstände – zumindest, wenn sie gut gestaltet sind – kommunizieren ihre Funktionen und ihren Gebrauch über ihre Form, Größe, das Aussehen und andere sensorisch erfassbare Eigenschaften. So besitzen beispielsweise die Knöpfe und Drehregler einer Stereoanlage, der Griff einer Säge oder die Figuren auf einem Schachbrett Aufforderungscharakter (engl. *Affordances*) und laden über ihre physisch-materielle Ausprägung zu ihrer Benutzung ein.

Bei der Entwicklung grafischer Benutzungsschnittstellen (*Graphical User Interface*, GUI) hat man versucht, einen Teil dieser Affordances virtuell und visuell nachzubilden, indem z. B. Buttons oder Schieberegler als Bedienelemente angeboten werden und teils mit realistischem Aussehen und sogar Schatten versehen werden. Es existieren jedoch fundamentale Unterschiede von GUIs zu realen Gegenständen, die bei TUIs zur Bedienung genutzt werden.

- Die Darstellung erfolgt bei GUIs rein visuell (manchmal auch auditiv), begrenzt auf einen zweidimensionalen Ausschnitt, ein begrenztes Fenster in die virtuelle Welt. Wichtige produktsprachliche Eigenschaften, wie die dreidimensionale Form eines Objekts/Bedienelements und seine haptischen Eigenschaften, gehen damit vollständig verloren. Während bei GUIs Interaktion zweidimensional erfolgt, interagieren wir mit TUIs häufig auch dreidimensional.
- Die Möglichkeit, unser reichhaltiges sensorisches Repertoire zu nutzen, das wir bereits im Kleinkindalter geschult haben, wird bei GUIs bei weitem nicht ausgeschöpft. TUIs hingegen sind nicht allein auf die visuelle und auditive Sinneswahrnehmung begrenzt, sondern nutzen die *taktile* Wahrnehmung als zentralen Bestandteil. Das Formen von Figuren aus Ton ist z. B. eine überaus direkte, sinnliche und zugleich effektive Tätigkeit, besonders, wenn man sie mit der indirekten Gestaltung ähnlicher virtueller Objekte durch die Maus in einem 3D-Modellierungsprogramm vergleicht.
- Bei klassischen PCs und ihren fensterbasierten GUIs erfolgt die Eingabe durch Tastatur und Maus entkoppelt von der Ausgabe auf einem Bildschirm – Ein- und Ausgaberaum sind voneinander getrennt. Während man eine Schachfigur direkt auf dem Brett ziehen kann, ist bei einem virtuellen Schachspiel die Indirektion über einen mit der Maus bedienten Cursor vonnöten.
- Aufgrund der Entkopplung von Ein- und Ausgaberaum und der Verfügbarkeit nur eines Cursors müssen bei GUIs alle Aktionen sequenziell vorgenommen werden. Die Eingabe ist damit *time multiplexed*, während auf der Ausgabeseite GUI-Bedienelemente räumlich angeordnet sind (*space-multiplexed*) [Fitzmaurice et al., 1995]. Diese Dissonanz findet man bei den meisten realen Objekten nicht. Bei einem Schachspiel ist z. B. aufgrund der räumlichen Anordnung der Figuren eine parallele Bedienung möglich, die mit beidhändiger Interaktion einhergeht. Mehrere Schachfiguren können gleichzeitig aufgestellt oder verschoben werden, und nur die Regeln schränken das ein.
- In direktem Zusammenhang mit der Sequenzialität der Bedienung durch die Maus steht das freie Explorieren von Interface-Optionen, das Ausprobieren von Bedienhandlungen und ihrer Resultate. Während die Schachfiguren schnell in ihrer Position korrigiert werden können, ganz unabhängig von der Reihenfolge der zuvor vorgenommenen Änderungen, ist dies mit den Undo-Mechanismen in GUI-Anwendungen nur eingeschränkt und schrittweise möglich, was nicht immer vom Nutzer gewünscht ist.

Die hier aufgeführten Beschränkungen von GUIs werden durch Tangible User Interfaces adressiert und größtenteils aufgehoben. Das soll an einführenden Beispielen illustriert werden, bevor wir weitere Begrifflichkeiten erläutern.

12.1.1 Einführende Beispiele

Ein Anrufbeantworter mit Murmeln. Ein moderner Anrufbeantworter hat nur noch selten dedizierte physische Bedienelemente. Ob portables Festnetztelefon oder Smartphone, selten gibt es überhaupt noch materielle Knöpfe zum Abspielen von Nachrichten. Die Anzahl von empfangenen Nachrichten sieht man meistens nicht beim Betreten eines Raumes bzw. mit einigem Abstand zum Telefon. Stattdessen symbolisiert eine farbige Leuchte oder ein verändertes Icon, dass Anrufe eingegangen sind. Über mehr oder minder komplizierte Menüs kann man sich dann durch die Liste der Anrufe hindurch navigieren und diese abhören oder löschen.

Ganz anders ist das Designkonzept der sogenannten **MARBLE ANSWERING MACHINE**, vom Produktgestalter **DURRELL BISHOP 1991** als Student am Royal College of Art in London entworfen (siehe [Ishii und Ullmer, 1997, Shaer und Jacob, 2009]). Abb. 12.1 zeigt, wie eintreffende Nachrichten in Form von farbigen Murmeln repräsentiert werden, die in eine Mulde fallen. So lässt sich sofort beim Betreten des Raumes erkennen, wie viele neue Nachrichten eingegangen sind. Wird der Anrufer oder eine vorher definierte Gruppe von Anrufern noch durch eine Murmelfarbe kodiert, kann man viel leichter sehen, welchen Anruf man abhören möchte. Dies geschieht durch Greifen einer beliebigen Murmel (unabhängig von der Reihenfolge des Eingangs!) und ihre Ablage in einer für das Abspielen vorgesehenen Vertiefung. Anrufe können auf ähnliche Weise gelöscht oder in „Schalen“ aufbewahrt werden. Damit lassen sie sich kategorisieren oder z. B. verschiedenen Familienmitgliedern zuordnen. Durch Ablegen einer Murmel an anderer Stelle könnte man auch automatisch mit dem Anrufer verbunden werden.

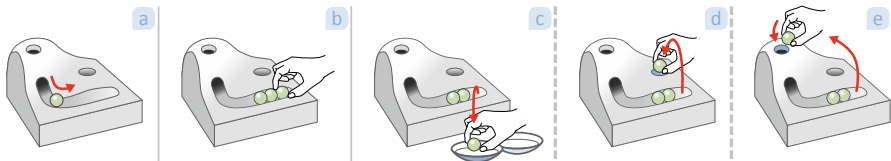


Abb. 12.1: Bei der **MARBLE ANSWERING MACHINE** repräsentieren Murmeln die Nachrichten eines Anrufbeantworters. Nach der Aufzeichnung fallen sie in eine Mulde (a), können von Hand entnommen (b) und sortiert und aufbewahrt werden (c). Durch Ablegen an eine bestimmte Stelle werden Nachrichten abgespielt (d) oder durch Zurücklegen gelöscht (e) (nach [Shaer und Jacob, 2009]).

Dieses als Inspiration für TUIs häufig zitierte Beispiel beschränkt sich auf die Verknüpfung von digitalen Daten (den Anrufen) mit realen Gegenständen, die diese Informationen als Tags oder Tokens repräsentieren. Erst ein „Abspielgerät“ macht die digitale Information zugänglich. Eine Vielzahl von Lösungen kann man zur Gruppe dieser *assoziativen Anwendungen* zählen [Klemmer et al., 2004], bei denen physische Objekte – häufig mit Hilfe von Strichcodes oder elektronischen Tags – als Index oder Hyperlink zu digitalen Informationen und Medien dienen.

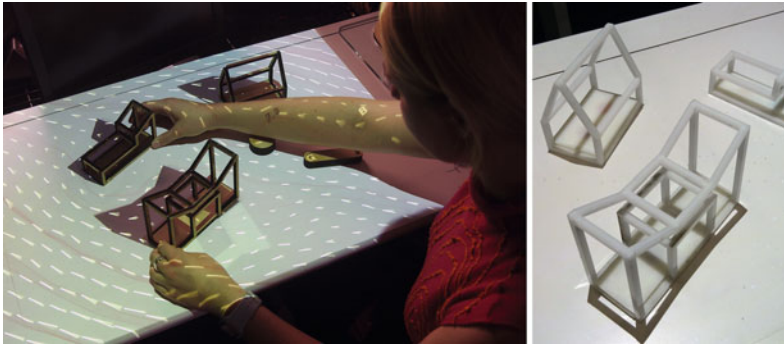


Abb. 12.2: URP, die Urban Planning Workbench, ist ein TUI zur Städteplanung [Underkoffler und Ishii, 1999]. Den abstrahierten Gebäudemodellen werden virtuelle Schatten und Pfeile einer Strömungssimulation hinzugefügt. Im rechten Bild sind die gleichen Tangibles ohne aktiviertes Tischdisplay, d.h. mit realen Schatten, zu sehen (mit freundl. Genehmigung von Hiroshi Ishii, Tangible Media Group | MIT Media Lab).

URP – Ein Stadtplanungswerkzeug. Ein klassisches Beispiel für Tangible User Interfaces ist URP (Urban Planning Workbench). Underkoffler und Ishii [1999] nutzen hier Miniaturmodelle von Gebäuden auf einem Tabletop-Display, um Städteplanungsaufgaben (vgl. auch Abschn. 6.1) und entsprechende Simulationen von Schatten, Lichtreflektionen und Windströmung zu unterstützen (Abb. 12.2). Die Gebäude-Tangibles sind greifbare Repräsentanten virtueller Gebäudemodelle. Statt virtuelle Gebäude in einer Simulation mit der Maus zu verschieben, werden die dreidimensionalen Miniaturgebäude direkt angefasst, positioniert und orientiert. Damit wird eine enge 1:1-Kopplung der materiellen Gebäude-Verkörperungen und der Parameter der zugrundeliegenden Simulation erreicht.

Virtuelle Schatten werden je nach Lage der Gebäude und Stand der virtuellen Sonne angezeigt und verändern sich dynamisch. Auch die Windrichtung und Luftströmung können dynamisch angezeigt werden. Verschiedene weitere Tangibles werden dafür als Parameter-Kontrollwerkzeuge eingesetzt: eine Scheibe zur Festlegung der Windrichtung, eine Uhr mit Zeiger für die Tageszeit (den Stand der Sonne) bzw. ein Tangible, mit dem sich das Gebäudematerial zwischen Glas und Stein ändern lässt.

Damit repräsentieren sowohl die gegenständlichen Gebäude als auch die Werkzeuge digitale Informationen (z. B. die Schattenausmaße) und computerinterne Funktionalität (das Zusammenspiel von Schatten oder der Einfluss von Gebäudematerialien) auf physische, greifbare Weise. Auch Messwerkzeuge für das exakte Ablesen der Windgeschwindigkeit an einer Stelle oder den genauen Abstand zwischen zwei Gebäuden sind Beispiele für abstraktere gegenständliche Werkzeuge, die virtuelle Funktionen zugänglich machen und gleichzeitig parametrisieren (xy -Position).

Die Idee, dass materielle Objekte digitale Schatten werfen, ist eine interessante und in ähnlicher Form häufig genutzte Metapher für Tangibles auf Tabletops. Dabei können diese durch die Form des Gebäudes und den virtuellen Lichteinfall beeinflussten Schatten nicht nur reale simulieren, sondern auch beliebige assoziierte Metadaten, z. B. die Zahl der Leute in einem Gebäude oder die Anzahl von Publikationen, die in dieser Institution geschrieben wurden [Ishii und Ullmer, 1997].

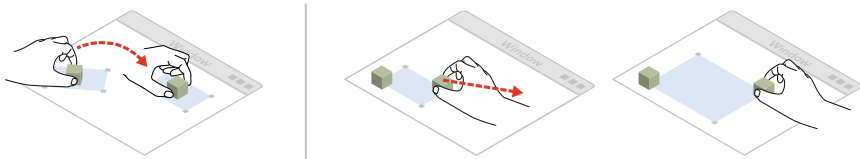


Abb. 12.3: BRICKS dienen als physische Steuerelemente für ein damit assoziiertes digitales Objekt. Die Manipulation per Hand erlaubt ein Rotieren, Verschieben und Skalieren des virtuellen Objekts (nach [Fitzmaurice et al., 1995]).

12.1.2 Was sind Tangible User Interfaces?

Tangible User Interfaces (TUIs) machen von unseren Fähigkeiten Gebrauch, uns in unserer physisch-materiellen Umgebung orientieren zu können und mit realen Gegenständen zu interagieren. TUIs erweitern physische Objekte mit Computerfähigkeiten, indem sie reale Objekte an digitale Daten binden. Ihre Entwicklung Mitte der 1990er Jahre war einer der ersten Versuche innerhalb der Mensch-Computer-Interaktion, die Grenzen zwischen der digitalen Welt und unser physischen Alltagswelt aufzulösen.

Graspable User Interfaces. Fitzmaurice et al. [1995] führten dafür zunächst den Begriff der *Graspable User Interfaces* ein. In seiner Dissertation [Fitzmaurice, 1996] definierte er diesen neuen Interfacetyp sinngemäß wie folgt:

Definition 12.1. Ein *Graspable User Interface* ist etwas physisch Greifbares, das einer virtuellen Funktion zugeordnet ist, wobei das greifbare Objekt als dediziertes funktionales Bedienelement verwendet wird.

Eine enge Verschmelzung virtueller und dinglicher Artefakte im selben Raum findet dadurch statt, dass einige virtuelle Interfaceelemente eine physische Form erhalten und über sogenannte BRICKS (oder Tokens) manipulierbar werden. Als Beispielanwendung präsentieren Fitzmaurice et al. [1995] ein horizontales Tabletop-Display, den ACTIVEDESK, auf dem virtuelle Objekte einer Zeichenanwendung mit kleinen physischen Bausteinen (engl. *Bricks*) auf der Displayoberfläche manipuliert werden können. So lässt sich durch einfaches Auflegen ein Baustein mit einem virtuellen

Objekt assoziieren, wobei die Rotation und Translation des Bausteins durch physische Nutzerinteraktion unmittelbar in einer Drehung oder Verschiebung des virtuellen Objekts resultiert (Abb. 12.3, links). Auch die parallele, beidhändige Handhabung zweier Bausteine wird bereits vorgeschlagen, beispielsweise, um Objekte zu skalieren, wobei ein Stein als Ankerpunkt fungiert (Abb. 12.3, rechts).

Die verbesserte Benutzbarkeit schreiben Fitzmaurice et al. [1995] primär den reichhaltigen Affordances der materiellen Handles im Vergleich zu rein virtuellen Anfassen bei der direkten Manipulation in GUIs zu. Das taktile Feedback und das Bewusstsein des eigenen Körpers gestatten es überdies, sich visuell anderen Aufgaben zuzuwenden, während die Steine gegriffen werden. Interessant ist dabei, dass neben der reinen xy -Position und Orientierung der Steine auf dem Display auch bereits Erweiterungen, wie bestimmte Gesten oder das Umdrehen eines Steins, für komplexere Funktionen vorgeschlagen wurden [Fitzmaurice, 1996].

Tangible User Interfaces. Eine noch umfassendere Vision künftiger Mensch-Computer-Interaktion (MCI) umschreiben HIROSHI ISHII und BRYGG ULLMER dann 1997 mit den sogenannten *Tangible Bits* [Ishii und Ullmer, 1997]. Im Gegensatz zu den „gemalten“ Bits bei GUIs erlauben Tangible Bits durch die enge Kopplung von digitalen Daten an greifbare Objekte ein direktes Anfassen und Manipulieren von Daten und Funktionen. Während dies eine klare Vordergrundaktivität ist, können Tangible Bits aber auch im Hintergrund in Form ambienter Displays wahrnehmbar sein. Ambiente Medien (engl. *Ambient Media*), wie Licht, Klang, Luftbewegung oder fließendes Wasser, die in unsere Umgebung integriert sind, repräsentieren Informationen im Hintergrund und sind peripher wahrnehmbar.

Damit verfolgen ISHII und ULLMER auch WEISERS Vision des *Ubiquitous Computing* [Weiser, 1991], bei der Computer in den Hintergrund gedrängt und schließlich unsichtbar werden. Während diese Vision jedoch noch der GUI-Metapher verhaftet ist, indem sie diese auf mehrere Displays unterschiedlicher Größe (Tab/Pad/Board) überträgt, die in unsere Umgebung integriert sind, wird mit Tangible Bits eher die Vision verfolgt, alltägliche, greifbare Objekte „zum Leben zu erwecken“ und sie an digitale Informationen zu koppeln.

Als neuen Namen für diese Art künftiger Interaktion mit Computern prägten [Ishii und Ullmer, 1997] den Begriff *Tangible User Interface*.

Definition 12.2. *Tangible User Interfaces* augmentieren die reale, physische Welt, indem digitale Informationen an alltägliche materielle Objekte und Umgebungen gebunden werden.

Warum wurde ein neuer Begriff für diese Art von Interaktion geprägt? *Graspable*, wie von Fitzmaurice et al. [1995] verwendet, betont eher das physische Anfassen und Greifen. *Tangible*, vom lateinischen *tangere*: berühren, anfassen abgeleitet, schließt auch das Dingliche ein, das man berühren oder fühlen kann. Darüber hinaus beschreibt es aber auch etwas Substanzielles, was man durch den Verstand und über verschiedene Sinne erfassen und begreifen kann. Damit ist auch explizit die Vision der *Ambient Media* eingeschlossen, auch wenn diese nicht im Vordergrund dieses Buchkapitels steht.

Eines der ersten TUI-Forschungssysteme war der METADESK [Ullmer und Ishii, 1997]. Dafür wurden traditionelle GUI-Elemente wieder in die reale Welt transformiert, das heißt, materielle Entsprechungen gewählt, die auf einem Tisch-Display (Tabletop) zur Interaktion verwendet werden können. Dazu zählten physische Fenster, also aktive Linsen (ein lagebewusstes LCD-Display) und passive Linsen (optisch transparent und in Lupenform) sowie physische Icons (sogenannte *Phicons*), z. B. Glasbausteine, die ein Gebäude repräsentieren. Abb. 12.4 zeigt, wie eng hier noch nach dinglichen Entsprechungen für Widgets aus GUIs gesucht wurde.





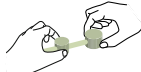





TUI Tangible User Interface					
	Linse	Phicon	Ablage	Phandle	Werkzeug
GUI Graphical User Interface					
	Fenster	Symbol	Menü	Anfasser	Bedienelement

Abb. 12.4: Verschiedene Tangibles bei METADESK als physische Entsprechungen bekannter GUI-Widgets (nach [Ullmer und Ishii, 1997]).

Tangibles. Greifbare physische Objekte, mit denen sich virtuelle Funktionen steuern und interne Zustände sichtbar machen lassen, wurden zunächst als *Bricks*, *Physical Handles* oder *Phicons* bezeichnet. Dabei handelte es sich immer um passive Eingabeobjekte. Später wurde von Greenberg und Fitchett [2001] der Begriff der *Phidgets* geprägt. Dies sind programmierbare Komponenten, die physische Geräte repräsentieren und miteinander vernetzt werden können.

Für alle Hardware-Komponenten – egal ob passiv, mit eingebetteter Elektronik oder Display – verwenden wir hier den Sammelbegriff *Tangibles*, der sich inzwischen etabliert hat. Es handelt sich also ganz allgemein um greifbare Objekte, die als Teil eines TUIs eine Kopplung an digitale Daten oder Funktionen realisieren.

Tangible Interaction. Mit dem Begriff *Tangible Interaction* erweitern Hornecker und Buur [2006] die etwas einschränkende Sicht von *Tangible User Interfaces*. Bei TUIs liegt der Fokus auf greifbaren Objekten zur Manipulation und Steuerung digitaler Daten, die somit den Ausgangspunkt bilden (*datenzentrierte Sicht*). HORNECKER und BUUR adressieren mit ihrer Terminologie jedoch auch vielfältige Anwendungen, z. B. aus Kunst und Design, bei denen nicht Daten, sondern Artefakte aus der realen Welt gesteuert werden können (z. B. Jalousien) oder der Körper als Interaktions- und Ausdrucksmittel eingesetzt wird. Sie beschreiben auch eine handlungs- und interaktionszentrierte *Sichtweise der expressiven Bewegung*, zu der sich Anwendungen zählen lassen, die ausdrucksstarke Körperbewegungen und menschliche Beweglichkeit betonen. In der Medienkunst ist häufig eine *raumzen-*

trierte Sichtweise verbreitet, die z. B. Ausstellungsbesuchern die Interaktion mit einer realen (künstlerisch gestalteten) Umgebung durch Betreten eines Installationsraums oder Körperbewegungen gestattet. Somit betont Tangible Interaction eine auf die User Experience (siehe Abschn. 1.4) bzw. Interaktion mit einem System abzielende Sicht [Shaer und Jacob, 2009]. Dabei ist jedes reale System nicht nur durch physikalische, sondern auch soziale Kontexte definiert. Hornecker und Buur [2006] definieren *Tangible Interaction* sinngemäß wie folgt:

Definition 12.3. *Tangible Interaction* umfasst eine Vielfalt von Systemen und Schnittstellen, die sich auf die physische Einbettung und Repräsentation von Informationen, ihre greifbare Manipulation, die Interaktion mit dem Körper und die Einbettung in reale Räume und Kontexte sowie deren digitale Augmentierung stützen.

12.1.3 Eigenschaften und Kernaspekte von TUIs

Nach einführenden Beispielen und der Erläuterung von Grundbegriffen lässt sich nun genauer auf einige Kernaspekte eingehen, die Tangible User Interfaces ausmachen. Sie schlagen die Brücke zwischen realer und digitaler Welt. Nicht zuletzt durch die umfassende technische und soziale Vernetzung, hochentwickelte mobile Technologien und die Durchdringung unseres Lebens von Computertechnologien sind wir inzwischen Bürger beider Welten. TUIs erlauben das Anfühlen virtueller Informationen durch Hände und Körper. Ishii [2008] gebraucht dazu die Metapher eines Eisberges inmitten des digitalen Ozeans, der angefüllt ist von Informationen, die wir nicht greifen können. Ein Eisberg hingegen ragt dinglich aus der Masse des Wassers heraus und macht die Wassertropfen (Bits) anfassbar und begreifbar.

Grundlegendes Modell. Neben dieser metaphorischen Betrachtung lässt sich auch ein konkreteres Modell für Tangible User Interfaces beschreiben [Ishii, 2008]. Bei GUIs hat sich als grundlegendes Interaktionsmodell das *Model-View-Controller (MVC)* Konzept etabliert. Digitale Informationen werden als computerinternes *Modell* repräsentiert und gespeichert, haben eine spezifische audiovisuelle Repräsentation in der Nutzerschnittstelle (*View*) und können über Bedienelemente, z. B. Widgets, manipuliert werden (*Control*). Bei TUIs lässt sich die View-Komponente hingegen in zwei Bestandteile aufteilen: in einen digital erzeugten audiovisuellen Teil und einen dinglich-greifbaren. Mit der Hinzunahme des taktilen Sinnes wird damit ein größeres sensorisches Spektrum zur Wahrnehmung von digitalen Informationen angesprochen.

Abb. 12.5 (links) zeigt das Modell für grafische Benutzungsschnittstellen. Maus und Bildschirm befinden sich dabei in der gegenständlichen Welt oberhalb des Wassers, das die digitale Welt repräsentiert. Wir nutzen die Maus als indirektes und von der Ausgabe entferntes Eingabegerät, um digitale Informationen zu kontrollieren. Als Resultat erhalten wir eine audiovisuelle, nicht greifbare und zweidimensionale Repräsentation mit dem Bildschirm als Hauptausgabegerät.

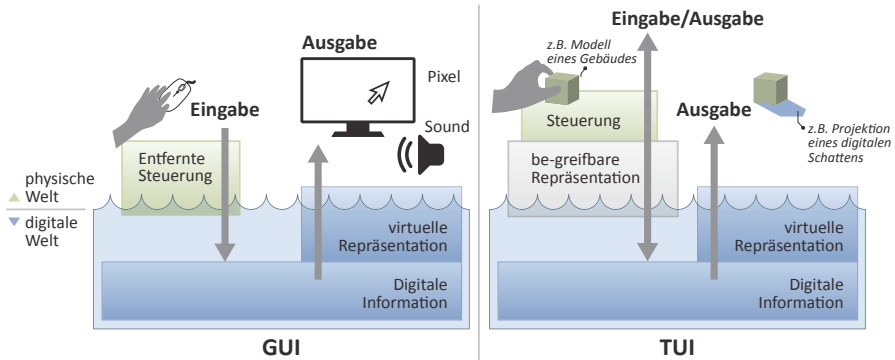


Abb. 12.5: Vergleich der Schnittstellenkonzepte GUI (links) und TUI (rechts) bzgl. Eingabe und Ausgabe in der realen und digitalen Welt (nach [Ishii, 2008]).

Abb. 12.5 (rechts) vergleicht dazu das Modell für TUIs. Auch hier erlauben Tangibles – wie bei der Maus – die Kontrolle digitaler Daten. Allerdings erfolgt diese Kontrolle unmittelbar und direkt, da Eingabe- und Ausgaberaum häufig miteinander verschmolzen sind. Neben einer nicht greifbaren Präsentation von Informationen über visuelle Anzeigen, wie z. B. die virtuellen Schatten auf dem Tisch-Display im URP-Projekt, kommt hier auf der Präsentationsseite jedoch noch die dingliche Komponente hinzu. So zeigen die Miniaturgebäude auf dem Planungstisch bei URP die konkrete Position und Ausrichtung der Gebäude allein durch ihre physische Präsenz an. Diese View-Komponente würde somit auch weiter bestehen, selbst wenn der Strom ausgeschaltet wäre. Die virtuelle Viewkomponente ist jedoch deshalb so wesentlich, weil sie eine einfache und völlig flexible Ergänzung der in Gestalt und Materialität unflexiblen Tangibles erlaubt. Diese können typischerweise nur wenige Parameter darstellen (z. B. Position und Orientierung), während eine digitale Anzeige nahezu beliebige Informationen sichtbar machen kann.

In Abb. 12.5 wird der wesentliche Unterschied klar sichtbar: GUIs unterscheiden deutlich zwischen grafischer Präsentation und entfernter Steuerung, während TUIs physische Repräsentation und Kontrolle integrieren.

Eigenschaften. Folgende grundsätzliche Eigenschaften lassen sich für Tangible User Interfaces benennen (siehe auch [Fitzmaurice et al., 1995], [O'Malley und Stanton Fraser, 2004] und [Ishii, 2008]).

- Bei TUIs werden materielle, greifbare Objekte an zugrunde liegende digitale Informationen bzw. computerinterne Modelle gekoppelt, indem sie Teile davon – z. B. Systemzustände – dinglich repräsentieren. Tangibles externalisieren damit vormals interne Computerrepräsentationen und machen virtuelle Zustände sichtbar und erfahrbare. Dadurch entsteht in unserer Wahrnehmung eine enge Kopplung zwischen physischen und virtuellen Bestandteilen.
- Die Tangibles als greifbare Repräsentanten digitaler Informationen werden bei TUIs gleichzeitig auch zur direkten und unmittelbaren Steuerung bzw. Kon-

trolle digitaler Interfaceelemente und Objekte verwendet. Dabei werden die besonderen motorischen Fähigkeiten im alltäglichen Umgang mit realen Objekten und ihrer Manipulation genutzt.

- TUIs nutzen unsere hochentwickelten Fähigkeiten im räumlichen Denken, indem sie direkte räumliche Abbildungen zwischen digitalen und physischen Räumen anbieten. Damit dienen sie meistens einem speziellen Zweck (z. B. die Gebäude bei URP) im Gegensatz zur Maus, die ein generisches Eingabegerät für GUIs ist.
- TUIs erlauben mehrere parallele Eingaben und dadurch einen größeren Ausdrucksreichtum bei der Interaktion mit Computern. Das kann die beidhändige Interaktion eines einzelnen Benutzers sein, aber auch die Interaktion und Kollaboration mehrerer Personen.

Parallele Feedback-Schleifen. Tangibles als digital erweiterte physische Objekte sind häufig Ein- und Ausgabemedium zugleich. Damit bieten sie Nutzern zwei parallele Feedback-Schleifen, die über das klassische Feedback bei grafischen Benutzungsschnittstellen hinausgehen (Abbildung 12.6). Bei GUIs sind wir allein auf die digitale Feedback-Schleife angewiesen, d. h. auf die Reaktionen des Computers, die uns auf einem Bildschirm nach einer gewissen Verzögerung angezeigt werden. Bei Tangibles geht dem ein taktiles Feedback voraus, das durch direktes Anfassen des Tangibles und Verschieben oder Drehen auf einem Tabletop bewirkt wird. Allerdings knüpft sich daran die Gefahr von Latenzen, da ein verzögert angezeigtes digitales Feedback in der 2. Schleife als frustrierend empfunden wird. Das kann ein zu spät gezeichneter digitaler Schatten sein oder die Aktualisierung des virtuellen Wertes, den man durch Drehen des Tangibles eingestellt hat.

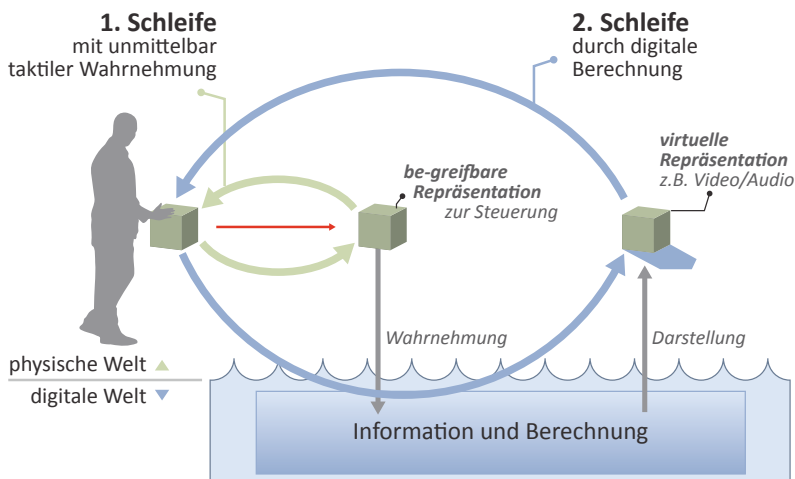


Abb. 12.6: Feedback-Schleifen bei TUIs (nach [Ishii, 2008]). Während bei GUIs nur die 2. Feedback-Schleife wirksam wird (blau), geht ihr bei TUIs die unmittelbar taktile, körperlich wahrgenommene Feedback-Schleife voraus (grün).

12.1.4 Historie und Entwicklung

Da das Gebiet der Tangible User Interfaces nun seit ca. 20 Jahren ein aktives Forschungsinteresse hervorruft und kommerzielle Anwendungen bereits existieren, lohnt sich ein kurzer Blick auf die Geschichte dieses Bereiches.

Slot Machine. Ein wichtiger Motor für die Entwicklung von Tangibles waren die Forschungen zu greifbaren Schnittstellen für Programmierung und Lernanwendungen seit den 1960er Jahren, aus denen später der Begriff *Tangible Programming* hervorging. Daher widmet sich der Abschn. 12.2.4 diesem Thema. Elektronische Spielzeuge sollten Kindern helfen, durch freies Spielen zu verbessertem Denken und Lernen zu gelangen [McNerney, 2004]. Aus der Forschung des MIT Artificial Intelligence Laboratory ging auch die erste Arbeit hervor, die sich als Tangible User Interface beschreiben lässt. RADIA PERLMAN machte sich Gedanken dazu, wie ein User Interface aussehen müsste, um Kindern die einfache Eingabe von Logo-Sprachkommandos zu gestatten. Ihr zweiter Prototyp, die SLOT MACHINE, bestand aus drei länglichen Kästen, in die sich jeweils mehrere Plastikkarten als Sequenz stecken ließen. Auf den Karten waren konkrete Logo-Sprachkonstrukte bzw. Kommandos bildlich dargestellt. Ein Knopf am Anfang der Steckleiste löste die Ausführung der Kommandos aus, wobei im jeweiligen Verarbeitungsschritt eine Lampe unter der zugehörigen Karte leuchtete. Dadurch, dass die drei Leisten unterschiedlich gefärbt waren, konnten auch Prozeduraufrufe und sogar einfache Rekursion programmiert werden, indem durch eine farbige Karte zur korrespondierenden Leiste gesprungen und die dortigen Kommandos sequenziell ausgeführt wurden. Danach erfolgte die Rückkehr zur aufrufenden Leiste.

DigitalDesk. Die einflussreiche Arbeit DIGITALDESK [Wellner, 1991, 1993] haben wir bereits im Kapitel 10 im Abschn. 10.1.3 vorgestellt. Der hybride Schreibtisch verschmilzt physische und elektronische Artefakte. Bereits 1991 weist Wellner darauf hin, dass mit dem DIGITALDESK statt der „direkten“ Manipulation mit der Maus nun eine *tangible* Manipulation mit dem Finger möglich ist. Damit kann diese Arbeit auch als ein Vorläufer von TUIs, insbesondere für interaktive Oberflächen, betrachtet werden.

Back to the real world. Dass MCI-Forscher Anfang der 1990er Jahre auf der Suche nach Alternativen zur Interaktion mit typischen Schreibtisch-Computern waren, wird auch in einer Spezialausgabe der Communications of the ACM von 1993 deutlich, die den Titel „Computer-augmented Environments: Back to the Real World“ trug [Wellner et al., 1993]. Shaer und Jacob [2009] schreiben später darüber, dass Nutzer nicht dazu gezwungen werden sollten, eine virtuelle Welt zu betreten, sondern stattdessen die reale Welt mit digitaler Funktionalität erweitert werden sollte.

Damit wird nicht nur die fehlende Natürlichkeit und Isolation von Nutzern bei der Bedienung klassischer PCs kritisiert, sondern auch die *Virtuelle Realität* (VR, siehe Abschn. 6.2.3). Bereits WEISER wies darauf hin, dass VR einen großen Ap-

parat benötigt, um die reale Welt zu simulieren, statt sie digital zu erweitern und zu verbessern [Weiser, 1991]. Möglicherweise ist dies auch der Grund, warum VR trotz der längsten Entwicklungsgeschichte im Bereich Post-WIMP UIs bisher keine Massentauglichkeit erreichen konnte.

Wellner et al. [1993] argumentieren stattdessen für eine Erweiterung der Welt im Sinne einer augmentierten Realität (AR, siehe Abschn. 6.2.3) und überall nutzbarer Computerfunktionalität. Tangible UIs entwickelten sich aus diesem Trend, obwohl es noch eine Weile dauerte, bis daraus ein eigener Interaktionsstil wurde [Shaer und Jacob, 2009].

Zusatzinformation: Passive Interface-Requisiten. Die beidhändige Nutzung realistischer Tangibles im Bereich 3D-Interaktion für medizinische Visualisierungen wurde bereits 1994 von Hinckley et al. [1994] vorgeschlagen. Dingliche Requisiten, darunter ein Puppenkopf und eine kleine Glasscheibe, werden von Nutzern in der Hand gehalten und im Raum zueinander bewegt, um 3D-Modelle zu steuern. So lassen sich z. B. auf sehr unmittelbare Weise Schnitte durch das Volumen eines Schichtbilddatensatzes eines menschlichen Kopfes legen. Die beidhändige Interaktion und das taktile und kinästhetische Feedback ermöglichen dabei ein intuitives Festlegen von Schnittebenen (Kinästhesie ist die Fähigkeit, Bewegungen der Körperteile unbewusst zu kontrollieren und zu steuern).

Allerdings bezieht sich die enge Kopplung von realweltlichen Tangibles und Aufgaben hier nur auf den Eingaberaum, der von der visuellen Ausgabe nach wie vor getrennt ist. Spindler et al. [2009] schlagen 15 Jahre später eine direkte Verschmelzung von Ein- und Ausgaberaum durch lagebewusste magische Linsen vor, die vom Nutzer durch ein gedachtes Volumen bewegt werden, um einzelne Schichten eines medizinischen Datensatzes unmittelbar im Raum angezeigt zu bekommen.

Graspable & Tangible User Interfaces. Maßgebliche Eckpfeiler wurden mit dem Konzept der *Graspable User Interfaces* [Fitzmaurice et al., 1995] und der umfassenderen Vision der *Tangible Bits* [Ishii und Ullmer, 1997] bereits im Abschn. 12.1.2 diskutiert. Während HIROSHI ISHII und die Tangible Media Group (siehe Kasten) den Designraum von TUIs mit ihren Projekten explorierten, widmeten sich in den 1990er Jahren auch andere Forschergruppen weltweit diesem aufstrebenden Forschungsgebiet. Beispiele sind die von HIDEYUKI SUZUKI und HIROSHI KATO entwickelten ALGOBLOCKS [Suzuki und Kato, 1993, 1995] oder das von Fjeld et al. [1998] vorgestellte BUILD-IT, ein Design- und Planungswerkzeug im Bereich Architektur, das mit seinen greifbaren *interaction handlers* konzeptionell eng an das Konzept der Graspable UIs angelehnt ist.



Abb. 12.7: Hiroshi Ishii, Professor am MIT Media Lab und Leiter der Tangible Media Group. Rechts ein Blick in das Labor dieser Arbeitsgruppe (mit freundl. Genehmigung von Hiroshi Ishii).

Die Tangible Media Group. Zur Etablierung von Tangible User Interface innerhalb der Mensch-Computer-Interaktion hat maßgeblich HIROSHI ISHII mit seiner *Tangible Media Group* am Massachusetts Institute of Technology (MIT) Media Laboratory beigetragen. Ishii (Abb. 12.7) gründete seine Arbeitsgruppe 1995 und verfolgt mit ihr seitdem die Vision einer nahtlosen Interaktion zwischen Menschen, ihren physischen Umgebungen und digitalen Informationen. Dabei will er die „gemalten Bits“ von GUIs in „greifbare Bits“ verwandeln, indem digitale Information eine physische Gestalt erhält.

Inspiriert wurde Ishii bereits als kleines Kind vom Abakus² und dessen tatsächlicher Begreifbarkeit der Ziffern. Durch seine Affordances war der Abakus für ihn aber mehr als ein Rechengerät, es war zugleich Musikinstrument, Spielzeugzug oder ein Gerät zum Kratzen des Rückens. Geräusche und die fühlbare Interaktion mit diesem Gerät faszinieren ihn seitdem [Ishii, 2008].

Neben der vielzitierten Hauptveröffentlichung von Ishii und Ullmer [1997], in der die Begriffe *Tangible User Interface* und *Ambient Space* geprägt sowie die Vision der Tangible Bits skizziert wurden, hat sich die Tangible Media Group vor allem mit einer Vielzahl von Projekten hervor getan, die den reichen Designraum der TUIs ausleuchten und das Feld immer wieder vorangebracht haben. Eine Auflistung der zahlreichen spannenden Projekte kann unter <http://tangible.media.mit.edu/projects/> gefunden werden. Das Stöbern in diesem Fundus, das Anschauen der Videos und die Lektüre der Artikel können nur empfohlen werden.

² Der Abakus ist ein mehr als 3000 Jahre altes mechanisches Rechenhilfsmittel, meist in Form eines Rechenbretts oder eines Holzrahmens mit z. B. 10 dünnen Stangen übereinander, auf denen sich verschiebbare Holzkugeln befinden. Durch einiges Training und hohe Fingerfertigkeit lassen sich Additionen und Subtraktionen schneller als mit einem Taschenrechner ausführen.

Zunehmende Reife des Forschungsgebietes. Der MCI-Forschungsbereich der Tangible User Interfaces ist inzwischen etabliert und sehr dynamisch. Seit knapp 20 Jahren wird in diesem Bereich geforscht, und es findet dabei eine typische und häufig bei modernen Formen der Mensch-Computer-Interaktion zu beobachtende Entwicklung statt: Zunächst werden Visionen eher theoretisch skizziert (siehe Abschn. 12.1.2), dann folgt eine Vielzahl von freien, häufig technikgetriebenen Forschungsarbeiten, die den Designraum ausloten und interessante Einzellösungen vorstellen (siehe Abschn. 12.2). Erst dann werden technische Frameworks und Toolkits entwickelt, die eine einfachere technische Realisierung und schnelleres Prototyping gestatten (z. B. das Software-Framework *reactIVision* [Kaltenbrunner und Bencina, 2007]³ oder die Hardware-Prototyping Toolkits *Phidgets* [Greenberg und Fitchett, 2001]⁴ und *Arduino*⁵ (siehe auch Abschn. 3.7.4).

Parallel dazu setzt dann eine Phase der theoretischen Reflektion, der Systematisierung, Klassifikation und Modellbildung ein (siehe Abschn. 12.3). Auch die systematischere Durchführung von Nutzerstudien für den neuen Interaktionsstil rückt dann mehr in den Fokus. Inzwischen sind auch erste kommerzielle Lösungen am Markt zu finden, z. B. die *SIFTEO CUBES*⁶ (siehe Abschn. 12.2.6). Ein wichtiger Faktor, der die weitere Entwicklung des Gebietes befeuern könnte, ist die Miniaturisierung elektronischer und mechatronischer Komponenten und die Einbettung von Computern in technische Produkte, Alltagsobjekte und unsere Umgebungen.

12.2 Anwendungsklassen und -beispiele

Tangible User Interfaces üben eine unmittelbare Anziehungskraft auf sehr verschiedenartige Gruppen von Benutzern aus [Shaer und Jacob, 2009]. Sicher ist das unseren Alltagserfahrungen mit Gegenständen geschuldet, die wir oft auch auf spielerische Weise gewonnen haben. So liegt es nahe, dass inzwischen ein großes Spektrum von TUI-Anwendungen entwickelt wurde, aus dem hier nur einige Beispiele vorgestellt werden können. Das Ziel ist also nicht Vollständigkeit, sondern, einen Eindruck von der Vielfalt des Gebietes zu vermitteln und wichtige Anwendungsklassen zu benennen. Shaer und Hornecker [2010] widmen sich im vierten Kapitel ihrer Monografie ausführlich verschiedensten Anwendungsdomänen. Sie unterscheiden dabei TUIs im Bereich des Lernens, der Planung und Problemlösung, Programmierung und Simulation, Informationsvisualisierung, des Tangible Programmings, der Unterhaltungsbranche, Musik und Kunstperformance, sozialer Kommunikation sowie dinglicher Erinnerungshilfen. Diese Anwendungsgebiete, wie auch die in den folgenden Abschnitten vorgestellten, sind nicht scharf voneinander abzugrenzen, sondern überlappen sich teilweise und sind nur als grobe Einteilung zu verstehen.

³ <http://reactivision.sourceforge.net/>

⁴ <http://www.phidgets.com/>

⁵ <http://www.arduino.cc/>, Elektronische Open Source Prototyping Plattform Arduino

⁶ <https://www.sifteo.com/>

12.2.1 Architektur-, Raum- und Landschaftsplanung

Mit URP [Underkoffler und Ishii, 1999] als einführendes Beispiel im Abschn. 12.1.1 haben wir bereits ein frühes Beispiel in diesem Anwendungsbereich kennengelernt. Zu den verschiedenen Nachfolgearbeiten zählt z. B. ein System zur Städteplanung von Dalsgaard und Halskov [2014], bei dem perspektivische Projektionen auf die Gebäude-Tangibles Flexibilität im Aussehen und hohen Realismus ermöglichen (Abb. 12.8). Anwendungen in diesem Bereich sind gemein, dass sie Planungsaufgaben unterstützen, ob nun für Städte, Landschaften oder Innenarchitektur. Die Verwendung von greifbaren Objekten, häufig Miniaturdarstellungen von Planungsgegenständen, auf einem (interaktiven) Tisch ist naheliegend für diese Domäne. Seit weit mehr als hundert Jahren werden maßstabsgetreue Planungstische für Simulationen und strategische Entscheidungen genutzt.



Abb. 12.8: Im Projekt *Tangible Urban Planning* [Dalsgaard und Halskov, 2014] werden weiße Tangibles auf einem Tabletop durch Projektion mittels zweier Projektoren in Gebäude für Stadtplanungszwecke verwandelt (Foto Jonas Petersen, CAVI, Universität Aarhus, mit freundl. Genehmigung).

Drei wichtige Aspekte von TUIs prädestinieren sie für Planung und Problemlösung [Shaer und Hornecker, 2010]:

- TUIs unterstützen *erkenntnisfördernde Handlungen*. Das sind solche – nicht an einen bestimmten Zweck gebundene – Handhabungen von Gegenständen, die ein besseres Verständnis des Aufgabenkontextes ermöglichen. Das kann ein unbeabsichtigtes in-die-Hand-Nehmen eines Objektes sein und das Drehen oder Abwägen in den Händen, bevor es auf einem Tisch platziert wird.

- *Physikalische Beschränkungen (Constraints)* können den Lösungsraum sinnvoll beschränken und eine Interaktionssyntax kommunizieren, die das schnelle Erlernen befördert. Ein einfaches Beispiel dafür sind Puzzleteile, die sich nur auf eine bestimmte Weise zusammensetzen lassen.
- Probleme lassen sich in be-greifbarer, anfassbarer Form *physisch repräsentieren*. Das ist besonders bei räumlichen oder geometrischen Anwendungsdomänen der Fall, bei denen z. B. die Anordnung von Objekten auf einem Tisch – seien es Zinnsoldaten für eine militärische Simulation oder Hausminiaturen wie bei URP – eine sehr unmittelbare Repräsentation eines Problems darstellen.

BUILD-IT. Mit BUILD-IT stellten Fjeld et al. [1998] ein kollaboratives Planungswerkzeug für den Entwurf von Fertigungsstraßen und zur Fabrikplanung vor. Planner sitzen um einen Tisch mit Projektion von oben, während orthogonal dazu an der Wand eine 3D-Ansicht des Planungsstandes mit einem zweiten Projektor dargestellt wird. Konzeptionell noch nahe an den graspable UIs [Fitzmaurice et al., 1995] angelehnt, werden sogenannte *interaction handlers* zur Manipulation von virtuell auf dem Tisch angezeigten Objekten genutzt. Dies sind kleine Bausteine, mit denen durch Ablegen auf dem Tisch Objekte selektiert werden können. Diese lassen sich durch Bewegen des Handlers verschieben und rotieren, und ihre Zielposition kann durch kurzes Abdecken des Bausteins mit der Hand festgelegt werden. Auch beidhändige bzw. kollaborative Interaktionen mit den Handlern werden unterstützt, ebenso wie Menüs und diverse Kamera- bzw. Ansichtseinstellungen.

SandScape, Illuminating Clay, GranulatSynthese. Während viele TUIs auf starren Tangibles und Tabletops basieren, gestatten optische Trackingtechnologien in Kombination mit Projektionen eine neue Klasse von TUIs. Dabei können Materialien ohne fixe Form zum Einsatz kommen, wie Sand, Ton oder Granulat. Ishii et al. [2004] sprechen von *Continuous Tangible Interfaces*. Anwendung finden sie überall da, wo mit organischen, weichen oder amorphen Formen gearbeitet werden muss, z. B. in der Bildhauerei oder Landschaftsplanung. SANDSCAPE [Ishii et al., 2004] ist ein organisches TUI, das echten Sand und Computersimulationen kombiniert. Durch Projektion der Simulation eines Landschaftsmodells auf einen Sandkasten, der das Terrain repräsentiert, können Landschaften geplant und verstanden werden. Der Sand kann mit der Hand manipuliert werden, und Bildverarbeitungstechniken vermessen die entstehende Höhenkarte (Abb. 12.9).

ILLUMINATING CLAY [Piper et al., 2002] nutzt mit einem Laserscanner eine noch präzisere Technik zur Erfassung der Form eines realen Tonmodells. Auch hier kann der Zweck ein Landschaftsmodell sein (das jedoch weniger flüchtig und forminstabil ist), und es werden ebenfalls Bilder auf den Ton projiziert (Abb. 12.9). Auch Gegenstände aus beliebigen Materialien lassen sich hinzufügen, womit auf einfache Weise auch komplexe Topografien geschaffen werden können. Wie bei BUILD-IT [Fjeld et al., 1998] erlaubt ein vertikales Display die dreidimensionale Ansicht des Resultats aus menschlicher Perspektive.

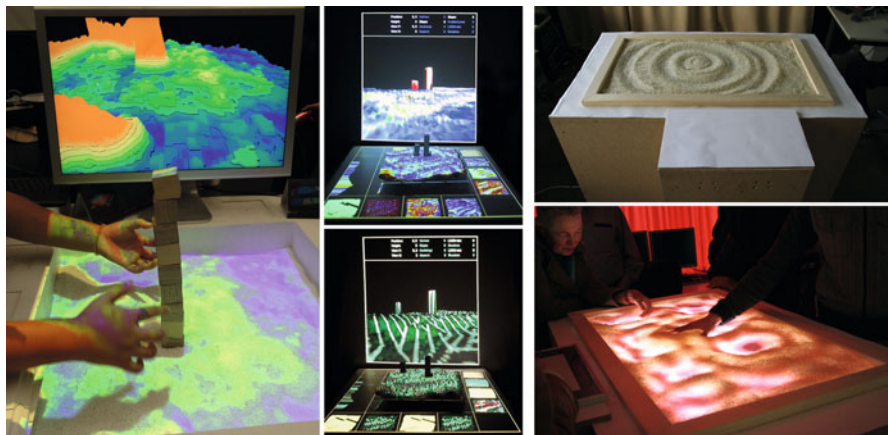


Abb. 12.9: Nutzung von Materialien wie Sand und Ton als TUIs in den Projekten SANDSCAPE [Ishii et al., 2004] (links) und ILLUMINATING CLAY [Piper et al., 2002] (Mitte). Oben ist die Simulation einer Geländeneigung zu sehen, unten die eines Entwässerungssystems – beide werden auf das Tonmodell des Terrains projiziert (mit freundl. Genehmigung von Hiroshi Ishii, Tangible Media Group | MIT Media Lab). Rechts das Projekt GRANULATSYNTHESE [Beckhaus et al., 2008] als eher künstlerisch-meditative Auseinandersetzung mit haptisch erfahrbaren „Landschaften“ (mit freundl. Genehmigung von Steffi Beckhaus).

Im Projekt GRANULATSYNTHESE nutzen Beckhaus et al. [2008] ebenfalls leicht verformbare Materialien für eine künstlerische Exploration einer haptisch erfahrbaren Landschaft (siehe Abb. 12.9). Durchsichtiges Granulat wird in einem Kasten von unten angestrahlt und kann von Besuchern der Installation mit den Händen verändert werden. Als Reaktion werden visuelle Inhalte projiziert und ausgewählte Sounds abgespielt. Die dreidimensionale Oberfläche, also die „Berge“ und „Täler“ in der Granulatschicht, wird durch eine Infrarotkamera unter dem Tisch erfasst. Das System ist natürlich kein Planungswerkzeug, ist aber in der Tradition von SANDSCAPE und ILLUMINATING CLAY zu sehen. Es erlaubt ein fast meditatives Interagieren mit einer um audiovisuelle Inhalte erweiterten veränderlichen Landschaft.

12.2.2 Informationsvisualisierung, -suche und -filterung

Wie im ersten Band dieses Buchs in den Kapiteln 11 und 12 zum Thema Interaktive Informationsvisualisierung deutlich wurde, erfordern Visualisierungen typischerweise die Einstellung vielfältiger Parameter. Diese können die geeignete Auswahl der Daten betreffen, aber auch deren Darstellung und Exploration. TUIs eignen sich für interaktive Informationsvisualisierungen, weil sie abstrakte Zustände und Parameter erfahrbar machen können und eine zweiseitige oder auch kollaborative In-

teraktion mit Visualisierungen unterstützen. Eine typische Anwendung von TUIs in diesem Bereich ist die Suche und Filterung von Informationen.

Tangible Query Interfaces. Ein System zur Formulierung von Anfragen an relationale Datenbanken mit Hilfe von greifbar gemachten Parametern wurde von Ullmer et al. [2003, 2005] mit dem „Tangible Query Interfaces“ vorgestellt. Verschiedene Arten materieller Tokens repräsentieren Anfrageparameter und Datenmengen. Sie können in einer Ablage unterhalb des für die Ergebnisvisualisierung vorgesehenen Bildschirms platziert und dann manipuliert werden. Durch das Ablegen z. B. eines runden Tangibles in eine dafür vorgesehene Öffnung wird ein bestimmter Anfrageparameter aktiv geschaltet und mit der Datenvisualisierung assoziiert (Abb. 12.10, links). Das kann z. B. die Festlegung der Achse eines Scatterplots (siehe Band I, Abschn. 11.2.1) sein. Die Datenmenge kann durch Rotieren des Tangibles und daraus resultierender Parameteränderung eingeschränkt werden.

Auch mehrere Parameter lassen sich gleichzeitig einstellen. Neben Drehrad-Tangibles stehen dafür auch reale Doppel-Schieberegler zur Verfügung, Tangibles mit einem eigenen Display, mit denen sich Von-Bis-Bereiche von Parametern einstellen lassen (Abb. 12.10, rechts). Über die Position der Tangibles zueinander innerhalb der Ablageschiene lassen sich auch logische Verknüpfungen von Parametern herstellen. Angrenzende Tangibles sind UND-verknüpft, separierende Abstände signalisieren eine ODER-Verknüpfung. Damit bieten sowohl die Tangibles selbst als auch die Ablageschiene wichtige physische Beschränkungen (engl. *Constraints*). Diese erleichtern die Manipulation von Anfrageparametern durch geringere visuelle Aufmerksamkeit, Ausnutzung kinästhetischer Wahrnehmung und gutes haptisches Feedback. Damit zählen die Tangible Query Interfaces zur Gruppe der *Token+Constraint TUIs* [Ullmer et al., 2005] (Abschn. 12.3.1).

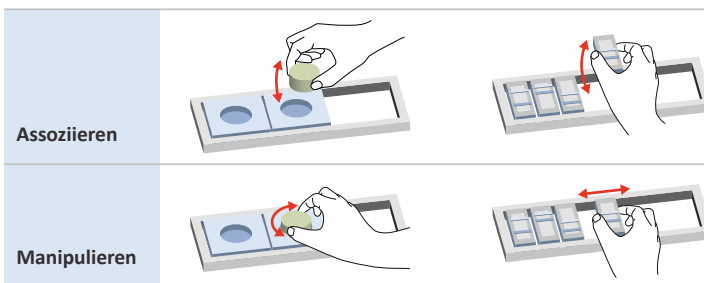


Abb. 12.10: Ablage für Tangibles zur Einstellung von Parametern bei den Tangible Query Interfaces (nach [Ullmer et al., 2003]). Durch Ablegen in einer Schiene werden die Parameter mit der separat angezeigten Visualisierung assoziiert, danach können sie durch Drehen, Einstellen der Bereichsschieberegler oder Bewegung in der Schiene manipuliert werden.

Tangible Remote Controllers. Fast zehn Jahre später greift die Arbeit von Jansen et al. [2012] das Thema dynamischer Anfragen bei der visuellen Datenexploration wieder auf. Hierbei kommt eine hochaufgelöste Display-Wand zum Einsatz, für die Parametereinstellungen mit Hilfe von TANGIBLE REMOTE CONTROLLERS vorgenommen werden können. Das sind kleine physische Eingabegeräte, die GUI-Elementen nachempfunden sind, z. B. einfache Schieberegler oder Bereichsregler (vgl. auch die in Abb. 12.24 auf S. 676 dargestellten Widgets). Diese greifbaren, physischen Widgets aus Akryl werden auf einem mobilen Tablet festgesaugt, das ein Nutzer in der Hand hält. Ihre beweglichen Teile können nun zur Kontrolle verschiedenartiger Parameter für die Datenexploration ohne Augenkontakt zum Tablet bedient werden. Damit lassen sich die auf dem Wand-Display angezeigten Resultate fokussieren, ohne einen Wechsel der Aufmerksamkeit zu erfordern.

Facet-Streams. Während die Tangible Query Interfaces einen brauchbaren Ansatz für einfache Datenbankabfragen eines einzelnen Benutzers darstellen, stellen sie jedoch eine relativ komplexe und beschränkte technische Lösung dar, die in einer Studie [Ullmer et al., 2003] auch keinen Performanzvorteil gegenüber grafischen Benutzungsschnittstellen erbrachte. Einen flexibleren Ansatz zur kollaborativen Suche in größeren Datenbeständen stellten Jetter et al. [2011] mit dem Tabletop-System FACET-STREAMS vor (Abb. 12.11). Mehrere Benutzer können mit Hilfe von durchsichtigen Tokens, die Anfrageparameter repräsentieren (bzw. Facetten

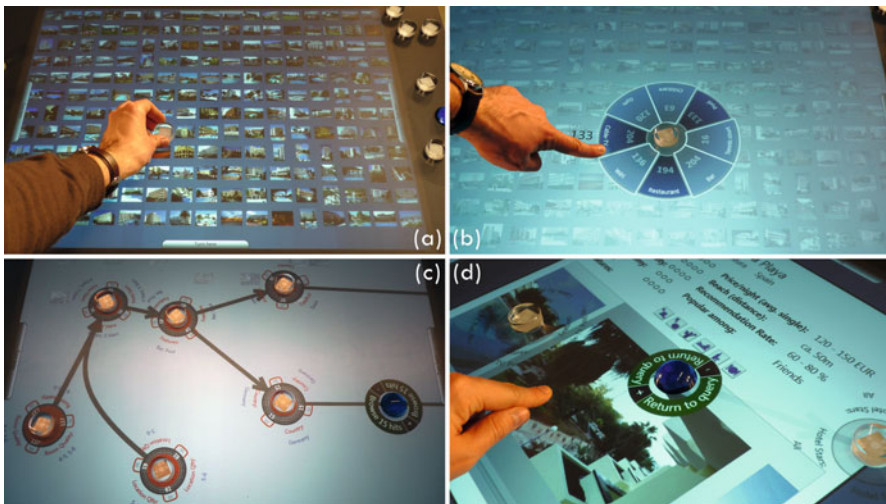


Abb. 12.11: Bei FACET-STREAMS [Jetter et al., 2011] kann eine kollaborative Datensuche durch Platzierung eines Tokens auf die gesamte Datenmenge initiiert werden (a). Tokens repräsentieren die Elemente einer Anfrage, und Facetten können über Touch-Bedienung ausgewählt werden (b). Aufbau verschiedener Suchgraphen (c). Ein Resultat-Token (blau) erlaubt die Anzeige von Zwischenergebnissen (d) (mit freundl. Genehmigung von Harald Reiterer, Universität Konstanz).

zur Einschränkung des Suchraums, vgl. Band I, S. 446), Such-Graphen gemäß der Filter/Fluss-Metapher [Young und Shneiderman, 1993] konstruieren. Interessant ist die durch die dynamische Tabletop-Anzeige beliebig mögliche Zuordnung von Facetten bzw. Suchkriterien zu jedem Token. Da durch das hybride System neben Tangibles auch Multitouch-Interaktion genutzt werden kann, lassen sich Facetten leicht per Touch aus einem um das Token herum angezeigten Menü auswählen. Auch die konkrete Auswahl von Facettenwerten, z. B. einem Preisbereich für ein Produkt, erfolgt allein durch Touch-Eingabe. Damit dienen die Tangibles hier ausschließlich als Tokens und nicht der Wertemanipulation.

Ihre Position auf dem Tabletop, zusammen mit der visuellen Linienanzeige, symbolisiert jedoch auch die Verknüpfung von Facetten zu Anfrage-Strömen (*Streams*), wobei UND- sowie ODER-Verknüpfungen genutzt werden können. Damit ist FACET-STREAMS ein Beispiel für die TUI-Kategorie *Interaktive Oberflächen* (Abschn. 12.3.1). Gelungen ist die Umsetzung des Prinzips *Externalisierung*, d. h. einem visuellen und/oder physischen Arbeitsraum, der von mehreren Benutzern geteilt wird, um Kommunikation, Abstimmungen und gemeinsames Verständnis bei kollaborativem Arbeiten zu befördern [Hornecker und Buur, 2006].

Stackables. Ebenfalls der kollaborativen, facettenbasierten Informationssuche und -exploration dient das TUI STACKABLES [Klum et al., 2012, Isenberg et al., 2012]. Während die Tangibles bei den Tangible Query Interfaces unterhalb der Resultatvisualisierung angeordnet waren und bei FACET-STREAMS direkt auf dem Tabletop platziert werden, sind Ergebnisanzeige und Anfrage-Interface vollständig entkoppelt. Ein Stackable ist ein autonom funktionierendes, stapelbares Tangible, das jeweils ein Display und jeweils ein darüber und darunter angeordnetes Drehrad besitzt (Abb. 12.12). Diese können genutzt werden, um zunächst eine Facette aus vielen möglichen auszuwählen und sie mit dem konkreten Tangible zu assoziieren. Danach dienen die drehbaren Räder der schnellen Einstellung von Facettenwerten bzw. Wertebereichen.

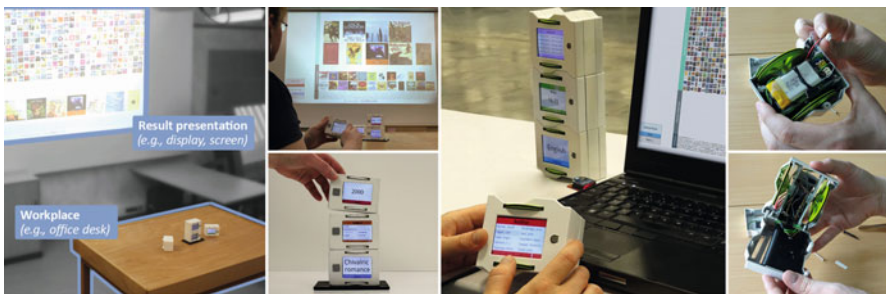


Abb. 12.12: STACKABLES als Repräsentanten von Metadatenfacetten können durch Einstellräder manipuliert und auf einem Tisch gestapelt werden, um Anfragen zu formulieren. Die Resultatmenge – hier eine Kollektion von Büchern – wird entsprechend aktualisiert und auf einem entfernten Display angezeigt [Klum et al., 2012, Isenberg et al., 2012].

Durch Stapeln der Tangibles lassen sich komplexere Anfragen formulieren, wobei neben UND-Verknüpfungen auch die Negation durch Umdrehen der Stackables unterstützt wird. Dabei suggeriert deren Form die Möglichkeit des Stapelns. Die Visualisierung der jeweiligen Ergebnismenge erfolgt auf einem entfernten Display, z. B. einer Wandprojektion. Ähnlich zu FACET-STREAMS werden verschiedene Phasen und Formen kollaborativer Informationssuche unterstützt. Die genutzte Metapher des Stapelns, die an Bausteine erinnert, legt nahe, dieses Systems zur TUI-Gruppe der sogenannten *Constructive Assemblies* zu zählen (Abschn. 12.3.1).

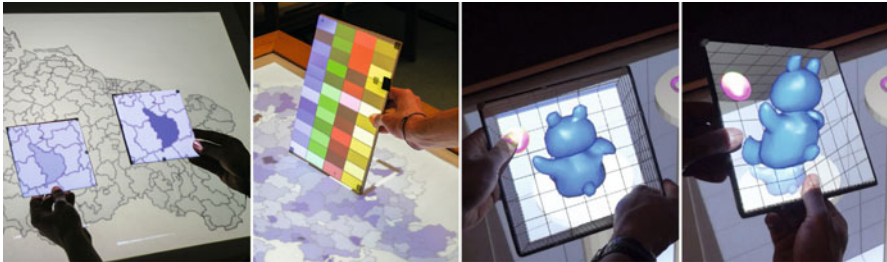


Abb. 12.13: TANGIBLE VIEWS sind in der Hand gehaltene und oberhalb eines Tabletops bewegte Linsen, die das Betrachten und Manipulieren verschiedener Ansichten bzw. Parameter für Informationsvisualisierungen erlauben [Spindler et al., 2010b]. TANGIBLE WINDOWS gestatten die Anzeige und Manipulation dreidimensionaler Inhalte, wobei eine an die Kopfhaltung des Nutzers angepasste Perspektive zum Rendern der Szene verwendet wird [Spindler et al., 2012a].

Tangible Displays. Häufig besitzen Tangibles keine eigene Anzeige, sondern werden als Objekte auf horizontalen Displays eingesetzt. Einen anderen Ansatz verwenden die TANGIBLE VIEWS [Spindler et al., 2010b] oder TANGIBLE WINDOWS [Spindler et al., 2012a]. Dabei werden kleine, lagebewusste Displays mit der Hand durch den Raum bewegt. Je nach Position und Orientierung, z. B. oberhalb eines Tabletops, zeigen sie unterschiedliche Inhalte an, z. B. den Schnitt durch ein Volumen. Damit werden komplexe Informationsräume mittels direkter räumlicher Exploration physisch be-greifbar gemacht. Durch die dreidimensionale Bewegung einer Ansicht im Raum lassen sich auch verschiedene Parameter einer Informationsvisualisierung steuern. Auf einem Tabletop kann z. B. eine Landkarte angezeigt werden, während das kleine Views-Display die Datenverteilung für einen bestimmten Ort anzeigt (Abb. 12.13). Durch Bewegung in der xy -Ebene ändert sich der Ort. Das Display kann auch über einem Ort hoch- oder runterbewegt werden, um zeitabhängige Daten anzuzeigen. Damit eignen sich Tangible Views u. a. zur Exploration und zum Vergleich von Daten verschiedener Orte und Zeitpunkte in einem Raum-Zeit-Würfel [Spindler und Dachsel, 2012].

Sichtbare, greifbare und fühlbare Ausgaben. Neuere Entwicklungen nutzen Tangibles nicht nur zur *Eingabe* von Visualisierungsparametern und zur Formulierung logischer Anfragen, sondern bieten selbst auch dynamische Anzeigen. Die TANGIBLE VIEWS, die STACKABLES-Displays oder auch Projekte, die SIFTEO CUBES zur Anzeige von Teilansichten einer Visualisierungsanwendung verwenden (u. a. [Fuchs et al., 2014, Langner et al., 2014]), sind Beispiele dafür. So nutzen Fuchs et al. [2014] SIFTEO CUBES zur Anzeige von Glyphen im Kontext kollaborativer Datenanalyse. Während diese genannten Tangibles alle ein Display besitzen oder sogar nur daraus bestehen, geht der Ansatz der materiellen, physischen Visualisierungen noch weiter. Jansen et al. [2013] schlagen 3D-Druck oder rekonfigurierbare Systeme als Möglichkeit vor, um Visualisierungen von der digitalen vollständig in die gegenständliche Welt zu überführen. Sie vergleichen physische (d. h. 3D-gedruckte) Visualisierungen mit ihrem Bildschirm-Pendant und berichten von den Vorteilen *gegenständlicher Ausgabe*.

12.2.3 Musik und Kunst

Schon sehr früh wurden TUIs für musische und andere künstlerische Ausdrucksformen genutzt. Das verwundert nicht, da die Interaktion mit dem Computer (z. B. einem Synthesizer) bei Tangible Interaction wieder verdinglicht und in die Hände der Musiker und Künstler zurückgegeben wird. Beide sind es gewohnt, ihre Hände in versierter und differenzierter Weise zum Spielen eines Instruments oder zum Arbeiten mit Materialien und Farben einzusetzen. Dabei spielen Materialität, räumliche Verortung [Hornecker et al., 2012] und taktile Wahrnehmung, die bei klassischen GUIs beinahe völlig verloren gegangen sind, eine wesentliche Rolle. Für Tangibles im Bereich Musik und Performance wird von Jordà [2008] ein sehr guter Überblick zu Motivation, Entstehungsgeschichte und Beispielen gegeben. Dass Tabletops in Kombination mit Tangibles sehr attraktiv für musikalische Performances sind, begründet JORDÀ mit folgenden Eigenschaften:

- Kollaboration, gemeinsam genutzte Daten und Aufgabenverteilung,
- Interaktion in Echtzeit und auf mehrdimensionale, kontinuierliche Art und Weise bei hoher Interaktionsbandbreite und
- Expressive, explorative Interaktion, die auch höchst komplex und versiert ausgeführt werden kann.

Bei Musikanwendungen von TUIs unterscheiden Shaer und Hornecker [2010] *Instrumente* (d. h., vollständig kontrollierbare Soundgeneratoren bzw. Synthesizer), *Sequenzner TUIs*, die Audio Samples mischen und abspielen, *Sound-Spielzeuge* mit begrenzten Kontrollmöglichkeiten und *Controller*, die beliebige Synthesizer fernsteuern können. Aus der großen Vielfalt von Entwicklungen in diesem Bereich, von der auf der Webseite von MARTIN KALTENBRUNNER⁷ sehr viele in ansprechender Weise dokumentiert sind, werden hier nur einige Beispiele herausgegriffen.

⁷ <http://modin.yuri.at/tangibles/>

Music Bottles. Bei den von Ishii et al. [2001] vorgestellten MUSIC BOTTLES handelt es sich eher um eine künstlerische Installation, bei der mehrere Glasflaschen auf einem Tisch als Container für Musikstücke bzw. Instrumente dienen. Dass Flaschen einen Inhalt haben, den man „befreien“ kann, ist die zugrundeliegende Metapher dieses scheinbar nur aus Alltagsgegenständen bestehenden TUIs. Wird eine Flasche entkorkt, so wird das entsprechende Sample/Instrument gespielt. Der Tisch, auf den die Flaschen zur Aktivierung gestellt werden, erkennt diese und projiziert zusätzlich einen Lichtschein unter jede Flasche (Abb. 12.14). Während man diese Installation durchaus der Gruppe der Sound-Spielzeuge mit eingeschränkten Möglichkeiten zuordnen könnte, besitzen die MUSIC BOTTLES jedoch eine ästhetische, emotionale und fast magisch anmutende Qualität, die das Potenzial von TUIs als Mediatoren zwischen realer und digitaler Welt hervorragend illustriert.



Abb. 12.14: MUSIC BOTTLES [Ishii et al., 2001] sind eine künstlerische Installation. Jeder Flasche ist Musik zugeordnet, die durch Entkorken abgespielt und mit anderen Instrumenten (d. h. Flaschen) kombiniert werden kann.

Reactables. Das Projekt REACTABLE [Jordà et al., 2007] wurde 2003 von einer Forschergruppe um SERGI JORDÀ in Barcelona begonnen und zählt zu den einflussreichsten Arbeiten im Bereich Tangible Music. Ein runder Tabletop, der verschiedenen Musikern gleiche Möglichkeiten der Kontrolle bietet, fungiert als begreifbarer, modularer Synthesizer. Jedes auf dem Tisch platzierte Tangible steuert eine bestimmte Synthesizer-Komponente zur Generierung, Veränderung oder Kontrolle des Sounds. Dabei kommt – wie beim oben erläuterten FACET-STREAMS – eine Flußmetapher zum Einsatz, die als visuelle Verbindung zwischen den verschiedenen Komponenten dargestellt wird (Abb. 12.15). Diese Verbindungen können durch Touchgesten aktiviert und deaktiviert werden, und Soundparameter können durch das Vorhandensein, die Nähe bzw. die Rotation der Tangibles sowie Touchgesten gesteuert werden. Ein vielfältiges visuelles Feedback lässt neben dem ständig zu hörenden Ergebnis der Soundsynthese Rückschlüsse über Konfigurationszustände, Verhalten und Soundparameter zu.

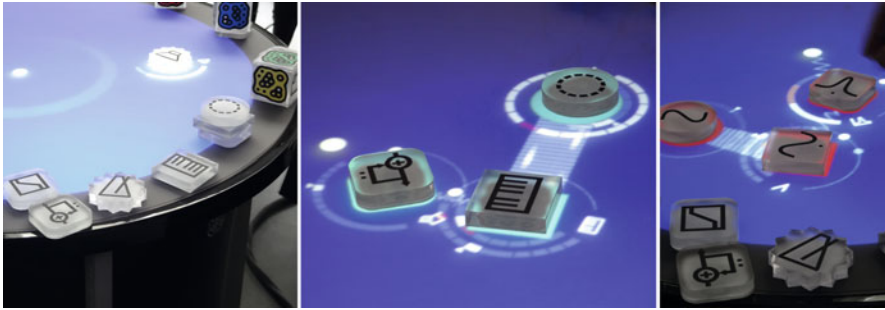


Abb. 12.15: Der REACTABLE ist ein vollwertiger Synthesizer, der die Kontrolle sämtlicher Soundparameter über verschiedenartige Tangibles auf einem runden Tabletop erlaubt [Jordà et al., 2007]. So symbolisieren rechteckige Tokens *Generatoren*, abgerundete *Audiofilter*, runde *Controller* oder gezackte *globale Controller*.

Zusatzinformation: Der Weg aus dem Forschungslabor. Mit den Interaktionsmöglichkeiten des REACTABLES steht mehr als nur ein im Forschungslabor entwickelter TUI-Prototyp zur Verfügung. Stattdessen handelt es sich um ein elektronisches Instrument, das aktiv von Musikern für Live-Performances genutzt wird und sogar in Museen zu finden ist. Teil der Erfolgsgeschichte ist, dass die Firma *Reactable Systems* aus dem Forschungsprojekt heraus gegründet wurde, die diese runden Musik-Tabletops verkauft. Eine preisgekrönte App-Variante (leider ohne Tangibles) für Smartphones und Tablets steht ebenfalls zur Verfügung. Ein Höhepunkt war sicherlich die Verwendung des Sound-Tischs vom Produzenten Damian Taylor bei den Konzerten der 2007/8er-Welttour der isländischen Sängerin Björk. Aber auch das reactIVision-System zur Erkennung der Tangibles auf dem Tabletop über verschiedene visuelle Marker [Kaltenbrunner und Bencina, 2007] zählt zu den wichtigsten und am häufigsten verwendeten Bildverarbeitungslösungen im Bereich Tangibles auf Tabletops.

Viele weitere Projekte sind durch das Grundkonzept des REACTABLES beeinflusst worden. Ein Beispiel ist der XENAKIS TABLE [Bischof et al., 2008], ein Instrument für mehrere Musiker, die mit Hilfe von Tangibles auf einem illuminierten Tisch Parameter automatischer komponierter Musik im Geiste der von Iannis Xenakis geschaffenen stochastischen Musik beeinflussen können. Zahlreiche Projekte verwenden die REACTIVISION-Technologie sogar direkt oder entwickeln sie weiter. So zum Beispiel MIXITUI⁸ von Pedersen und Hornbæk, ein elektronischer, greifbarer Sequenzer, mit dem sich in Live-Performances elektronische Musiksequenzen mischen lassen. Mit MEDIA CRATE haben Bartindale et al. [2009] ein TUI im Bereich der Live-Produktion von Medien, d. h. der Präsentation von audiovisuellen Medien

⁸ <http://www.mixitui.com/>

bei Konzerten, Konferenzen oder anderen Events, entwickelt. Auch dieses basiert auf dem REACTABLE, erweitert diesen aber um weitere Medien und legt ein größeres Gewicht auf eine strukturiertere Kontrolle von Parametern und eine bessere Ausgabequalität.

12.2.4 Tangible Programming

Bereits vor mehr als 40 Jahren wurde am MIT Artificial Intelligence Laboratory unter der Leitung von SEYMOUR PAPERT erforscht, wie Kindern der Zugang zum Computer und dessen Programmierung ermöglicht werden kann, indem ihre realweltlichen und dinglichen Erfahrungen ausgenutzt werden. Daraus entstand das Forschungsfeld der physischen Programmierung oder auch *Tangible Programming*. McNerney [2004] gibt einen guten Überblick zur Geschichte des Tangible Programmings ab den 1960er Jahren, wobei der Fokus auf den grundlegenden Arbeiten des MIT liegt. Auch heute werden diese Arbeiten in der Arbeitsgruppe „Life-long Kindergarten“⁹ unter der Leitung des ehemaligen Papert-Studenten MITCHEL RESNICK fortgesetzt.

Programming by Example. Radia Perlman erkannte früh, dass die Schwierigkeiten, die Kinder beim Lernen des Programmierens und Verstehens eines Computers haben, nicht von der Syntax einer Sprache herrühren, sondern von der Benutzungsschnittstelle [McNerney, 2004]. So entwickelte sie die MEMORY BOX und die bereits im Abschn. 12.1.4 erwähnte SLOT MACHINE. Damit konnten Kinder auf physische Weise dem Computer zeigen, was er ausführen soll. Das Konzept der *Programming by Example* wird noch besser durch eine weitere Arbeit des MIT Media Labs illustriert, den CURLYBOTS [Frei et al., 2000]. Die mausartigen Gebilde (ähnlich einer Halbkugel) besitzen nur einen Knopf und lassen sich sehr simpel bedienen. Man drückt den Knopf, und damit werden alle nachfolgenden manuellen Bewegungen des CURLYBOTS auf einer Oberfläche aufgezeichnet. Die Aufzeichnung, in der auch Pausen enthalten sein können, wird durch erneutes Drücken des Knopfes beendet. Unmittelbar danach kann ein CURLYBOT diese aufgezeichneten Bewegungen unendlich oft wiederholen, womit sich interessante Muster und geometrische Formen erzeugen lassen. Durch einen angebrachten Stift können diese auch sichtbar gemacht werden. Das im Abschn. 12.2.6 erwähnte Roboterspielzeug TOPOBO [Raffle et al., 2004] mit seinem kinetischen Gedächtnis ist ein weiteres Beispiel für die Programmierung von Bewegungen durch Demonstration.

AlgoBlock. Der Begriff *Tangible Programming* wurde von HIDEYUKI SUZUKI und HIROSHI KATO, den Entwicklern des ALGOBLOCK-Systems, geprägt [Suzuki und Kato, 1993, 1995]. Dabei können viele reale Bausteine miteinander kombiniert werden, um ein Computerprogramm zu erstellen. Jeder Baustein (mit ca. 15 cm Kantenlänge) korrespondiert mit einem Kommando, das denen der Sprache

⁹ <http://llk.media.mit.edu/>

Logo ähnelt. Atomare Einheiten können also miteinander kombiniert werden, um komplexere Programme zu erstellen, wobei eine LED auf dem Würfel immer dann leuchtet, wenn das entsprechende Programm ausgeführt wird. Auch die Kollaboration mehrerer Nutzer, häufig Kinder, wird dabei unterstützt, um die gemeinsame Lösung von Problemen zu trainieren. Im Beispielszenario sollte ein auf einem separaten Monitor dargestelltes U-Boot mit Hilfe des erstellten Programms durch ein Labyrinth gesteuert werden.

Programmable Bricks, LEGO Mindstorms und Crickets. Das MIT Media Lab unterhält seit mehr als drei Jahrzehnten eine enge Verbindung mit der LEGO Group, die sowohl Unterstützer, Partner, aber auch Nutznießer der dortigen Forschung ist. Die vielfältig verzweigten Forschungsarbeiten zu PROGRAMMABLE BRICKS [Resnick et al., 1996] waren beispielsweise eine wesentliche Grundlage für die kommerzielle Entwicklung der erfolgreichen programmierbaren LEGO®-Produkte.

Die MIT-Forscher FRED MARTIN, RANDY SARGENT und BRIAN SILVERMAN integrierten als erste einen kleinen Computer direkt in kleine, programmierbare LEGO-Bausteine, ohne dass externe Kabel zur Steuerung nötig gewesen wären. Aus diesen sogenannten P-BRICKS ging 1998 unmittelbar das LEGO® Mindstorms® Robotics Invention System¹⁰ hervor – der Beginn der wohl beeindruckendsten kommerziellen Erfolgsgeschichte im Bereich Tangible Computing. Die batteriebetriebenen Legosteine (Robotics Command System, RCX – die neueste Version nennt sich NXT) können in verschiedensten Sprachen programmiert werden, wobei eine Infrarotschnittstelle zur Übertragung dient. Jeder RCX-Block verfügt über ein kleines Display, Servomotoren, eingebaute Sensoren und Anschlüsse für weitere.

Eine Weiterentwicklung und Miniaturisierung der P-BRICKS stellen die von Martin et al. [2000] vorgestellten CRICKETS dar. Mit den kleinen Mikrocontrollern können Sensoren ausgelesen, Motoren gesteuert, Kommandos empfangen und gesendet, Töne abgespielt und mit anderen Crickets über eine Infrarotlicht-Schnittstelle kommuniziert werden. Während LEGO® Mindstorms® primär zur Steuerung von (Spiel-)Robotern eingesetzt wird, eignen sich Crickets vor allem für künstlerische Projekte, wie z. B. musikalische Skulpturen, interaktiven Schmuck oder tanzende Geschöpfe.

Tangible Programming Bricks. Ebenfalls am MIT Media Lab wurde 1999 von TIMOTHEY S. MCNERNEY das TANGIBLE PROGRAMMING BRICKS - System entwickelt, eine Plattform zum Testen von be-greifbaren Programmiersprachen (Tangible Programming Languages) [McNerney, 2004]. Hier lassen sich kleine (ebenfalls auf LEGO basierende) Programmierbausteine stapeln und mit kleinen Karten zum Einschieben an den Seiten eines Bausteins auf vielfältige Weise parametrisieren und konfigurieren.

¹⁰ <http://mindstorms.lego.com/>

12.2.5 Lehr-/Lernanwendungen

Noch weiter gefasst und universeller als das *Tangible Programming* ist die große Gruppe von TUIs im Kontext des Lehrens und Lernens. Eine Vielzahl von Systemen lassen sich dem Bereich des *Tangible Learnings* zuordnen, darunter auch einige mit veritablem kommerziellen Erfolg. Man kann feststellen, dass dies die erfolgreichste Gruppe von TUIs ist, die auch tatsächlich im Alltag genutzt werden. Shaer und Hornecker [2010] nennen dafür folgende Gründe: Zunächst war es schon immer das Ziel der Hersteller von Spielzeug und Lernmaterialien, die Funktionalität und Attraktivität der Produkte zu verbessern. Weiterhin ist seit vielen Jahrzehnten gründlich untersucht und belegt worden, wie wesentlich dingliche, materielle Lernumgebungen, die alle Sinne ansprechen, für die Entwicklung von Kindern sind. Lerntheoretiker und Entwicklungspsychologen wie JEROME BRUNER und JEAN PIAGET betonen die Bedeutung von Einbettung, physischer Bewegung und multimodaler Interaktion – alles Charakteristika, die Tangible User Interfaces in hervorragender Weise unterstützen. Einen sehr umfassenden Überblick zu TUIs im Bereich Lernen bieten O'Malley und Stanton Fraser [2004] im Futurelab-Bericht.

Schelhowe [2012] wirft einen interessanten Blick auf den Designaspekt sowohl des Greifens als auch Begreifens im Bereich Tangible Learning. Dittert et al. [2012] hingegen geben Einblicke in Erfahrungen mit Workshops, die auf dem Konstruktivismus PAPERTS, also der Verwendung von begreifbaren *Construction Kits* zu Bildungszwecken, beruhen.

Digital Manipulatives. Forscher der MIT-Arbeitsgruppe *Lifelong Kindergarten* haben viel zu *Digital Manipulatives* [Resnick et al., 1998] gearbeitet. Das sind Objekte bzw. Spielzeuge, die mit Computerfähigkeiten erweitert werden und untereinander kommunizieren können. Traditionell im Bereich des kindlichen Lernens genutzte Spielzeuge, wie sie z. B. von den Pädagogen Friedrich Fröbel oder Maria Montessori vorgeschlagen wurden, werden häufig als *Manipulatives* bezeichnet. Durch das Spielen und direkte Manipulieren können grundlegende Konzepte, wie Zahlen, Größe oder Formen, leichter erlernt werden. *Digital Manipulatives* hingegen erweitern die Möglichkeiten der direkten Manipulation mit diesen Objekten. Sie erlauben auch die Modellierung von Zeitabhängigkeiten und Rechenprozessen und gestatten damit das Explorieren und Verstehen von komplexeren Systemkonzepten.

Die bereits im vorherigen Abschnitt erwähnten PROGRAMMABLE BRICKS [Resnick et al., 1996], d. h. P-BRICKS oder das Nachfolgersystem CRICKETS [Martin et al., 2000], sind typische Vertreter dieser Kategorie. Eines der von Resnick et al. [1998] vorgestellten Beispiele für Digital Manipulatives ist der BITBALL, ein programmierbarer Gummiball, der einen Beschleunigungssensor und farbige LEDs enthält. Diese können z. B. automatisch zum Leuchten gebracht werden, wenn der Ball beim Werfen eine bestimmte Beschleunigung erfährt. Der Ball kann auch zum Manipulieren eines Synthesizers verwendet werden, indem seine Beschleunigung z. B. die Tonhöhe steuert. Kinder können selbst entscheiden (und programmieren), wie sich der Ball verhält, und damit Ursache-Wirkungszusammenhänge im Bereich Geschwindigkeit und Beschleunigung besser erlernen.

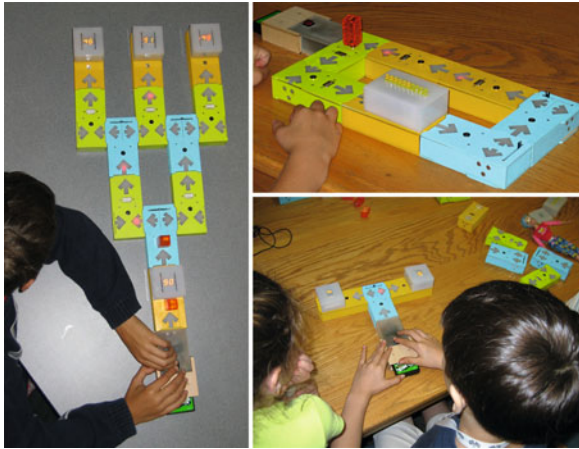


Abb. 12.16: FLOWBLOCKS [Zuckerman et al., 2005] können mathematische oder Computerkonzepte durch Verknüpfung von Tangibles simulieren und erfahrbar machen (mit freundl. Genehmigung von Oren Zuckerman und Mitchel Resnick, MIT Media Lab).

Viele der erwähnten Digital Manipulatives ordnen Zuckerman et al. [2005] der Kategorie der *Fröbel-inspirierten Manipulatives* zu. Das sind primär Bausteine und Spielzeuge, um realweltliche Dinge nachzubauen oder physische Strukturen zu erfahren. Die Autoren schlagen hingegen auch digitale *Montessori-inspirierte Manipulatives* vor, mit denen sich eher konzeptuelle und abstrakte Strukturen modellieren und dynamisches Verhalten erlernen lassen. Auch hier ist ein materielles Konstruieren notwendig, aber das Resultat simuliert eher eine generische, abstrakte Struktur als ein realweltliches Beispiel. Zuckerman et al. [2005] stellen zwei Beispiele vor, SYSTEMBLOCKS und FLOWBLOCKS (Abb. 12.16). SYSTEMBLOCKS können Systemdynamik modellieren und dabei Konzepte wie Verhältnisse, Warteschlangen oder Rückkopplung vermitteln. FLOWBLOCKS hingegen sind in der Lage, mathematische oder Informatik-Konzepte zu simulieren, z. B. Hochzählen, Wahrscheinlichkeit, Schleifen, Verzweigungen oder Variablen.

Learning Cubes. Ein Kubus ist wahrscheinlich die am häufigsten bei TUIs eingesetzte Form und spielt bei Tangible Programming und Lehr-/Lernanwendungen als räumlich kombinierbarer Baustein eine wichtige Rolle. Terrenghi et al. [2006] schlagen mit dem LEARNING CUBE einen besonderen Würfel vor, der einen eingebauten Mikrocontroller, einen Lautsprecher und auf jeder der sechs Seiten ein Display besitzt. Eingebaute Beschleunigungssensoren erlauben das Erkennen von Orientierung und Bewegung. Damit können verschiedenartige Lernaufgaben, z. B. in Form eines Multiple-Choice-Tests oder Quiz, bearbeitet werden, wobei Text und Bilder für die Lösungsvarianten genutzt werden können. Diese werden auf verschiedenen Seiten des Würfels angezeigt, und Benutzer drehen ihn so lange, bis sie die richtige Lösung gefunden haben und bestätigen dies durch Schütteln.

Die von Goh et al. [2012] vorgestellten I-CUBES besitzen zwar kein Display (nur ein dreifarbiges LED-Licht), erkennen dafür aber dank eingebauter Elektronik und Sensorik sehr genau ihre Position und Orientierung im Vergleich zu benachbarten I-CUBES. Damit lassen sich die Würfel nahezu beliebig stapeln und räumlich gruppieren, werden jedoch nicht physisch miteinander verbunden. Für dieses blockbasierte, flexible TUI-System werden zwei Anwendungsbeispiele vorgeschlagen: eine explorative Musikanwendung zur Komposition kurzer Musiksequenzen und eine Anwendung zum Erlernen der Rechtschreibung kurzer Wörter für Vorschulkinder. Gerade die letztgenannte Anwendung macht deutlich, dass das I-CUBE-System von hölzernen Alphabetsteinen inspiriert wurde.

Kritische Reflexion. Die genannten Anwendungsbeispiele haben gezeigt, welche faszinierenden Möglichkeiten und Perspektiven Tangibles im Bereich des Lehrens und Lernens bieten. Die Diskussion darüber, wie groß ihr tatsächlicher Nutzen für konkrete Lernaufgaben wirklich ist, ist jedoch noch nicht abgeschlossen. O'Malley und Stanton Fraser [2004] fassen wichtige Gründe zusammen, warum manipulierbare Gegenstände eine wichtige Rolle für das Lernen spielen. Gerade die körperlich erlebten manipulativen Handlungen mit konkreten, materiell greifbaren Objekten sind zentral für Verständnis und Abstraktionsfähigkeit.

Eine Übertragung auf TUIs muss jedoch nicht zwangsläufig erfolgreich sein. Der gegenständlichen Abbildung von digitalen auf reale Objekte muss besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Zu viel Realismus hindert die Kinder beispielsweise daran, die Konzepte zu abstrahieren und auf andere Gegebenheiten zu übertragen. Auch eine zu unmittelbare und direkte Interaktion (d. h., beispielsweise eine 1:1-Entsprechung von realen Handlungen und virtueller Veränderung) kann nachteilig sein, weil damit Reflexion und Abstraktion nicht befördert werden. Was also bei Benutzungsschnittstellen (für Erwachsene) im Alltag gewünscht wird, kann bei Kindern auch lernabträglich sein.

Zu den typischen und erfolgversprechenden Lerndomänen für TUIs zählen Programmierung, Narration bzw. Storytelling, Molekularbiologie oder Chemie sowie dynamische Systeme [Marshall, 2007]. Dies sind Bereiche mit klar räumlichem Bezug, entweder direkt (wie im Fall der Moleküle) oder metaphorisch in der begreifbaren Repräsentation. Ein Beispiel dafür ist Illuminating Light [Underkoffler und Ishii, 1998], wo verschiedene optische Elemente physisch greifbar auf einem Tabletop repräsentiert werden und sich Konzepte der Optik erlernen lassen.

Der Nutzen von Tangible Interaction für das Lernen wurde in verschiedenen Arbeiten hinterfragt, so z. B. von Marshall [2007], Price [2008] oder Manches und O'Malley [2012]. Immer wieder wird dabei der Fokus auf die Repräsentation von digitalen Inhalten durch gegenständliche Tangibles gelegt und die Frage gestellt, wie Kognition und Interaktion durch diese Abbildung – ggf. unter Nutzung konzeptioneller Metaphern – beeinflusst werden. Auch die Notwendigkeit eines deutlich empirischeren Arbeitens und von Nutzerstudien zur Untermauerung des Wertes von TUIs im Bereich Lernen wird immer wieder hervorgehoben. Das gilt natürlich auch jenseits dieser Anwendungsdomäne.

12.2.6 Spiele und Edutainment

Die digitale Erweiterung von Spielmaterialien bzw. Nutzung von TUIs für Spiele ist seit langem eine wichtige Domäne innerhalb der TUI-Forschung. Die Grenzen zwischen den gerade diskutierten Lehr-/Lernanwendungen und dieser Kategorie verlaufen fließend. Viele moderne Spielzeuge verbinden die Prinzipien manueller Eingabe, be-greifbarer Repräsentation und digitaler Augmentierung [Shaer und Hornecker, 2010]. Der Blick in Spielzeugläden zeigt, dass eingebaute Sensorik, Mikrofone, Klanggeneratoren, Lautsprecher und Lichter heute bereits Teil mehrerer Spielzeuge sind. Teilweise zum Leidwesen vieler Eltern, denn nicht alles, was blinkt oder Geräusche macht, ist pädagogisch sinnvoll. Modulare Systeme, wie die im Abschn. 12.2.4 besprochenen LEGO® Mindstorms® erlauben hingegen ein durchaus schöpferisches Spielen, das zugleich bildend und unterhaltend sein kann. In diesem Abschnitt sollen einige weitere Ansätze vorgestellt werden, die nicht so weit verbreitet sind. Die in den Abschnitten 12.2.4 und 12.2.5 vorgestellten Anwendungen im Bereich Tangible Programming & Learning lassen sich natürlich auch größtenteils dieser Kategorie zuordnen.

Comino und IncreTable Zwei am *Media Interaction Lab* (Hagenberg, Österreich) unter der Leitung von MICHAEL HALLER entwickelte Spiele verbinden auf interessante Weise greifbare Tangibles mit virtuellen, auf einem Tabletop dargestellten Inhalten. COMINO [Leitner et al., 2010] ist ein kollaboratives Spiel, bei dem verschiedene Level eines Puzzles auf einem interaktiven, mit digitalen Stiften bedienten Tisch gelöst werden müssen (Abb. 12.17, links). Virtuelle Dominosteine können mit dem Stift eingezeichnet werden, dürfen jedoch nicht überall platziert werden. Stattdessen kommen auch reale Dominosteine auf der Tischoberfläche zum Einsatz. Raffiniert ist der Einsatz von physikalischen Portalen, die durch einen virtuellen Impuls (z. B., wenn die virtuellen Dominosteine umfallen) die realen Dominosteine zum Kippen bringen können – und ebenso auch umgekehrt. Damit wird eine eindrucksvolle Mixed-Reality-Umgebung mit zahlreichen Dominosteinen als Tangibles geschaffen.

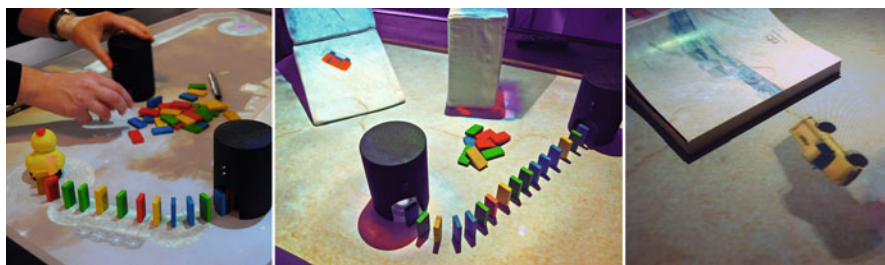


Abb. 12.17: Die Mixed-Reality-Spiele COMINO (links) und INCRETABLE (Mitte, rechts) kombinieren reale Objekte mit virtuellen Inhalten (mit freundl. Genehmigung von Michael Haller, Media Interaction Lab, FH Oberösterreich).

Das INCRETABLE-Spiel ist eine Erweiterung von Comino und erweitert den Technologiemix noch [Leitner et al., 2008, 2010]. Reale und virtuelle Gegenstände müssen auf einem Tabletop platziert werden, wobei sich mit Rampen, gefaltetem Papier oder anderen Hindernissen auf kreative Weise physische Terrains bauen lassen (Abb. 12.17, Mitte und rechts). Durch eine über dem Tisch angebrachte Tiefenkamera und einen Projektor können virtuelle Spielobjekte (z. B. ein Ball) auf die physisch augmentierte Tischoberfläche projiziert werden. In Kombination mit der Rückprojektion des virtuellen Terrains und zusätzlichen aktuierten Minirobotern auf dem Tisch lassen sich interessante Mixed-Reality-Spielerfahrungen erzeugen.

Topobo. Das von Raffle et al. [2004] an der Tangible Media Group des MITs entwickelte Baukastensystem TOPOBO erlaubt das kreative Zusammenbauen von biomorphen, dynamischen Roboter-Kreaturen aus verschiedenen Einzelteilen (Abb. 12.18). Was zunächst nur wie ein farbenfroher Baukastensatz aussieht, mit dem sich lustige oder auch gruselige Figuren zusammenbauen lassen, hat es jedoch in sich. Passive, d. h. statische, und aktive Teile (mit Robotikfunktionalität) können miteinander kombiniert werden. Nach initialisierendem Knopfdruck erkennt das System sämtliche Bewegungen, die man an einzelnen Teilen vornimmt, über einen Positionssensor an den aktiven Teilen und speichert diese. Damit ist es das erste System mit einem „kinetischen Gedächtnis“. Beeindruckend ist die Möglichkeit des Abspielens, d. h. der exakten Reproduktion der zuvor aufgezeichneten Bewegungsfolge mittels Servomotoren in den aktiven Bauteilen.

Zusätzliche Königinnen-Teile sind in der Lage, die mit ihnen durchgeführten Bewegungen als Stellvertreter auf eine Reihe gleicher Bauteile simultan zu übertragen – sie lehren quasi andere aktive Teile, ihre Bewegungen nachzumachen. Damit lassen sich auf einfache Weise komplexe Bewegungsmuster erzeugen, z. B. krie-



Abb. 12.18: Das elektronische Baukastensystem TOPOBO [Raffle et al., 2004] erlaubt das Zusammenbauen von Kreaturen, die ein kinetisches Gedächtnis haben und vorher vom Nutzer demonstrierte Bewegungen später wieder abspielen können. Die größeren blauen Teile (mittleres Bild, unten) sind aktive Teile.

chende Raupen, sich schlängelnde Schlangen oder tanzende Kreaturen. Dass dieses Spielzeug auch erhebliche Lerneffekte ermöglicht und Kreativität fördert, lässt sich schnell errahnen, wenn man es einmal in Aktion gesehen hat (auch ein Video¹¹ vermittelt bereits diese Möglichkeiten). TOPOBO ist auch als Produkt kommerziell vertrieben worden.

Rope Revolution. Ein interessantes Spielsystem wurde mit ROPE REVOLUTION¹² von Yao et al. [2011] entwickelt. Während bei fast allen bisher erwähnten TUIs Objekte in rechteckiger und starrer Form zum Einsatz kamen, steht hier ein digital augmentiertes bewegliches Seil im Vordergrund. Traditionelle Seilspiele, wie Seilhüpfen, Tauziehen oder auch Drachensteigen wurden angepasst, um örtlich entfernten Nutzern eine bereichernde soziale Interaktion durch ein – Fitness und Koordinationsvermögen förderndes – Spiel zu ermöglichen (Abb. 12.19).

Aus einem Loch einer projektiven Display-Wand, die wahlweise Spielinhalte oder virtuell eingeblendete Spielpartner zeigt, kommt ein Seil. Mit einem speziellen Seilmodul hinter der Wand ist es möglich, das Seil zu spannen, es einzuholen, Kraftrückkopplung zu geben und die Bewegungen der Spieler sensorisch zu erfassen. Ein Griffstück am Nutzer-Seilende enthält eine WIIMOTE zur Gestenerkennung, womit sich z. B. schwingende Bewegungen, Ziehen oder die simulierte Führung von Ziegeln erkennen lassen. Dieses Setup kann sich mehrfach nebeneinander wiederholen oder ebenfalls an einem entfernten Ort aufgebaut sein, wobei Kameras die Echtzeitkommunikation zwischen Mitspielern gestatten. Gerade der kollaborative, verbindende Aspekt dieses generalisierten Seil-TUIs mit virtueller Erweiterung macht die damit realisierten Spiele äußerst attraktiv und unterhaltsam.



Abb. 12.19: Bei ROPE REVOLUTION [Yao et al., 2011] dient ein reales Seil als physisches Eingabegerät für verschiedene Seilspele mit (teilweise entfernten) Mitspielern (Quelle: <http://ropeplus.media.mit.edu/>, mit freundl. Genehmigung von Hiroshi Ishii, Tangible Media Group | MIT Media Lab).

¹¹ Projektwebseite TOPOBO am MIT <http://tangible.media.mit.edu/project/topobo/>. Produktwebseite <http://www.topobo.com/>

¹² Rope Revolution Webseite <http://ropeplus.media.mit.edu/>



Abb. 12.20: SIFTEO CUBES sind kleine Display-Würfel, die miteinander kombiniert werden können und über verschiedene Sensoren die Bedienung von z. B. Spielen erlauben. **Rechts:** Die Anwendung CUBEQUERY zum Facetten-basierten Browsen von Medienobjekten auf einem Tabletop. Mit den Sifteo Cubes können Suchparameter einer Datenbankabfrage eingestellt werden, und ihre räumliche Ausrichtung zueinander erlaubt logische Operationen [Langner et al., 2014].

Sifteos. DAVID MERRILL und Kollegen entwickelten mit SIFTABLES [Merrill et al., 2007] ein modulares TUI, das weder Tabletop noch Zusatzdisplay benötigt. Während viele Tangibles eher auf den Repräsentations- und Kontrollaspekt ausgerichtet sind (und kein eigenes Display besitzen), handelt es sich bei SIFTABLES im Kern um eine Vielzahl von kleinen Display-Steinen, die miteinander kombiniert werden können (Abb. 12.20). Anders als bei Bausteinsystemem, wie LEGO® oder TOPOBO, gibt es keine physische Verbindung. Dafür können die SIFTABLES jedoch ihre räumliche Nähe und Orientierung zueinander erkennen.

Durch ihren handlichen Formfaktor, das flexible Display, die drahtlose Kommunikation untereinander und wenige, aber überzeugende Interaktionsmöglichkeiten (Neigen, Umdrehen, Schütteln, Drücken/Berühren) entsteht ein sehr generisch nutzbares System. Dies können natürlich Spiele sein, aber auch Lehr-/Lernanwendungen, z. B. Wortlernspiele. Aus der Entwicklung am MIT Media Lab wurde die Firma Sifteo Inc.¹³ ausgegründet, die diese Bausteine inzwischen als SIFTEO CUBES kommerziell vertreibt.

Kommerzielle Spiele auf Touchdisplays. Die Firma Disney hat mit den APPMATES™ (Mobile Application Toys) ein Produkt auf den Markt gebracht, das einerseits aus Spiele-Apps für Tablets besteht, andererseits aus kleinen Tangibles, z. B. in Autoform, die auf einem Tablet zum Spielen genutzt werden können (Abb. 12.21). Drei getrennte Kontaktflächen am Boden jedes Autos aus elektrisch leitfähigem Kunststoff erlauben nicht nur die Identifikation des entsprechenden Tokens, sondern auch die Bestimmung von Position und Orientierung auf einem Tablet. Deutlich wird mit diesem Beispiel – wie auch den zuvor erläuterten Sifteos, dass Tangibles schon seit einiger Zeit die Forschungslabore verlassen und der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen.

¹³ <https://www.sifteo.com/>, inzwischen übernommen von 3D Robotics Inc.



Abb. 12.21: Bei Disneys APPMATES™ kann man Miniautos nutzen, um auf einem iPad Autorennen zu fahren (Quelle: Amazon.com und <http://bit.ly/AppmatesImages>, © Disney 2011).

Ein weiteres Beispiel dafür ist die von der französischen Firma ePawn¹⁴ entwickelte Technologie zum elektromagnetischen Tracken von Spielfiguren oder beliebigen Gegenständen auf einem Display. Mehrere Displaygrößen (z. B. das 26" ePawn Arena), mehr als 60 parallel in Position, Orientierung und Identität erfassbare Objekte und vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bis hin zu selbst beweglichen Mini-Robotern auf einem Tabletop sind damit realisierbar.

12.3 Klassifikation von TUIs und konzeptionelle Frameworks

Durch die zunehmende Reife des Forschungsgebiets und mehrere kommerziell verfügbare Lösungen hat inzwischen auch eine theoretische Reflexion und Systematisierung dieses Gebietes der modernen Mensch-Computer-Interaktion stattgefunden. Mehrere theoretische Frameworks und Taxonomien im Bereich Tangible Interaction sind verfügbar.¹⁵ Darin wird vor allem der Designraum der technischen Möglichkeiten aufgespannt und die grundlegende Terminologie etabliert. Konzeptuelle Perspektiven, wie z. B. die von Hornecker und Buur [2006] bzgl. sozialer Kollaboration, sind hingegen noch weniger vorhanden und werden erst in jüngeren Arbeiten betrachtet [Marshall, 2007]. Dieser Abschnitt enthält zunächst eine einfache Einteilung von TUIs in grundlegende Klassen. Es werden dann einige der erwähnten Frameworks näher betrachtet, wobei diese Darstellung nur einen Überblick geben kann. Shaer und Hornecker [2010] liefern im fünften Kapitel ihrer Monografie eine umfassendere Darstellung verschiedener Frameworks im Bereich Tangible Interaction, die teilweise als Basis für diesen Abschnitt diente.

¹⁴ <http://www.epawn.fr/>

¹⁵ Dazu zählen die Arbeiten von Holmquist et al. [1999], Ullmer und Ishii [2000], Koleva et al. [2003], Ullmer et al. [2005], Fishkin [2004] sowie Mazalek und van den Hoven [2009].

12.3.1 Grundlegende TUI-Klassen

Nachdem wir eine Vielzahl von Beispielen von Tangible User Interfaces betrachtet haben, sollen sie hier in Form charakteristischer Kategorien systematisiert werden. Diese sind natürlich nicht überlappungsfrei, aber bieten eine sinnvolle Strukturierung. Ullmer et al. [2005] nehmen eine grundlegende Unterteilung der bis dahin entwickelten TUIs in *interaktive Oberflächen*, *Baukastensysteme* und *Token+Constraints*-Systeme vor. Ishii [2008] erweitert diese Einteilung um fünf Klassen, von denen hier die folgenden aufgeführt werden sollen: *Greifbare Telepräsenz*, *Kontinuierliche und formbare TUIs*, *Aktuierte und selbstbewegliche TUIs* und die *Digitale Erweiterung von Alltagsobjekten*.

Interaktive Oberflächen. Bei dieser Kategorie interagieren Benutzer mit physischen Objekten auf einer planaren Oberfläche, die typischerweise eine Display-Funktion hat und Objekte digital augmentieren kann. Der klassische Vertreter ist ein Tabletop-Display, auf dem die Existenz, Identität und räumliche Konfiguration von Tangibles elektronisch erfasst (*getrackt*), vom Computerprogramm interpretiert und über die Veränderung der Anzeige geeignet visualisiert wird [Ullmer et al., 2005]. Dabei kann der Tabletop auch noch weitere Interaktionsformen parallel unterstützen, z. B. Stifteingabe (wie bei COMINO und INCRETABLE [Leitner et al., 2008, 2010]) oder Multitouch-Interaktion (wie bei den Disney APPMATES oder FACET-STREAMS [Jetter et al., 2011]). Ein großer Teil der bisher entwickelten TUIs lässt sich dieser Kategorie zuordnen, darunter auch BUILD-IT [Fjeld et al., 1998], URP [Underkoffler und Ishii, 1999] oder REACTABLE [Jordà et al., 2007]. Dass eine Beschränkung auf Tabletops dabei nicht notwendig ist, zeigen die Disney APPMATES oder neuartige Lösungen für vertikale Oberflächen, z. B. GECKOS von Leitner und Haller [2011] oder VERTIBLES von Hennecke et al. [2012].

Baukastensysteme. Auch in dieser Kategorie von TUIs findet sich eine Vielzahl existierender Systeme wieder. Mit dem englischen Begriff *Constructive Assembly* wird zugleich das konstruierende Zusammensetzen, aber auch der schöpferische Aspekt des Zusammenbaus beschrieben. Dazu werden modulare, verknüpfbare Elemente (häufig Bausteine) genutzt, die sich zumeist dreidimensional zu geometrischen Formen, Figuren, Gebäuden oder vielfältigsten Objekten zusammenfügen lassen. Prominente Beispiele sind die PROGRAMMABLE BRICKS [Resnick et al., 1996] und LEGO® Mindstorms®, aber auch TOPOBO [Raffle et al., 2004]. Einige der Baukastensysteme sehen keine festen Verbindungen zwischen einzelnen Bausteinen vor, deren zwei- oder dreidimensionale Anordnung jedoch trotzdem von Bedeutung ist. Beispiele dafür sind ALGOBLOCK [Suzuki und Kato, 1993], SYSTEMBLOCKS und FLOWBLOCKS [Zuckerman et al., 2005], I-CUBES [Goh et al., 2012], STACKABLES [Klum et al., 2012] oder SIFTABLES [Merrill et al., 2007].

Token+Constraints. Mit Token+Constraints beschreiben Ullmer et al. [2005] die Klasse von TUIs, bei denen physische Tokens (d. h. Objekte oder Bausteine) mit Constraints (d. h. Be- oder Einschränkungen) zusammenwirken. *Tokens* sind eigenständige, räumlich rekonfigurierbare Gegenstände, die typischerweise digitale Infor-

mationen repräsentieren. Das sind z. B. Murmeln für die Anrufe bei der MARBLE ANSWERING MACHINE. *Constraints* sind begrenzende Regionen, in die Tokens abgelegt bzw. in denen sie – zumeist in einer Dimension – bewegt werden können. Das können z. B. Schalen, Vertiefungen, Ablagen oder mechanische Verbindungen, wie die Stangen eines Abakus, aber auch visuelle Regionen wie bei zahlreichen Brettspielen sein. Dabei bilden Constraints typischerweise digitale Operationen ab, also Systemfunktionalität, die auf die darin abgelegten Tokens angewendet wird.

Ein Beispiel dafür sind die UND- bzw. ODER-Verknüpfungen bei den Tangible Query Interfaces [Ullmer et al., 2003], die durch entsprechendes Ablegen der Tangibles in der Ablageschiene ausgedrückt werden. Bei dem Kinderspielzeug MUSIC BLOCKS der Firma Neurosmith¹⁶ wird ebenfalls eine Ablage für farbige Würfel zur Verfügung gestellt, mit der die Sequenz verschiedener Musikstücke festgelegt wird (Abb. 12.22). Beim Tangible Video Editor [Zigelbaum et al., 2007] bieten die puzzleartigen Formen der einzelnen Tangibles gute Affordances [Gibson, 1979, Norman, 1999] und stellen gleichzeitig wirkungsvolle Constraints mit der Funktionalität des Zusammenfügens zweier Clips oder des Festlegens eines bestimmten Übergangseffektes dar.



Abb. 12.22: Bei den MUSIC BLOCKS der Firma Neurosmith können farbige Würfel in einer Ablage platziert werden. Wird ein Würfel heruntergedrückt, wird eine kurze Musiksequenz abgespielt, wobei jede Seite eines Würfels eine eigene Melodie enthält. Durch Drücken des roten Knopfs wird die komplette Sequenz aller Würfel abgespielt. Dieses preisgekrönte Spielzeug soll die kognitive Entwicklung des Kindes durch spielerisches Explorieren fördern (Quelle: <http://shop.smallworldtoys.com/>, © 2010 Small World Toys).

Weitere Beispiele für die Kategorie der Token+Constraints TUIs sind die TANGIBLE PROGRAMMING BRICKS [McNerney, 2004], Radia Perlman's SLOT MACHINE oder auch STACKABLES [Klum et al., 2012]. Da sie auch schon bei den Baukastensystemen genannt wurden, wird deutlich, dass die Klassen sich nicht scharf trennen lassen.

¹⁶ <http://www.neurosmithtoys.com/>

Greifbare Telepräsenz. Mit der ROPE REVOLUTION [Yao et al., 2011] haben wir bereits ein Beispiel dieser Kategorie kennengelernt. Die Grundidee ist die Abbildung taktiler Eingabe und haptischen Feedbacks über eine Distanz, so dass Menschen miteinander verbunden werden und kommunizieren können. Damit soll zusätzlich (oder auch exklusiv) zu visuellen oder auditiven Repräsentationen eines entfernten Menschen ein wesentlicher Kanal der Sinneswahrnehmung hinzugefügt werden. Auch der Begriff der „haptischen Telepräsenz“ beschreibt, wie Menschen mit Hilfe von Bewegung oder Vibration von Gegenständen (wie dem Seil bei ROPE REVOLUTION) das Gefühl der scheinbaren Präsenz eines anderen Menschen vermittelt werden kann.

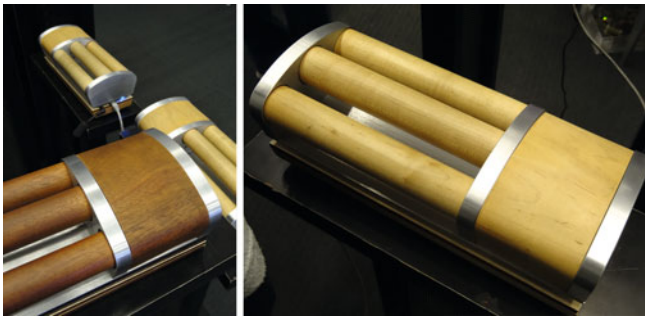


Abb. 12.23: Bei INTOUCH [Brave et al., 1998] werden die manuellen Bewegungen hölzerner Rollen auf ein baugleiches Gerät in der Ferne übertragen, bei dem die Rollen durch Motoren entsprechend der Interaktionen bewegt werden.

Ein weiteres Beispielprojekt ist INTOUCH [Brave et al., 1998]. Jede der beteiligten und räumlich voneinander entfernten Personen hat ein hölzernes Ein- und Ausgabegerät (Abb. 12.23) vor sich. Die drei Rollen lassen sich bewegen oder werden durch Motoren angetrieben. Somit kann deren Bewegung über eine Netzwerkverbindung an die entfernte Person übertragen werden, die sie auf ihren Rollen spürt. Nicht die (beschränkte) Form, sondern die Bewegungsmöglichkeiten und die Etablierung einer scheinbar physischen Verbindung zwischen Personen erlauben reiche Interaktionsmöglichkeiten.

Kontinuierliche und formbare TUIs. Auch diese Kategorie von TUIs ist uns schon im Abschn. 12.2.1 begegnet. Die von Ullmer et al. [2005] bei den Token+Constraint-TUIs beschriebene starre und mehr oder weniger fixierte Form von Tokens stellt eine zu große Beschränkung dar, die z. B. für das Freiformmodellieren oder die Landschaftsplanung weniger geeignet ist. In dieser Klasse von TUIs sollen hingegen kontinuierliche, greifbare Materialien wie Ton, Granulat oder Sand zum Einsatz kommen, häufig in Verbindung mit einer Projektion für die Repräsentation digitaler Inhalte. Beispiele sind die oben beschriebenen Projekte SANDSCAPE [Ishii et al., 2004], ILLUMINATING CLAY [Piper et al., 2002] oder GRANULATSYNTHESE [Beckhaus et al., 2008].

Aktuierte und selbstbewegliche TUIs. Bei klassischen TUIs der Klasse interaktive Oberflächen ist Feedback auf die visuelle Darstellung digitaler Inhalte auf dem Display beschränkt, gelegentlich kommt noch eine auditive Ausgabe hinzu. Vielversprechend ist jedoch auch die Aktuierung von Tangibles [Poupyrev et al., 2007], so dass sie z. B. durch bewegliche Teile über Zustandsänderungen informieren können oder Inhalte aus ihrem kinetischen Gedächtnis abrufen können, um sich selbst auf einem Tisch zu bewegen (z. B., um eine neue Position einzunehmen oder eine Bewegung nachzumachen). Damit wird das Potenzial von – vormalig passiven – Tangibles erheblich erweitert. Bisher fanden Beispielsysteme wie CURLY-BOTS [Frei et al., 2000] oder TOPOBO [Raffle et al., 2004] häufig Anwendung bei Lehr-/Lernanwendungen für Physik, Biologie, Programmierung oder Storytelling. Gerade durch die rasanten Fortschritte im Robotik-Bereich und durch die Miniaturisierung von Mechatronik stehen wir hier aber erst am Anfang einer spannenden Entwicklung.

Digitale Erweiterung von Alltagsgegenständen. Auch diese Klasse von TUIs steht noch am Anfang ihrer Entwicklung und wird künftig sicher ein vermehrtes Interesse erfahren. Während viele der bisher vorgestellten Anwendungen Spezialsysteme erfordern, ist die Augmentierung von Alltagsobjekten bzw. ihre Nutzung als Teil eines TUIs vielversprechend. Damit wird erreicht, dass Menschen einen einfacheren Zugang zu dieser Form der Mensch-Computer-Interaktion erhalten und die Vision des Ubiquitous Computings, der Integration von Computerfunktionalität in unsere Alltagswelten, weiter Gestalt annimmt. Die MUSIC BOTTLES [Ishii et al., 2001] sind ein Beispiel für solche als Tangibles genutzte Alltagsobjekte, auch der BITBALL [Resnick et al., 1998], der geschwindigkeitsabhängig leuchten kann. Interessant ist die Frage, inwieweit Handys als Alltags-Tangible aufgefasst werden können. Sie bieten ein großes sensorisches Potenzial, dazu ein Display und beeindruckende Computerfunktionalität. Somit unterscheiden sie sich – vielleicht nach einigen Erweiterungen – nur wenig von TUIs wie den SIFTABLES oder STACKABLES. Edge und Blackwell [2009] untersuchen Möglichkeiten der beidhändigen Interaktion mit Mobiltelefonen als Tangibles.

Nach dieser Einteilung von TUIs in grundlegende Klassen soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die Grenzen teilweise fließend sind. TOPOBO [Raffle et al., 2004] ist z. B. ein Baukastensystem (Constructive Assembly) und zugleich ein aktuiertes bzw. selbstbewegliches System mit kinetischem Gedächtnis. Auf interaktiven Oberflächen können „normale“ Tangibles oder auch digital erweiterte Alltagsobjekte verwendet werden, gleichzeitig auch Constraints genutzt werden (z. B. Funktionen repräsentierende Vertiefungen im Randbereich eines Tabletops) und sogar aktuierte Tangibles zum Einsatz kommen. Damit wären gleich vier der genannten TUI-Klassen berührt.

12.3.2 Begriffe und ein Framework: Token und Constraints

Wenn über Tangible User Interfaces grundlegend nachgedacht wird, müssen zunächst einmal die Bestandteile benannt und beschrieben werden.

Container, Tools und Tokens. Holmquist et al. [1999] schlagen in ihrem Modell für Tangible User Interfaces die Begriffe *Container*, *Tools* und *Tokens* für die Klassifizierung der Rollen greifbarer Objekte vor.

- *Container* sind generische Objekte mit dynamischer Bindung an beliebige digitale Informationen.
- *Tokens* sind physische Objekte mit statischer Bindung an digitale Informationen, wobei ihr Aussehen diese Informationen charakteristisch widerspiegelt.
- *Tools* sind an Funktionen gebundene Objekte, mit denen sich digitale Informationen verändern lassen.

Über diese Begrifflichkeiten ist mehrfach in der Literatur debattiert worden (z. B. in [Ullmer und Ishii, 2000, Ullmer et al., 2005]).

Das TAC-Framework. Shaer et al. [2004] führen das TAC-Paradigma (Token And Constraints) ein. Sie beschreiben vier Grundkomponenten, die miteinander kombiniert werden können, um die Struktur und Funktionalität eines TUIs zu beschreiben:

- Ein physisches Objekt, das Teil eines TUIs ist, z. B. eine Oberfläche, ein Baustein oder ein Modellauto. Neben der Form und den Materialeigenschaften können sie auch mit Sound oder Grafik digital erweitert sein. Jedes Objekt kann ein Token, Constraint oder beides sein.
- Ein *Token* ist ein greifbares Objekt, das entweder an digitale Informationen oder an Funktionen des Computers gebunden ist. Dabei reflektieren die physischen Eigenschaften des Gegenstands entweder die Art der zugrundeliegenden Informationen oder der damit repräsentierten Funktion.
- Ein *Constraint* beschränkt die Verhaltensweise des damit assoziierten Tokens. Constraints können den physischen Interaktionsraum für die Tokens begrenzen und nahelegen, wie Tokens darin manipuliert werden. Constraints bieten auch einen referentiellen Rahmen für die Interpretation der Verbindung von Tokens und Constraints.
- Als *TAC (Token and Constraints)* wird eine Beziehung zwischen einem Token und einem oder mehreren Constraints bezeichnet. Sie werden vom Entwickler definiert und dann erstellt, wenn ein Token physisch mit einem Constraint assoziiert wird. Die Interaktion mit einem TAC erfolgt durch diskrete oder kontinuierliche Manipulation unter Berücksichtigung der Constraints. Dabei wird sowohl der gegenständliche als auch der digitale Zustand eines TUIs verändert. Da TACs Zustände und mögliche Interaktionen kapseln, lassen sie sich mit Widgets vergleichen (siehe Band 1, Kap. 10).

Shaer et al. [2004] zeigen, dass sich mit dieser TAC-Terminologie eine Vielzahl von existierenden TUIs beschreiben lassen. Aber auch neue TUIs lassen sich mit Hilfe

dieses Paradigmas spezifizieren, wofür später auch die TUI-Beschreibungssprache TUIML [Shaer und Jacob, 2009] entwickelt wurde. Dass damit erstmals eine high-level *User Interface Description Language* für Tangible User Interfaces zur Verfügung steht, zeigt die Reife des Forschungsgebietes.

12.3.3 Kopplung des Gegenständlichen und Digitalen

Nachdem Begrifflichkeiten und Hauptbestandteile eines TUIs beschrieben sind, soll in diesem Abschnitt auf eine zentrale Eigenschaft von TUIs eingegangen werden, die Kopplung von digitaler Information an realweltliche Objekte. Damit kommt der sinnvollen Verknüpfung und Kopplung beider Welten, der Repräsentation des Digitalen durch das Gegenständliche, eine wesentliche Bedeutung beim Interfacedesign zu. Viele Forschungsarbeiten und theoretische Frameworks beschäftigen sich daher mit der Kopplung gegenständlicher Repräsentationen an zugrundeliegende Daten und computerinterne Modelle.

Ein grundlegendes TUI-Framework. Ullmer und Ishii [2000] stellen eine beschreibende Taxonomie vor und skizzieren ein grundlegendes Interaktionsmodell dieser Kopplung zwischen Digitalem und Gegenständlichen. In Anlehnung an das MVC-Modell nennen sie es MCRpd, eine Abkürzung für „model-control-representation (physical and digital)“. Modell und Controller werden dabei aus dem MVC-Modell beibehalten, der View hingegen wird in physische (p) Repräsentation und digitale (d) Repräsentation aufgeteilt. Daraus leiten sich charakteristische Beziehungen ab. Die physischen Repräsentationen

- sind an das zugrundeliegende computerinterne Modell, also digitale Informationen und Funktionalität des Computers, gekoppelt;
- enthalten bzw. verkörpern Mechanismen zur interaktiven, manipulativen Steuerung;
- sind über unsere Wahrnehmung auch an rein digitale Repräsentationen gekoppelt (zum Beispiel visuelle Anzeigen auf einem Tabletop).

TUIs unterstützen vielfältige Assoziationen zwischen Tangibles und digitalen Informationen. Zu den repräsentierbaren Informationsklassen zählen:

- Statische digitale Medien, wie Bilder oder 3D-Modelle,
- Dynamische digitale Medien, wie Videos oder grafische Animationen,
- Parameter oder Attribute, wie z. B. Farben, Materialien, Geschwindigkeiten,
- Berechnungsfunktionen oder andere Anwendungsfunktionalität,
- Einfache Datenstrukturen, wie Listen oder Hierarchien von Medienobjekten,
- Komplexe Datenstrukturen, bei denen z. B. Daten, Operationen und Attribute kombiniert sind,
- Entfernte Personen, Orte, Geräte oder beliebige Gegenstände.

Diese digitalen Informationen können entweder statisch und zur Entwicklungszeit an Gegenstände gebunden werden (statische Bindung) oder durch die Nutzerinteraktionen zur Laufzeit eines Systems (dynamische Bindung). Darüber, wie diese Kopplungen stattfinden, welche konkreten Eigenschaften sie besitzen oder wie sie entworfen werden sollten, wird von Ullmer und Ishii [2000] jedoch keine Aussage gemacht.

Neben der Benennung der digitalen Informationsklassen identifizieren sie bzgl. der Entwicklung der Tangibles jedoch auch drei (gängige) Ansätze: die Verwendung existierender Gegenstände und deren Erweiterung um Sensorik, die ingenieurmäßige und pragmatische Neukonstruktion von Tangibles sowie die Nutzung von Artefakten aus einem konkreten Nutzungskontext bzw. aus konkreter Arbeitspraxis heraus. Ein möglicher Ansatz aus der Sicht des Industriedesigns, Grafikdesigns oder der Architektur wird nur flüchtig erwähnt.

Die Perspektive des Produktdesigns. Erst in jüngerer Zeit wird anerkannt, dass eine am Produktdesign orientierte Perspektive für die Entwicklung von Tangibles – nicht zuletzt durch deren Dinglichkeit und Produktsprachlichkeit – wichtig ist. Das von Wensveen et al. [2004] vorgestellte Framework *Interaction Frogger* nimmt erstmalig eine derart produktgestalterische Sicht auf den Entwurf von TUIs ein. Es analysiert die Interaktion eines Nutzers mit einem Produkt bzgl. der Kopplung zwischen menschlichen Bedienhandlungen und der resultierenden Funktion, Reaktion und Ausgabe eines TUIs. Dabei werden die sechs Aspekte Zeit, Ort, Richtung, Dynamik, Modalität und emotionaler Ausdruck für eine natürliche Kopplung unterschieden. Interessant ist dabei auch, dass das Framework tatsächliche Designrichtlinien in Form eines systematischen Schritt-für-Schritt-Ansatzes vorschlägt, der jeden Aspekt der Kopplung von Digitalem und Dinglichem betrachtet.

Kohärenz zwischen dinglichen und digitalen Objekten. Auch das von Koleva et al. [2003] vorgeschlagene analytische Framework betrachtet die Verknüpfung von Digitalem und Dinglichem, vor allem im Hinblick auf den *Grad der Kohärenz*. Die Eigenschaften der Verknüpfungen zwischen physischen und digitalen Repräsentationen bestimmen, wie stark diese als dieselbe Sache, als ein sowohl in der digitalen wie realen Welt existierendes Objekt oder aber zwei getrennte Dinge wahrgenommen werden. Zu den Eigenschaften zählen

- das Verhältnis zwischen Bedienhandlung und Systemreaktion (unmittelbar oder transformiert),
- der Grad der Berücksichtigung der Interaktion (welche Freiheitsgrade werden z. B. verwendet),
- die Lebensdauer und Konfigurierbarkeit der Kopplung,
- die Autonomie eines digitalen Objekts (bleibt es weiter bestehen, auch wenn ein Tangible entfernt wird),
- die Kardinalität (Verknüpfung mit einem oder mehreren Objekten) und
- die Richtung der Kopplung (bei aktuierten Tangibles kann das digitale Modell Einfluss auf das physische Objekt haben).

Es werden fünf Kategorien von TUIs entlang des Kohärenz-Kontinuums von schwach bis stark genannt:

- *Mehrzweck-Tools*: z. B. Maus oder Joystick,
- *Spezialisierte Tools*: Objekte mit spezialisierter Funktion, die aber auf viele digitale Objekte angewendet werden kann,
- *Identifikatoren*: physische Objekte fungieren als Tokens, die digitale Informationen repräsentieren,
- *Stellvertreter*: mehr als bei Identifikatoren erlauben sie eine umfassendere Manipulation des digitalen Gegenübers,
- *Projektionen*: Ein digitales Artefakt repräsentiert einige Eigenschaften eines physischen Objekts direkt.

Am starken Ende des Kohärenz-Kontinuums steht dann die Illusion ein und desselben Objekts. Das können z. B. technisch präzise Augmented Reality-Lösungen sein, die den realen und digitalen Raum miteinander verschmelzen und reale und digitale Objekte als eins erscheinen lassen.

Grad der Be-Greifbarkeit und Verkörperung. Für die Analyse und Beschreibung von TUIs schlägt Fishkin [2004] ein Framework vor, das auf dem Grad (bzw. Abstufungen) der *Tangibility* (Begreifbarkeit) basiert. Dazu wird eine Taxonomie entlang zweier Achsen entworfen, *Metapher* und *Embodiment* (Verkörperung). Jede dieser Dimensionen ist ein Kontinuum, wobei FISHKIN argumentiert, dass der Grad der Be-Greifbarkeit mit höherer Attributausprägung auf den Achsen steigt.

Die Achse *Embodiment* repräsentiert, wie dicht Eingabe und Ausgabe innerhalb eines TUIs miteinander verknüpft sind. Anders formuliert, wie stark ein Nutzer empfindet, dass Computerfunktionalität in einer dinglichen Hülle eingebettet ist [Shaer und Hornecker, 2010]. Eine wahrhaft direkte Manipulation bedeutet somit einen hohen Grad von Verkörperung. Aber auch eine indirekte Eingabe und davon getrennte Ausgabe kommt häufig (und mit gutem Grund) zum Einsatz. Die vier Stufen des *Embodiment* sind:

- *Vollständig*: Das Ausgabegerät und Eingabegerät sind identisch. Ein Beispiel sind die TANGIBLE VIEWS [Spindler et al., 2010b] oder TANGIBLE WINDOWS [Spindler et al., 2012a].
- *Nahebei*: Die Ausgabe erfolgt in der unmittelbaren Nähe des Eingabeobjekts. Die meisten Tabletop-TUIs mögen als Beispiel dienen, z. B. die Facet-Tokens bei FACET-STREAMS [Jetter et al., 2011].
- *Umgebung*: Die Ausgabe erfolgt um einen Nutzer herum. Typischerweise durch Audio, aber neuerdings auch visuell durch ubiquitäre Raumprojektion.
- *Entfernt*: Die Ausgabe erfolgt auf einem entfernten Display oder sogar in einem anderen Raum. Eines der vielen Beispiele sind die STACKABLES [Klum et al., 2012].

Die zweite Achse *Metapher* repräsentiert den Typ und auch die Stärke der Analogie zwischen Interface und Handlungen oder Objekten der realen Welt. Als Typen von Metaphern identifiziert FISHKIN Substantive und Verben. Zusammen ergeben sich ebenfalls vier mögliche Stufen:

- *Keine Metapher*: Bedienhandlungen bei TUIs haben absichtlich keine Analogie in der realen Welt. Ein Beispiel ist das Aufleuchten des BITBALLS [Resnick et al., 1998] beim Werfen durch die Luft.
- *Substantivische Metapher*: Eine realweltliche Analogie wird auf Form, Aussehen, Textur oder Klang eines Objektes angewendet, nicht jedoch auf die Handlungen damit. Die Repräsentation einer Erdkugel als Tangible wäre dafür ein Beispiel.
- *Tätigkeits-Metapher*: Hierbei betrifft die Analogie ausschließlich die Handlung, nicht aber die Form eines Objektes. Es ist z. B. irrelevant, ob eine Schüttelgeste zum Löschen von Daten mit einem Stift, einer Erdkugel oder einem beliebigen Tangible ausgeführt wird.
- *Beide zusammen*: Eine Vielzahl von TUIs verwendet starke Analogien, die sich auf Aussehen und Verhalten gleichermaßen beziehen. Die Gebäudeminiaturen bei URP [Underkoffler und Ishii, 1999], deren Bewegung einen virtuellen Schattenwurf produziert, sind eins von vielen Beispielen.

Während diese Taxonomie hilfreich sein kann, bemerkt Price [2008] jedoch zu Recht, dass mehr Verkörperung oder stärkere Metaphern nicht unbedingt ein leistungsfähigeres oder geeigneteres TUI bedeuten müssen. Es ist weder belegt, dass Bekanntheit (z. B. durch Nutzung einer Metapher) eine höhere Leistung (z. B. Bearbeitungs geschwindigkeit oder Fehlerrate) impliziert, noch welchen Einfluss der Grad der Einbettung auf Interaktion oder Kognition hat.

12.3.4 Soziale Interaktion und User Experience

Viele der analytischen Frameworks sind aus einer strukturellen oder technischen Perspektive entwickelt worden, ohne die Nutzer zu berücksichtigen. Das *Tangible Interaction Framework* von Hornecker und Buur [2006] konzentriert sich hingegen auf die User Experience und insbesondere die soziale Interaktion mit und im Kontext von TUIs. Der Fokus liegt also auf der Interaktionsqualität, die ein TUI liefern kann, und nicht auf dessen technischer Funktion oder den Komponenten allein. Damit wird die häufig Daten-zentrierte Sicht aus den frühen TUI-Arbeiten um eine Sicht aus der Perspektive des Interaktionsdesigns (wo die Handlungen selbst gestaltet werden, nicht nur die Artefakte) und eine künstlerische, eher Raum-zentrierte Sicht erweitert. Hornecker und Buur [2006] fassen das unter dem Konzept der *Tangible Interaction* zusammen (vgl. die Erläuterungen in Abschn. 12.1.2). Fernaeus et al. [2008] diskutieren diesen konzeptionellen Wechsel von einer informations- und datenorientierten Perspektive der Tangible Interaction auf eine *handlungszentrierte Sicht* näher. Tangibles werden nicht mehr als Repräsentanten von Daten entworfen, sondern als Hilfsmittel für menschliche Tätigkeiten.

Beim Design oder der Bewertung von TUIs für Anwendungsszenarien mit sozialen Aspekten sollen laut Hornecker und Buur [2006] vier Kernthemen berücksichtigt werden. Diese stellen verschiedene Perspektiven auf Tangible Interaction dar.

- *Haptische Direkte Manipulation* verweist auf die materiellen und taktilen Qualitäten und manuelle Bedienbarkeit dieser Schnittstellen.
- *Räumliche Interaktion* bezieht sich auf die räumlichen Qualitäten, womit auch die Bewegung des gesamten Körpers im Raum als eigenständige Interaktion gemeint ist.
- *Embodied Facilitation*¹⁷ hebt hervor, wie die physische Anordnung und digitale Programmierung Gruppenverhalten und Nutzungsmuster vorausbestimmen und leiten können.
- *Ausdrucksvolle Repräsentation* fokussiert auf die dingliche und digitale Repräsentationsfunktion von Tangibles, auf deren Verständlichkeit und Expressivität.

Mit dem Fokus des Frameworks auf die User Experience und die kontextuelle Einbettung der Interaktion wird eine interessante Verschiebung des Forschungsfokus bei TUIs von der reinen Systemfunktionalität hin zu den materiellen und sozialen Kontexten unterstrichen [Shaer und Hornecker, 2010]. Menschliche Handlungen, Kreativität, die unbeabsichtigte Verwendung von Tangibles oder auch subjektive Interpretationen sind neuartige Forschungsthemen im Bereich Tangible Interaction mit zunehmender Attraktivität.

12.4 Designaspekte, Vorteile und Grenzen

Da Tangible User Interfaces sich von grafischen Benutzungsschnittstellen deutlich unterscheiden und Interdisziplinarität (z. B. durch Aspekte des Produktdesigns) eine viel größere Rolle spielt, ergeben sich auch spezielle Design-Herausforderungen, Vorteile und Beschränkungen, die in diesem Abschnitt erläutert werden sollen. Fitzmaurice et al. [1995] betrachteten bereits für Graspable User Interfaces den möglichen Designraum, der sich mit Tangibles eröffnet. Nachfolgend sollen einige Dimensionen aufgelistet werden:

- Sind Tangibles nur passive Objekte, die Eingaben lediglich über ihre Position und Orientierung im Raum ermöglichen, oder haben sie zusätzliche eingebettete Sensoren, Bedienelemente oder Displays?
- „Kennen“ Tangibles andere Tangibles, oder werden sie isoliert voneinander verwendet? Können Tangibles auf ihre Umgebung reagieren? Daraus leiten sich Fragen der technischen Kommunikation und Vernetzung ab.
- Wie viele Tangibles sind in einem System vorhanden und können gleichzeitig genutzt werden? Kann nur eines aktiv sein oder zwei gemeinsam oder mehrere parallel?
- Welche Repräsentations- oder Steueraufgaben werden überhaupt Tangibles zugewiesen, wie ist also das Verhältnis von virtueller (visueller) zu physikalischer (be-greifbarer) Repräsentation innerhalb einer Anwendung?

¹⁷ Eine erleichterte Bedienung wird eingebettet in eine physische Schnittstelle. Dies ist einer der vielen Begriffe im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion, deren Übersetzung ins Deutsche nur umständlich und wenig griffig gelingen kann.

- Ist Interaktion ausschließlich mit den Tangibles möglich oder auch in Kombination bzw. alternativ mit dem Display, z. B. einem Multitouch-Tabletop?
- Wie müssen Tangibles gestaltet sein? Ihre Funktion kann beispielsweise über die Form, Größe, Farbe, Textur oder das Gewicht kommuniziert werden.
- Sollen für verschiedene Aufgaben oder Objektrepräsentationen unterschiedliche oder eher generische Tangibles mit dynamisch veränderlicher Funktion oder Rolle eingesetzt werden?

12.4.1 Herausforderungen

Aus diesen Fragen, den inhärenten Eigenschaften von Tangibles und dem aktuellen Forschungsstand leiten sich einige Herausforderungen ab, die beachtet und gemeistert werden müssen.

Produktdesign. Grafik- oder Kommunikationsdesign spielen eine Rolle bei der Gestaltung von grafischen Benutzungsschnittstellen, da hier die visuelle, zweidimensionale Erscheinung im Vordergrund steht. Bei TUIs hingegen sind immer 3D-Objekte und reale Materialien involviert, womit dem Produkt- oder Industriedesign als ergänzende Disziplin eine wichtige Bedeutung bekommt. Durch das Be-greifen in der Bedienung spielen körperlich-emotionale Aspekte, Ästhetik und auch eine gewisse Ökonomie und Eleganz der körperlichen Interaktion eine Rolle, die durch das Design berücksichtigt werden müssen.

Klassische Fragen und Dimensionen des Produktdesigns werden hier also wesentlich, darunter Größe, Plastizität, Formsprache, verwendete Materialien, Farbe, Transparenz (vgl. [Büschel et al., 2014] und Abb. 12.26), Anmutung und Eleganz, Stil, Affordances, Griffigkeit und Ergonomie. Naheliegend ist, dass die Gestaltungsdimension „Material“ somit eine zentrale Rolle spielt. Döring et al. [2012] nehmen diese Materialperspektive ein und untersuchen dabei nicht nur stoffliche Materialeigenschaften, sondern auch kulturelle Materialkonnotationen in Beziehung zu den verbundenen digitalen Daten.

Auch der ikonische Charakter, die semiotische Qualität von Tokens, muss Berücksichtigung finden. So kann eine Spielfigur, wie eine Königin beim Schachspiel, äußerst konkret und realistisch mit großen Details dargestellt werden, aber auch abstrakter – wie bei vielen Schachspielen üblich – bis hin zu einer minimalistischen Formsprache oder gar abstrakten Quadern. In einer interessanten Arbeit stellen Butz et al. [2005] verschiedene Designs von TUIs zur Mediensteuerung in Wohnzimmern vor. In einem iterativen und interdisziplinären Designprozess entstanden ästhetische Lösungen für die gleichen Interaktionsaufgaben, die das – gegenüber GUIs – ungleich größere Designspektrum demonstrieren. Diese Freiheitsgrade zu meistern und nutzbringend einzusetzen, ist eine Herausforderung, die nur interdisziplinär gut bewältigt werden kann.

Nutzung von Metaphern. Eng damit verbunden ist auch die Nutzung von Metaphern. Bei einigen Ausprägungen von Tangibles wird eine Metapher sogar obsolet, weil eine – vielleicht miniaturisierte – 1:1 Version eines realen Gegenstandes, z. B. eines Gebäudes, verwendet wird und Erfahrungen damit direkt übertragen werden können. Weitaus häufiger sind Informationen oder Steuerbefehle jedoch abstrakterer Natur und Metaphern somit sinnvoll. Zum Abspielen von Filmen oder Musik z. B. wurden bei [Butz et al., 2005] Metaphern wie ein Leuchter oder eine Blume in anfassbarer Form eingesetzt. Ein anderes Beispiel ist die Tätigkeitsmetapher des Stapelns bei den STACKABLES [Klum et al., 2012, Isenberg et al., 2012], wo immer noch etwas, d. h. eine einschränkende Metadatenfacette, hinzukommt und man allein an der Höhe des Turms die Komplexität der Anfrage ablesen kann.

Oppl und Stary [2012] betrachten die richtige Auswahl geeigneter TUI-Metaphern und deren Anwendung im Kontext digitaler Lernszenarien. Groh et al. [2012] verfolgen bei der Produktion von Metaphern für be-greifbare Schnittstellen einen interessanten Ansatz, indem sie alltägliche Stoffe, Substanzen und Strukturen untersuchen. So werden u. a. Gestaltreichtum und Variabilität von Flüssigkeiten (z. B. Seife) untersucht und auf Datenstrukturen und Interaktionsaufgaben abgebildet.

Spezialisierung vs. Generalisierung. Die grundsätzliche Frage nach dem Grad der Spezialisierung von Tangibles ist uns schon mehrfach in diesem Kapitel begegnet. Und nicht nur hier, sondern auch im alltäglichen Leben, wo hoch spezialisierte Werkzeuge zwar extrem effektiv für die Erledigung einer konkreten Aufgabe einzusetzen sind, aber eben nur für diese. Für jede neue Aufgabe wäre somit ein neues Werkzeug notwendig. Spezialisierte Küchengeräte sind dafür ein vertrautes Beispiel. Bei Tangibles haben wir z. B. so generische Eingabegeräte wie die BRICKS [Fitzmaurice et al., 1995] kennengelernt, deren kubische Form sie relativ universell einsetzbar macht. Gleichzeitig geht dabei die starke Aussagekraft von spezialisierten Tangibles, wie z. B. den Gebäudemodellen bei URP [Underkoffler und Ishii, 1999], verloren. Es ist also immer ein Kompromiss zu finden bzgl. der äußeren Form und Verwendung eines Tangibles. Detaillierte und spezialisierte Ausprägungen sind in einem festgelegten und engen Kontext hervorragend geeignet (z. B. in einer Showroom-Anwendung eines Autohauses, wo ein Modellauto auf einem Tischdisplay zum Einsatz kommt), machen aber dynamische Änderungen der Assoziation zu digitalen Inhalten schwer bis unmöglich.

Ein sehr guter Kompromiss wurde beispielsweise bei den SLAPWIDGETS von Weiss et al. [2009, 2010a] erreicht. Diese Silicone Illuminated Active Peripherals (SLAP) Widgets sind dingliche Repräsentanten von GUI-Bestandteilen, also greifbare Knöpfe, Schieberegler oder Tastaturen, die aus transluzenten Materialien wie Akryl oder Silikon bestehen (Abb. 12.24). Sie können auf einem Tabletop platziert werden. Welche virtuellen Bestandteile mit ihnen gesteuert werden, lässt sich durch die darunter befindliche, durchscheinende Anzeige flexibel festlegen und dynamisch ändern. So kann bei einer Tastatur leicht die Sprache oder Anordnung der Tasten verändert werden. Ein Drehregler kann z. B. zur kontinuierlichen Eingabe von Zahlen genutzt werden oder auch zur Steuerung eines Kreismenüs. Gleichzeitig fügen diese frei platzierbaren, relativ unauffälligen Widgets einer horizontalen



Abb. 12.24: SLAP WIDGETS [Weiss et al., 2009] sind durchsichtige Tangibles, denen man dynamisch verschiedene Funktionen zuweisen kann. Im Beispiel erlaubt der gleiche Drehregler eine Menüauswahl, Werteeinstellung und Farbwahl, und einer Tastatur können verschiedene Belegungen nach Bedarf zugewiesen werden (mit freundl. Genehmigung von Malte Weiß, RWTH Aachen).

Multitouch-Oberfläche nicht nur Affordances und haptisches Feedback hinzu, sondern erlauben auch eine (teilweise) sichtfreie Bedienung [Weiss et al., 2010a]. Die TANGIBLE REMOTE CONTROLLERS [Jansen et al., 2012] gestatten dies ebenfalls und zählen auch zu den generischen an GUI-Widgets angelehnten Tangibles. Im Gegensatz zur Bedienung auf Tabletops können sie jedoch auf in der Hand gehaltenen Tablets festgesaugt und genutzt werden.

Toolkit-Unterstützung. Die Trennung in digitale und reale Bestandteile und die Möglichkeit parallelen Interagierens erfordern auch eine komplexere softwaretechnologische Realisierung von TUIs. Hier ist Unterstützung durch Toolkits notwendig, die bisher noch relativ rar sind. Es existieren Protokolle wie TUIO¹⁸ oder Software-Frameworks wie reacTIVision [Kaltenbrunner und Bencina, 2007], die das Erfassen von Position und Orientierung von Tangibles auf einem Tabletop gestatten und zudem Touch-Eingaben verarbeiten.

Im Bereich des Physical Prototypings (siehe auch Abschn. 3.7.4) gibt es inzwischen mehrere Toolkits und Ansätze, die eine schnelle Erstellung elektronischer Schaltungen und ein Zusammenwirken verschiedener Bauteile unterstützen (siehe auch S. 643). Phidgets [Greenberg und Fitchett, 2001] sind eine Forschungsentwicklung, die dann kommerzialisiert wurde. Verschiedene Eingabesensoren und Ausgabebefehlsgeber können hier auf USB-basierten Hardware-Boards zusammengestellt und zu Prototypen verbunden werden. Arduino ist eine Open Source Plattform für die Erstellung elektronischer Prototypen und interaktiver Objekte, die sich großer Popularität gerade im Bereich Tangible & Wearable Computing erfreut.

Ebenso wichtig sind Spezifikationsansätze, um die Lücke zwischen TUI-Design und -Implementierung zu schließen. In [Shaer et al., 2004] wird als Grundlage dafür das weiter oben beschriebene TAC-Framework vorgestellt, auf dessen Basis eine High-Level Beschreibungssprache für TUIs entwickelt wurde. Augenblicklich stehen hier jedoch noch keine leistungsfähigen Werkzeuge wie z. B. die deklarativen Interface-Beschreibungssprachen in der GUI-Programmierung zur Verfügung.

¹⁸ <http://www.tuio.org/>

Empirische Studien und Richtlinien. Bisher mangelt es noch an empirischen Studien im Bereich TUIs, die z. B. genauere Aussagen darüber erlauben, für welche Aufgaben oder unter welchen Umständen be-greifbare Schnittstellen Vorteile gegenüber anderen Interaktionsformen bieten. So mahnen bereits Marshall et al. [2007] an, dass sowohl theoretische Analysen als auch empirische Studien für ein besseres Verständnis von TUIs notwendig sind. Natürlich existieren diverse Arbeiten, die Einzelaspekte untersuchen oder vergleichen.

In [Jansen et al., 2012] werden z. B. physisch greifbare und virtuelle, durch Touch bediente Schieberegler auf einem in der Hand gehaltenen Tablet miteinander verglichen. Tangibles wurden gegenüber virtuellen Schieberegler deutlich bevorzugt, waren schneller zu bedienen und reduzierten die Zahl der Sichtkontakte zum Tablet, das zur Fernsteuerung einer Datenvisualisierung auf einem Wand-Display genutzt wurde. Im Kontext der Bedienung von Leitwarten vergleichen Schwarz et al. [2012] die Interaktionskonzepte Schieberegler und Drehregler sowohl in physischer als auch virtueller – per Touch und Maus bedienter – Ausprägung miteinander. Dabei untersuchten sie nicht nur die benötigte Bedienzeit, sondern auch das Erinnerungsvermögen an konkret eingestellte Werte. Diese und ähnliche Studien (z. B. [Terrenghi et al., 2008]) sind eine notwendige Grundlage für konkrete Erfahrungen zum Nutzen von Tangibles.

Während diese Beispiele sich alle auf die Einzelbedienung beziehen, weisen Marshall et al. [2007] zurecht darauf hin, dass ein besonderer Wert von TUIs in ihrer Unterstützung *kollaborativer* Aktivitäten liegt. Damit ergeben sich auch für analytische und empirische Studien komplexere Bedingungen und weiterer Forschungsbedarf. Wünschenswert wären auch Designrichtlinien, die klare Auskunft über Art und Nutzen eines TUIs in bestimmten Anwendungsfällen geben. In [Robben und Schelhowe, 2012] stellen Israel, Hurtienne und Weber beispielsweise eine interessante PIBA-DIBA Klassifikation vor (*Physical Is Better At* versus *Digital Is Better At*), indem sie die jeweiligen Besonderheiten und Vor- und Nachteile des Physischen und Digitalen kontrastieren und damit Entscheidungshilfen geben.

12.4.2 Stärken und Vorteile von TUIs

Bereits im Abschn. 12.1 und an mehreren weiteren Stellen wurde auf die Vorzüge der be-greifbaren Interaktion hingewiesen. Daher sollen die Stärken dieses Interaktionsparadigmas im Folgenden noch einmal zusammengefasst werden.

- *Dinglichkeit digitaler Informationen.* Vordergründiger Vorteil ist die dreidimensionale Dinglichkeit von Tangibles als Mittler in die digitale Welt. Tangibles machen damit interne Computerrepräsentationen sichtbar und fühlbar. Ihre Produktgestalt erlaubt den gesamten Reichtum produktsprachlicher Gestaltung, wie er z. B. aus dem Industriedesign bekannt ist.
- *Intuitive Alltagsobjekte.* Nicht nur für Interaktionszwecke hergestellte, an realen Objekten orientierte Tangibles können verwendet werden, sondern auch Alltagsobjekte selbst (die dann z. B. mit Markern versehen oder durch optische

Trackingverfahren in Lage und Position erfasst werden). Damit ist ein hoher Vertrautheitsgrad möglich, der auch ungeübten oder computerferneren Benutzergruppen einen leichten Zugang ermöglicht.

- *Taktiler Feedback.* Im Vergleich zu Touch-Interaktion auf interaktiven Oberflächen bieten Tangibles reiches taktiler Feedback. Das entspricht unseren realweltlichen Erfahrungen und erlaubt zudem eine sichere Bedienung auch mit eingeschränktem oder ohne Augenkontakt.
- *Sensorischer Reichtum.* Neben taktiler Wahrnehmung als zentraler Eigenschaft unterstützen Tangibles – im Vergleich zu virtuellen Steuerelementen – unser reichhaltiges sensorisches Repertoire. Tangibles haben Aufforderungscharakter (*Affordances*) und laden zum Angreifen, Verschieben, Drehen, Anheben etc. ein. Sie besitzen eine fühlbare Masse, Reibung und Temperatur, Plastizität und weitere fein differenzierbare visuelle Merkmale.
- *Menschliche Fähigkeiten.* Die Bedienung von TUIs profitiert in hohem Maße von unseren Alltagserfahrungen, Fähigkeiten im räumlichen Denken und motorischen Fähigkeiten im Umgang mit realen Gegenständen. Während wir Bedienhandlungen im Virtuellen oft nicht richtig einschätzen können, erlauben uns Physikkenntnisse, Kinästhesie und Körperbewusstsein sehr genaue Vorhersagen über Interaktionsresultate und ein hochgradig intuitives Vorgehen.
- *Eingabe und Ausgabe zugleich.* Genau wie bei Multitouch-Oberflächen ist bei TUIs die strikte Trennung von Ein- und Ausgabe oft aufgehoben. Beide verschmelzen durch direkte Kopplung digitaler Informationen an reale Objekte und die Doppelrolle von Tangibles als Repräsentanten digitaler Informationen.
- *Gleichzeitigkeit.* Während klassische GUIs nur eine sequenzielle Interaktion erlauben, gestatten Tangibles eine Parallelität in der Bedienung. Zwei reale Schieberegler lassen sich gleichzeitig mit beiden Händen von einem Nutzer bedienen, selbst ohne dass derjenige hinschauen müsste.
- *Kollaboration.* Die Gleichzeitigkeit gestattet natürlich auch eine gemeinsame Nutzung eines TUIs durch mehrere Personen. Entweder parallel und unabhängig voneinander oder auch kollaborativ als gemeinsame Aktivität.
- *Bedientoleranz.* TUIs sind häufig toleranter bzgl. Eingabefehlern. Während das Anklicken eines GUI-Buttons oder die Berührung einer Schaltfläche auf einem Touch-Tablet sofort eine Aktion auslöst, kann ein Tangible schnell wieder in die Ursprungsposition zurückversetzt werden. Auch Undo muss nicht in jedem Fall streng sequenziell erfolgen, sondern kann parallel oder in beliebiger Reihenfolge geschehen, wenn die Bedienung zuvor nicht zu komplex war.
- *Constraints.* Auf natürliche Weise liefern Tangibles nützliche Einschränkungen. Ein realer Schieberegler hat z. B. einen fühlbaren Anschlag nach beiden Seiten, oder zwei Gebäude in einer Stadtplanungsanwendung lassen sich zwar Seite an Seite platzieren, aber nicht ineinanderschieben.
- *Persönlichkeit.* Smartphones und andere mobile Geräte – nicht zuletzt aufgrund ihrer Vielfalt, durch farbige Hüllen und andere Accessoires – drücken die Persönlichkeit ihres Nutzers aus. Tangibles besitzen das gleiche Potenzial und erlauben eine persönliche Identifizierung mit den Eingabegeräten genauso wie Anpassungen an die eigene Persönlichkeit.

12.4.3 Nachteile und Beschränkungen von TUIs

Auch wenn die vorausgegangenen Abschnitte den Forschungszweig der Tangible User Interfaces häufig sehr positiv präsentieren, liegt es natürlich nahe, dass Beschränkungen und Nachteile ebenfalls existieren. Diese Grenzen sollen nachfolgend kurz zusammengefasst werden:

- *Spezialisierung.* Gute Tangibles sind häufig in ihrer Form, Erscheinung und Funktion spezialisiert. Wie bereits in Abschn. 12.4.1 erläutert, ist immer ein Kompromiss zwischen spezialisierten (und damit eher intuitiven) Tangibles sowie generalisierten, die breite Anwendungsmöglichkeiten haben, zu finden. Grundsätzlich reduziert die Physikalität von Tangibles ihre Flexibilität im Vergleich zu virtuellen Informationsobjekten und Steuerelementen erheblich.
- *Limitierte Anzahl.* Ebenfalls durch ihre gegenständliche Erscheinung bestimmt, muss die Anzahl von Tangibles in einem System notwendigerweise beschränkt bleiben. Eine große Zahl von digitalen Datenobjekten kann somit nur schlecht oder gar nicht physisch repräsentiert werden. Die im Abschn. 12.1.1 vorgestellte MARBLE ANSWERING MACHINE zeigt das deutlich. 30, 50 oder gar 70 Anrufe würden sich damit nicht mehr anzeigen lassen.
- *Platzproblem.* Eng mit dem Problem der beschränkten Anzahl verknüpft, verbrauchen Tangibles natürlich auch Platz. Typischerweise auf Tischen, ob es nun interaktive Displays sind oder einfach nur Ablageflächen für Tangibles aus Baukastensystemen. Selbst wenn es beim erwähnten Anrufbeantworter einen großen Vorrat an Kugeln für die Repräsentation von Anrufen geben würde, entstünde doch schnell ein erhebliches Platzproblem, das virtuelle Anzeigen nicht besitzen.
- *Skalierbarkeit.* Die meisten Tangibles haben eine fixierte, starre Form und lassen sich in Ausdehnung oder Höhe nicht dynamisch ändern. Damit sind sie auch nicht skalierbar, was ihre Verwendung vor allem in großen Informationsräumen stark einschränkt. Ein Städteplanungsmodell mit be-greifbaren Hausminiaturen (wie bei URP) wird immer auf den vorher gewählten Maßstab beschränkt sein und lässt sich nicht – wie die virtuelle Karte darunter – zoomen.
- *Ortsanpassung.* Fehlende Flexibilität weisen viele Tangibles nicht nur bzgl. ihrer Größe auf, sondern auch ihrer Position auf einem angezeigten virtuellen Informationsraum. Während sich auf einem Tabletop eine Kartendarstellung problemlos verschieben lässt, bleiben die Tangibles – wenn sie nicht aktuiert sind – an ihrer ursprünglichen Position zurück.
- *Technikaufwand.* Zwar können Tangibles auch preiswert, z. B. durch 3D-Druck, hergestellt werden. Bereits die zum Erfassen ihrer Position und Orientierung (z. B. auf einem Tabletop) oder ihrer Relation zueinander (z. B. bei Baukastensystemen) notwendige Technik ist jedoch sehr aufwändig. Erst recht bei aktuierten oder formveränderlichen Tangibles oder anderen elektronischen Erweiterungen für Spezialfunktionalität, Kommunikation oder Zustandsanzeige (Bsp. Sifteos). Das beeinflusst auch Herstellungsaufwand und Preis.

- *Verlustgefahr.* Im Gegensatz zu anderen Interaktionsgeräten besteht bei Tangibles eher die Gefahr, dass sie verloren gehen oder entwendet werden können. Für den öffentlichen Raum sind sie damit nur bedingt geeignet.
- *Begrenzte Einsatzmöglichkeiten.* Zwar haben wir eine Vielzahl von möglichen Anwendungsgebieten kennengelernt. Dennoch sind TUIs beschränkt und z. B. für typische Office-Anwendungen oder zum Schreiben von Texten weniger geeignet. Die universellen Einsatzmöglichkeiten eines Desktopcomputers mit Maus und Tastatur – zunehmend auch von Multitouch-Computern wie Tablets – besitzen sie nicht.
- *Empirischer Nachweis der Eignung.* Zwar wurden zahlreiche Forschungsarbeiten im Bereich TUI vorgestellt, nur wenige widmen sich jedoch gründlichen und belastbaren Studien, um z. B. den konkreten Nutzen und die Effizienz eines TUI für einen bestimmten Anwendungsbereich nachzuweisen oder den Vergleich mit Multitouch-Eingabe durchzuführen. Einige der existierenden Studien sind zu spezifisch auf bestimmte TUIs zugeschnitten und lassen sich schlecht verallgemeinern, andere sind hingegen zu generisch, um praktischen Nutzen daraus ziehen zu können.
- *Kommerzielle Verbreitung.* Sicherlich ist inzwischen eine hohe Reife des Forschungsgebiets erreicht, und einige kommerzielle Produkte existieren am Markt. Eine echte Massenverbreitung – wie z. B. bei Multitouch-Geräten – oder Entwicklung von „Killer-Applikationen“ hat es jedoch bisher nicht gegeben.

12.5 Aktuelle Trends

Zur Abrundung dieses Kapitels wollen wir aktuelle Trends im Bereich Tangible User Interfaces darstellen. Gerade durch die rasante Entwicklung bei mobilen Endgeräten, elektronischen Bauteilen und Baukästen, 3D-Druckern, Do-it-Yourself-Aktivitäten und ubiquitären, vernetzten Geräten gab es hier in den letzten Jahren interessante Impulse zur Weiterentwicklung dieses Fachgebiets innerhalb der Mensch-Computer-Interaktion. Und natürlich werden mit einigen Trends, wie z. B. aktuierten und formveränderlichen Tangibles, auch einige der genannten Beschränkungen bewusst adressiert.

12.5.1 Touch+Tangibles kombiniert

Bei vielen TUI-Anwendungen der Kategorie *Interaktive Oberflächen* (siehe Abschn. 12.3.1) kommen Tabletops zum Einsatz, die natürlich nicht nur horizontale Displays sind, sondern auch Multitouch-Eingabe gestatten. Damit lassen sich hybride Lösungen als Kombination der Eingabemodalitäten Touch und Tangibles realisieren. In mehreren Forschungsprojekten wurde diese Kombination angewendet, z. B. bei REACTABLE [Jordà et al., 2007] (siehe Abschn. 12.2.3) oder FACET-

STREAMS [Jetter et al., 2011] (siehe Abschn. 12.2.2). Andere Arbeiten untersuchen, welche der beiden Modalitäten (oder deren Kombination) vorteilhafter für bestimmte Aufgaben ist. So vergleichen Terrenghi et al. [2008] die Nutzung eines greifbaren Eingabegerätes mit einem rein visuellen, durch Berührung bedienten Interface zum Browsen von Fotografien auf einem Tabletop. Das Verhalten der Nutzer zeigte je nach Eingabeform verschiedene Muster und differenzierte Bewertungen. Während dreidimensionale Tangibles eine konsistente und genaue Steuerung erlauben und beidhändiges Arbeiten unterstützen, können sie jedoch auch einen gewissen Abstand zu den manipulierten Daten erzeugen, der die Nutzungsfreude reduziert.



Abb. 12.25: **Links:** Der Lenovo IdeaCentre Horizon ist ein Multitouch-PC, der auch die Eingabe mit Tangibles unterstützt – hier mit zwei sogenannten Strikern (© Lenovo 2014, mit freundl. Genehmigung). **Rechts:** Der analoge Joystick FLING als greifbares Zubehör für ein iPad (Quelle: <https://tenonedesign.com/fling>), © Ten One Design LLC 2014).

Eine hybride Nutzung von Touch und Tangibles wird auch bereits bei kommerziell verfügbaren Produkten unterstützt. So stellte die Firma Lenovo beispielsweise 2013 mit dem IdeaCentre Horizon einen Multimodus-PC für mehrere Benutzer vor. Das 27"- Multitouch-Display erlaubt neben klassischer Tablet-Funktionalität im Großformat auch die Nutzung von Tangibles für Unterhaltungs- und Lernanwendungen. Darunter sind Mini-Joysticks oder kleine Striker, die z. B. als Air-Hockey-Schläger zu verwenden sind (Abb. 12.25, links), oder auch ein elektronischer, dreidimensionaler Würfel. Bis zu vier dieser greifbaren Eingabegeräte werden gleichzeitig erkannt und erlauben somit Computerspiele für mehrere Nutzer gleichzeitig.

12.5.2 Tangibles auf Mobilien Endgeräten

Viele der interessanten TUI-Anwendungen auf Tabletops haben den Nachteil, dass nur wenigen Nutzern ein solcher interaktiver Tisch zur Verfügung steht. Der Verkauf von Multitouch-Smartphones und Tablets hingegen boomt in beeindruckender Weise. In verschiedenen Forschungslaboren wurden daher Technologien entwickelt, um

Tangibles auch auf kommerziell verfügbaren, kapazitiven Multitouch-Displays erkennen zu können. Darunter sind CAPWIDGETS von Kratz et al. [2011], TUIC von [Yu et al., 2011a] oder CAPSTONES und ZEBRA WIDGETS von Chan et al. [2012]. Häufig werden dabei leitfähige Materialien für bestimmte Markeranordnungen genutzt, und ein Körperkontakt ist notwendig. Auch aktive, durch Mikrocontroller gesteuerte Marker, die für kurze Zeit ein besonderes Berührungsmuster erzeugen oder optische Ansätze, bei denen Positionsinformationen in den dargestellten Bildschirmen kodiert und von einem lichtempfindlichen Tangible ausgelesen werden, kommen zum Einsatz.

Be-greifbare Add-ons für mobile Endgeräte, z. B. Stifte, Knöpfe, Drehregler oder Joysticks sind zu einem spannenden Thema geworden. Der analoge FLING-Joystick für iPads ist ein Beispiel für ein kommerziell verfügbares Produkt (Abb. 12.25, rechts).

12.5.3 Tangibles jenseits von kleineren horizontalen Oberflächen

Das bringt uns zu einem weiteren Trend, dem Einsatz von Tangibles auch jenseits von horizontalen Oberflächen. Während viele der haptischen Erweiterungen ein horizontal gehaltenes oder abgelegtes Tablet erfordern, ist der eben beschriebene FLING – ebenso wie die TANGIBLE REMOTE CONTROLLERS [Jansen et al., 2012] – eine adhäsive Variante. Auch anklemmbare Lösungen wie die Clip-on Gadgets [Yu et al., 2011b] wurden entwickelt, damit Tablets in typischen Haltungen, d. h. mit abgeschrägter Neigung, benutzt werden können.

Tangibles wurden auch für vertikale Wand-Displays entwickelt. Eine naheliegende Lösung ist die Nutzung von Magneten, wie bei den GECKO-Tangibles von Leitner und Haller [2011]. Allerdings sind dafür entsprechende Wandtafeln mit Aufprojektion nötig. Als flexibler für verschiedenartige Displays erweisen sich mikroskopische Saugnäpfe unter den Tangibles, wie bei den VERTIBLES von Hennecke et al. [2012]. Sowohl diese vakuumbasierte Hafttechnik als auch Magnete erlauben die Integration beweglicher Teile und somit eine Vielzahl von Interface-Widgets an Wand-Displays.

Dass Tangibles auch mit dem Fuß bedient werden können, zeigen Schmidt et al. [2014] mit KICKABLES. Dabei ist ein Display-Fußboden drucksensitiv ausgelegt und erlaubt die Eingabe über mit dem Fuß bewegte (Massage-)Bälle, die z. B. für die Interaktion mit projizierten Groß-Widgets wie Schiebereglern, Schaltern etc. genutzt werden können. Damit erlauben KICKABLES eine Fußinteraktion auf sehr großen interaktiven Oberflächen, z. B. für Museumsinstallationen.

Ein völlig von interaktiven Oberflächen losgelöster Ansatz wird im Projekt ZERON von Lee et al. [2011] verfolgt. Hier lassen sich greifbare Objekte – wie z. B. eine kleine magnetische Kugel – völlig frei im Raum platzieren. Durch ein kontrollierbares magnetisches Feld innerhalb eines definierten 3D-Volumens können in der Luft positionierte Tangibles nicht nur an der ursprünglichen Stelle schwebend

gehalten werden, sondern auch in der Luft manipuliert und bewegt werden. Im Zusammenspiel mit einer Projektion auf die Tangibles, zusätzlichen dreidimensionalen Objekten oder Displays lassen sich faszinierende Anwendungen realisieren – z. B. die greifbare Repräsentation der Sonne, die sich vom Nutzer in der Luft verschieben lässt, um virtuelle Schatten für eine Gebäudeminiatur zu erzeugen.

12.5.4 Größerer Ausdrucksreichtum

Bereits bei den im Abschn. 12.3.1 beschriebenen TUI-Klassen ist die wachsende Vielfalt von Tangible-Lösungen jenseits der auf einem Tabletop benutzten 3D-Objekte deutlich geworden. Kontinuierliche und formbare Schnittstellen sind Beispiele dafür. Aber auch bei den eher klassischen Tabletop-TUIs gibt es interessante Varianten, darunter höhenanpassbare Tangibles wie die von Mi und Sugimoto [2011] vorgestellten HATs (Height-Adjustable Tangibles) oder stapelbare Tangibles. Dazu zählen z. B. das LUMINO-System [Baudisch et al., 2010], bei dem Glasfaserbündel in den Tangibles die Nutzung des optischen Tabletop-Trackings zum Erkennen von Stapeln erlauben, die im Abschn. 12.2.2 beschriebenen STACKABLES [Klum et al., 2012, Isenberg et al., 2012] zur kollaborativen, facettenbasierten Informationssuche oder CAPSTONES [Chan et al., 2012] auf kapazitiven Displays.

Andere Ansätze versuchen, das haptische Feedback von Tangibles dynamisch zu beeinflussen, so z. B. bei den HAPTIC PROPS von Valkov et al. [2013]. Auch weitere physikalische Eigenschaften, wie Reibung, empfundene oder tatsächliche Masse und Volumen lassen sich beeinflussen, wie z. B. von Weiss et al. [2011a] oder Niyama et al. [2013] gezeigt wurde. Dass dazu nicht immer aufwändige technische Lösungen, wie elektronisch gesteuerte Flüssigmetallpumpen, notwendig sind, demonstrieren Corsten et al. [2013] mit FILLABLES, einfachen Alltagsgefäßen, die sich mit Flüssigkeiten unterschiedlich hoch befüllen lassen und somit ihre Eigenschaften verändern.

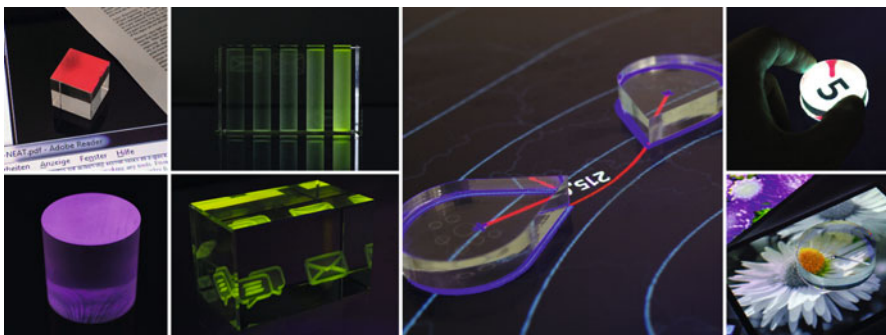


Abb. 12.26: Beispiele für transparente und transluzente Tangibles, die in [Büschel et al., 2014] erläutert und systematisiert werden.

Tangibles können auch völlig transparent oder transluzent gestaltet werden und erlauben durch verschiedenste Größen und Formfaktoren vielfältige Einsatzszenarien, gerade auch in Kombination mit selbstleuchtenden Displays wie Tabletops (Abb. 12.26). Die Übersichtsarbeit von Büschel et al. [2014] analysiert existierende Lösungen und stellt neuartige Konzepte für TUIs mit transparenten Objekten vor.

12.5.5 Smarte und Augmentierte Objekte

Bereits 1995 diskutierten Rekimoto und Nagao [1995], reale Umgebungen für die MCI zu augmentieren, statt nur mit einem Desktop-Computer zu interagieren. Mit NAVICAM schlugen sie ein portables Endgerät vor, das je nach Umgebungskontext dem Videobild der realen Umgebung Texte oder andere Informationen überlagern konnte. Auch aktuelle mobile Geräte, wie Smartphones und Tablets, die zur Einblendung von Informationen genutzt werden können, folgen diesem Paradigma der augmentierten Interaktion über ein Gerät. Noch unmittelbarer ist jedoch eine Interaktion mit Alltagsobjekten, die digital augmentiert werden. Das können einerseits smarte Geräte sein, z. B. Alltagsgegenstände mit digitalem Innenleben bzw. Internetzugang. Beispiele sind echte Bilderrahmen mit wechselndem Inhalt oder smarte Lichtobjekte, die Wetterprognosen über ihre wechselnde Farbigkeit als ambiente Information bereitstellen. Andererseits erlauben projektive Lösungen die Überlagerung digitaler Informationen auf gewöhnliche Alltagsgegenstände, z. B. durch mobile Picoprojektoren oder bewegliche Raumprojektionslösungen (siehe Kasten Geisterklavier). Damit kann die dingliche und produktsprachliche Qualität dieser normalen Gegenstände voll genutzt werden, und Tangibles sind keine spezialisierten Interaktionsobjekte mehr, die extra entworfen und gebaut werden müssen. Da anzunehmen ist, dass sehr viele Alltagsobjekte künftig auf die eine oder andere Weise digitale Informationen empfangen, anzeigen oder senden können, werden viele Konzepte des Tangible Computings in unsere realen Arbeits- und Lebenswelten integriert werden (vgl. auch die aktuellen Trends des *Internets der Dinge* und der *cyber-physikalischen Umgebungen*).

Augmentierte Alltagsgegenstände – Ein Geisterklavier. Im Projekt MIRRORFUGUE am MIT Media Lab nutzen Xiao und Ishii [2011], Xiao et al. [2013] ein selbst spielendes Klavier, um ein musikalisches Zusammenspiel jenseits von Raum und Zeit zu ermöglichen. Dazu wird zunächst von einem elektrischen Klavier aufgezeichnet, was ein Musiker spielt. Gleichzeitig wird der Klavierspieler aus der Vorderansicht und Draufsicht der Hände gefilmt. Damit lässt sich später das aufgezeichnete Spiel automatisch wiedergeben, während das Video des Musikers auf das Notenpult projiziert wird und parallel dazu dessen Hände auf die Klaviatur (Abb. 12.27). Da sich die Tasten eines automatischen Klaviers von selbst bewegen, entsteht hier ein geisterhaftes Spiel. Gleichzeitig kann ein Musiker natürlich auch ganz normal dazu spielen.



Abb. 12.27: Beim Projekt MIRRORFUGUE [Xiao et al., 2013] gibt ein selbst spielendes Klavier die Aufzeichnung des vorher Gespielten inklusive zweier Videoprojektionen von Händen und Gesicht wieder, ohne dass eine Person anwesend sein müsste. Gleichzeitig kann sich jedoch ein Musiker dazusetzen und z. B. Duette mit seinem virtuellen Mitmusiker spielen – hier ist Marvin Minsky als aufgezeichneter Pianist zu sehen (mit freundl. Genehmigung von Xiao Xiao, MIT Media Lab).

Also z. B. ein vierhändiges Stück, wobei einer der Pianisten rein virtuell über die Aufzeichnung mitwirkt. Bei einer Echtzeitübertragung ist sogar ein realistisches Zusammenspiel mit entfernten Musikern möglich. Aber es ist auch denkbar, die Zeitgrenzen zu überwinden und mit sich selbst als Kind oder mit den eigenen Großeltern nach Jahrzehnten Musik zu machen. Die durch die 1:1-Größe der Videoprojektionen und das wiedergegebene mechanische Spiel gefühlte Präsenz eines anderen Menschen erlaubt ungewöhnliche Emotionen und sehr persönliche musikalische Begegnungen. Rein technisch handelt es sich nicht nur um ein augmentiertes und smartes Alltagsobjekt, sondern auch um ein aktuiertes Tangible in Form einzelner beweglicher Tasten.

12.5.6 Aktuierte Tangibles und Oberflächen

Bereits am Anfang dieses Kapitel haben wir ein Schachspiel als Motivation für Tangle Computing erwähnt. Schachcomputer besitzen natürlich visuelle Anzeigen, bieten aber häufig kein automatisches Ziehen realer Schachfiguren gemäß der internen Logik – ein Problem, das auch viele Tangibles besitzen (siehe Abschn. 12.4.3). Bereits Anfang der 1980er Jahre entwickelte die Firma *Milton Bradley* einen Schachcomputer *Phantom*,¹⁹ der auch in Deutschland ab 1983 unter dem Namen MILTON verkauft wurde (Abb. 12.28). Über einen Plotter-artigen Mechanismus werden die mit Magneten versehenen realen Schachfiguren über das Spiel-

¹⁹ http://www.chesscomputeruk.com/html/milton_bradley_phantom.html



Abb. 12.28: Der Phantom-Schachcomputer von Milton Bradley. Neben berührungsempfindlichen Teilen des Spielfelds ist die Besonderheit das automatische Ziehen (und Schlagen) der Schachfiguren mit Hilfe eines elektromagnetischen Systems.

feld gezogen. Auch Touch-Eingabe ist vorhanden, wenn auch kein größeres aktives Display genutzt wird. Dennoch kann dieser Schachcomputer als einer der frühesten Tabletops mit aktuierten Tangibles für einen Spezialzweck bezeichnet werden.

Jenseits dieser Speziallösungen war es natürlich das Ziel, Tangibles auch auf vielfältig verwendbaren Tabletops bewegen zu können. So sollte z. B. ein Gebäudemodell automatisch verschoben werden können, wenn die zugrunde liegende Karte bewegt wird (wobei es unerheblich ist, ob dies durch Touch-Interaktion oder programmgesteuert geschieht). Eines der frühen Systeme war die *actuated workbench* von Pangaro et al. [2002]. Auch hier werden Magneten unterhalb eines Tisches genutzt, um Objekte automatisch in zwei Dimensionen zu verschieben. Da eine Matrix von Elektromagneten verwendet wird, lassen sich Objekte relativ frei in stückweise linearen oder interpolierten Bewegungsbahnen verschieben.

Spätere Erweiterungen, wie die von Weiss et al. [2010b] vorgestellten MAGNETS, erlauben nicht nur eine Veränderung der Orientierung zusätzlich zur Position, sondern auch die Aktuierung komplexer Tangibles, die aus mehreren beweglichen Teilen bestehen. Durch die Nutzung einer Matrix von Glasfasern zusätzlich zu den Elektromagneten lassen sich über visuelles Tracking auch Objektpositionen und Touch-Eingaben erkennen, womit ein sehr flexibles System zur Verfügung steht.

Während diese Ansätze alle ein aufwändiges Technikinstrumentarium im Tisch benötigen, setzen weitere Entwicklungen auf die *autonome Selbstbeweglichkeit* von Tangibles. Sie arbeiten als Miniatur-Roboter, die sich z. B. von außen über Funk- oder Infrarotschnittstelle steuern lassen. Beispiele sind die TANGIBLE BOTS von Pedersen und Hornbæk [2011] oder TOUCHBUGS von Nowacka et al. [2013]. TANGIBLE BOTS sind motorisierte Tangibles, die interessante Interaktionstechniken erlauben, z. B. die durch nur eine Hand gesteuerte, gleichzeitige Kontrolle mehrerer Tangibles auf einem Multitouch-Tisch (Abb. 12.29). TOUCHBUGS sind deutlich

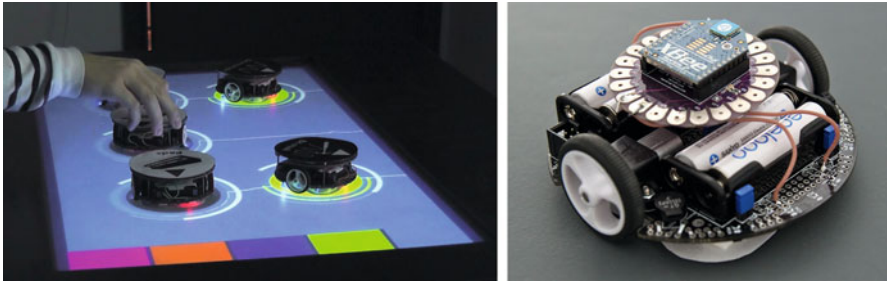


Abb. 12.29: TANGIBLE BOTS [Pedersen und Hornbæk, 2011] sind motorisierte Tangibles für einen Multitouch-Tisch, mit denen sich z. B. elektronische Musik machen lässt. Gut zu erkennen ist der technische Aufwand, der für Aktuierung, Steuerung und Kommunikation betrieben werden muss (mit freundl. Genehmigung von Esben Pedersen, Universität Kopenhagen).

kleiner und bewegen sich durch Vibrationsmotoren auf einem Multitouch-Tisch fort, wobei Infrarot-LEDs auch eine Kommunikation mit dem Tisch und sogar autonomes Verhalten ermöglichen.

Wenn Tangibles aktuiert sind, kommt zu den im Abschn. 12.1.3 diskutierten doppelten Feedback-Schleifen bei GUIs noch eine dritte hinzu (vgl. Abb. 12.6 auf Seite 639). In der ersten Schleife erhält man unmittelbares taktiles Feedback am Tangible, in der zweiten Schleife audiovisuelles, computergeneriertes Feedback (analog zu GUIs) und schließlich parallel dazu in einer dritten Schleife Feedback durch unmittelbare Aktuierung des Tangibles, das somit zu einem taktilen Display wird. Der Übersichtsartikel von Poupyrev et al. [2007] bietet einen systematischen Überblick zu aktuierten User Interfaces und schließt dabei auch formveränderliche Displays ein.

12.5.7 Formveränderliche Oberflächen und Tangibles

Aktuierung muss nicht auf einzelne Objekte beschränkt bleiben, sondern kann auch für eine gesamte Oberfläche geschehen, die sich dynamisch verändert. Das von Blackshaw et al. [2011] vorgestellte RECOMPOSE ist eine komplett *aktuierte, begreifbare Oberfläche*, deren physische „Pixel“ sich in ihrer Höhe schnell ändern können (Abb. 12.30). Durch zusätzliche Projektion von oben lassen sich damit beinahe dreidimensionale Oberflächen verschiedenster Gestalt erzeugen. Handgesten, die mit Hilfe einer darüber angebrachten Tiefenkamera erfasst werden, können zur indirekten Steuerung des 2,5D-Displays genutzt werden. Aber auch eine direkte Interaktion mit den kleinen Pixelquadraten der Oberfläche ist durch Drücken oder Herausziehen möglich.

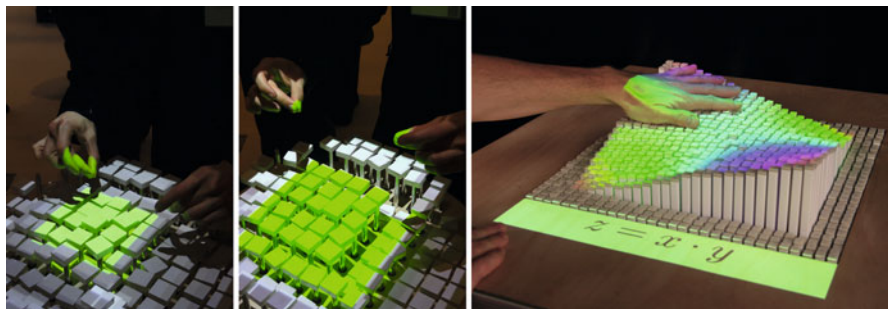


Abb. 12.30: RECOMPOSE [Blackshaw et al., 2011] (links) ist eine aktuierte Oberfläche, die durch mit einer Kinect erfasste gestische Eingaben gesteuert werden kann. Ein Projektor erlaubt die Anzeige von Feedback oder anderen Inhalten. Analoge Funktionalität bietet INFORM [Follmer et al., 2013], jedoch mit deutlich höherer Auflösung und hoher „Bildwiederholrate“ (rechts, mit freundl. Genehmigung von Hiroshi Ishii, Tangible Media Group | MIT Media Lab).

Ein aktuelles Beispiel wurde mit dem System INFORM von Follmer et al. [2013] vorgestellt. Das System ähnelt RECOMPOSE und besitzt ebenfalls eine Projektion von oben sowie eine KINECT-Tiefenkamera zur Erfassung von Handbewegungen. Es weist aber eine signifikant reduzierte Pixelgröße auf, hat eine deutlich höhere Pixelzahl von 900, wobei jedes aktuierte Pixelquadrat sich sehr schnell in der Höhe verändern kann. Damit lassen sich dreidimensionale Reliefformen glaubwürdig und in dynamischer Veränderung anzeigen. Da es sich um ein räumliches 2,5D-Display (wenn auch noch etwas verpixelt) handelt, das man auch berühren kann, sind die Anwendungsmöglichkeiten vielfältig. Darunter sind mathematisches Lernen (Abb. 12.30, rechts), Geografische Informationssysteme (z. B. Terrainmodelle), Städteplanung, schnelles 3D-Objektdesign und CAD (als Alternative zu langwierigem – wenn auch deutlich besser aufgelöstem 3D-Printing).

Während die beiden genannten Beispiele aktuierte, be-greifbare Oberflächen realisieren, hat eine Entwicklung hin zu *formveränderlichen Tangibles*, die sich dynamisch an Kontext und digitale Inhalte anpassen, gerade erst vor wenigen Jahren begonnen. So setzen Yao et al. [2013] bei PNEUI weiche komposite Materialien ein, die pneumatisch aktuiert werden, um die Form eines Objektes zu verändern. Während damit die Form als Ausgabekanal fungiert, erlauben diese Tangibles auch eingabeseitig durch eingebaute Elektronik und Flüssigmetalle das Erfassen von gestischen Eingaben und Deformationszuständen (Abb. 12.31).

Denkt man die Entwicklung beweglicher, form- und größenveränderlicher Objekte konsequent weiter hin zu dynamischen Materialien, die relativ flexible Veränderungen realer Gegenstände gestatten, gelangt man zu der von Ishii et al. [2012] proklamierten Vision der *Radical Atoms*. Um bei der in Abschn. 12.1.3 vorgestellten Eisberg-Metapher im Meer digitaler Informationen zu bleiben, erlauben grafische Benutzungsschnittstellen nur den Blick auf und unter die Wasseroberfläche (*Painted Bits*), während mit TUIs ein physischer, dinglicher Teil des Informations-Eisbergs

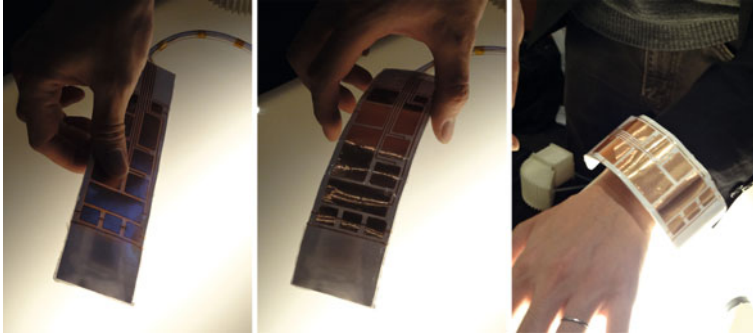


Abb. 12.31: PNEUI [Yao et al., 2013] sind Objekte aus weichen Materialien, die sich pneumatisch aktuierten lassen und gleichzeitig Touch- und Deformationseingaben erfassen. Im Bild ist ein Prototyp eines formveränderlichen Smartphones dargestellt, links als flaches Gerät, in der Mitte automatisch gebogen, um einen eingehenden Anruf anzuzeigen, und rechts als Armband, das sich automatisch um das Handgelenk schließt.

hinausragt, den man sehen, fühlen und be-greifen kann (*Tangible Bits*). Dieser ist jedoch – je nach Balance zwischen greifbar-realer und visuell-digitaler Information – relativ klein. Bei der Vision der Radical Atoms ragt hingegen der größte Teil des Eisbergs aus dem Wasser, das heißt, digitale Informationen manifestieren sich größtenteils in materieller Erscheinung, mit der wir direkt interagieren können. Neuartige Materialien, Nanotechnik, eine generelle Miniaturisierung elektronischer und anderer Bauteile und andere werkstoffwissenschaftliche Entwicklungen befeuern diese Vision. In der TUI-Forschung erleben wir somit eine Entwicklung von statischen und passiven Tangibles hin zu kinetischen und aktiven, die sich sehr dynamisch an digitale Informationsänderungen anpassen können.

12.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir Tangible User Interfaces als interessante Strömung im Bereich möglichst natürlicher Mensch-Computer-Interaktion näher beleuchtet. Sie berücksichtigen Physikalität, Dinglichkeit und menschliche Alltagserfahrungen für eine verbesserte Interaktion mit digitalen Informationen und machen sie damit leichter be-greifbar. TUIs lassen sich damit in das von Jacob et al. [2008] eingeführte *Reality-based Interaction* Framework einordnen. Die meisten TUIs nutzen unser Grundverständnis von Physik, einfaches Körperbewusstsein, unsere Fähigkeit zum Greifen und Manipulieren physischer Objekte sowie grundlegende soziale Fähigkeiten, wie z. B. die gemeinsame Nutzung von Tangibles, aus [Shaer und Jacob, 2009]. Tangible User Interfaces sind relativ gründlich erforscht, das Anwendungsspektrum ist groß, und einige kommerzielle Entwicklungen und Produkte existieren

und finden Anwendung. Die gerade dargestellten Trends deuten auf eine dynamische Weiterentwicklung dieses Bereiches hin, der zunehmend mit anderen Formen der MCI verschmelzen wird. Allein die Kombination mit Multitouch-Technologien macht diese Entwicklung deutlich.

Verwandte MCI-Forschungsbereiche. TUIs lassen sich also nicht immer scharf von anderen Gebieten moderner Mensch-Computer-Interaktion abgrenzen. Der von Kato et al. [2001] eingeführte Begriff *Tangible Augmented Reality* bezieht sich z. B. auf traditionelle Augmentierungen der Realität durch See-Through- oder Videotechniken, die jedoch mit Tangible Interaction auf der Eingabeseite kombiniert werden. Virtuelle Objekte sind an physische Objekte, z. B. Bücher, gebunden, die Nutzer dann manipulieren [Shaer und Hornecker, 2010].

Embodied Interaction [Fishkin et al., 2000] trägt der Tatsache Rechnung, dass Computerfunktionalität zunehmend in reale Geräte und Apparate integriert ist. Der manuellen Interaktion mit dem Äußeren dieser Geräte kommt neben der virtuellen Funktionalität dabei eine wichtige Rolle zu. Am Beispiel eines Smartphones wird das deutlich, bei dem die Interaktion beinahe ausschließlich über Touch-Funktionalität auf dem Bildschirm erfolgt. Warum sollte das Gehäuse bzw. das gesamte Gerät nicht auch direkt einbezogen werden, z. B. gedrückt, geschüttelt, gebogen, geneigt oder umgedreht werden, um mit virtuellen Inhalten zu interagieren [Fishkin et al., 2000]? Somit stellt *Embodied Interaction* eine Spezialform eines TUIs dar, wo nur ein physisches Eingabeobjekt genutzt wird, was jedoch verschiedene Bedienelemente besitzen kann [Shaer und Hornecker, 2010].

Tangibles können in organischer Weise ihre physikalischen Eigenschaften verändern (Form, Volumen, Masse, Reibung...) und zählen damit auch zu den sogenannten *Organic User Interfaces*, können sich selbst bewegen bis hin zu relativ autonomen Robotern (*Human-Robot Interaction*) oder zu komplexen Formen – wie bei Baukastensystemen und Spielzeug – zusammengebaut werden. Sie finden Einsatz auf horizontalen Tabletops, vertikalen Display-Wänden, mobilen Endgeräten, völlig ohne Displays oder besitzen selbst kleine Displays, womit es deutliche Bezüge zum Bereich *Interactive Tabletops und Surfaces* oder auch *Surface Computing* gibt.

Da augmentierte und sensorisch erweiterte Alltagsgegenstände auch durch ihre mobile Nutzung (*Mobile Computing*) und die Integration in Alltagsszenarien zunehmend die von Weiser [1991] beschriebene Vision des *Ubiquitous Computings* erfüllen, haben Tangibles auch starke Berührungspunkte mit dem *Internet der Dinge*. Insofern soll dieses Kapitel zu Tangible User Interfaces mit dieser breiten Perspektive auf weitere Formen moderner, möglichst natürlicher und realitätsbezogener Mensch-Computer-Interaktion gleichzeitig auch ein Abschluss dieses Buchteils und insgesamt des zweiten Bandes *Interaktive Systeme* sein.

Wenn die Grenzen des Realen und Digitalen verschwimmen. Realität und materielle Objekte werden zunehmend

- mit digitaler Information gekoppelt und vernetzt sein,
- durch digitale Bestandteile augmentiert und ergänzt sein,
- in ihrer Form, Erscheinung und Lage dynamisch modifiziert, animiert und aktiviert werden.

Roboter sind nur ein – besonders gut nachvollziehbares – Beispiel für diesen Trend. Dazu kommt die im vorigen Kapitel beschriebene Entwicklung, dass vielfältigste Displays in allen Formfaktoren, Größen, planaren und nicht-planaren Ausprägungen bzw. auch nur als Projektionen nahtlos in unsere Lebens- und Alltagswelten integriert sein werden. Das Spektrum an Interaktionsformen und -modalitäten wird dabei zunehmend reich sein, wobei Erfahrungen und Fähigkeiten aus unserem menschlichen Alltag berücksichtigt und integriert sein werden. Schließlich wird es neben der beschriebenen, zunehmend digitalen Durchdringung unserer Umgebung auch Veränderungen unseres Körpers selbst geben.

Was für reale Objekte und Umgebungen beschrieben wurde – integrierte Anzeigen, Aktuierung, Vernetzung, Augmentierung durch digitale Informationen – wird auch Einzug in unseren Körper finden. Zunächst nur in Form des *Wearable Computing*s, also in Kleidung, Schmuck, Brillen oder in andere Accessoires integrierte Computerfunktionalität. Brain Computer Interfaces, die Nutzung der Muskeln zur Eingabe (z. B. [Saponas et al., 2009]), die Simulation haptischer Empfindungen (z. B. durch direkte Muskelstimulation [Lopes und Baudisch, 2013] und an unser Nervensystem direkt angeschlossene Prothesen oder Implantate zeigen jedoch eine weitergehende Beeinflussung des Körpers. Digitale Information – ob visuell, taktil oder akustisch – wird also nicht mehr nur von außen über unsere Sinne wahrgenommen, sondern körperintern generiert. Die 2010 ins Leben gerufene Konferenz *Augmented Human*²⁰ greift diesen Trend auf und befördert ihn weiter. Aus den unmittelbar erkennbaren Gefahren des Informationsmissbrauchs, der (Fremd-)Manipulation von Geist und Körper, medizinischer Konsequenzen und sozialer wie gesellschaftlicher Veränderungen ergeben sich auch sehr deutliche Konsequenzen. Auch als Forscher und Praktiker im Bereich Mensch-Computer-Interaktion sind wir zunehmend aufgefordert, einer ethischen Verantwortung gerecht zu werden und sorgfältig abzuwägen, wo künftige Technologien tatsächlich nutzbringend sind oder im Extremfall drohen, Menschen zu entmündigen.

Weiterführende Literatur. Dieses Kapitel enthält bereits zahlreiche Literaturreferenzen auf einzelne Projekte sowie Überblicksarbeiten zu bestimmten Bereichen. Vertiefende Informationen lassen sich in zwei Monografien zu TUIs finden. Das ist einerseits das englischsprachige und sehr gelungene Buch „Tangible User Interfaces: Past, Present, and Future Directions“ von ORIT SHAER und EVA HORNECKER [Shaer und Hornecker, 2010], das einen gründlichen und gleichzeitig überschaubaren Überblick zum Thema bietet. Andererseits ist es das von BERNARD ROBBEN und HEIDI SCHELHOWE herausgegebene deutschsprachige Buch „Begreifbare Interaktionen. Der allgegenwärtige Computer: Touchscreens, Wearables, Tangibles und Ubiquitous Computing“ [Robben und Schelhowe, 2012]. Hierin werden in Beiträgen mehrerer Autoren – vor allem aus dem deutschsprachigen Raum – interessante Perspektiven auf das Thema Tangible Interaction eingenommen. 2012 erschien auch eine von Hornecker et al. [2012] herausgegebene Sonderausgabe der Zeitschrift *i-com* zum Thema „Be-greifbare Interaktion“, die einen gelungenen Querschnitt der Forschungsarbeiten deutscher Forscher in diesem Bereich darstellt.

²⁰ <http://www.augmented-human.com/>

Nach verschiedenen Workshops zum Forschungsbereich TUI wurde im Jahre 2007 eine erste Konferenz begründet, die vollständig dem Thema Tangible Interaction gewidmet ist. Die internationale *ACM Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI)*²¹ findet seitdem jährlich mit deutlich wachsenden Beitragszahlen statt und hat sich als zentrale Konferenz in diesem Spezialbereich der Mensch-Computer-Interaktion etabliert. Aber auch auf wichtigen MCI-Konferenzen, wie der ACM CHI, der ACM UIST und der ACM ITS werden immer wieder aktuelle Forschungsbeiträge zum Thema publiziert.

Dass Tangible Interaction auch unter deutschen Forschern ein wichtiges Thema ist, zeigt die Gründung der Fachgruppe *Be-greifbare Interaktion*²² innerhalb des Fachbereichs Mensch-Computer-Interaktion der Gesellschaft für Informatik. Die aktive Fachgruppe trifft sich ein- bis zweimal jährlich mit spezifischen Schwerpunkten, zum Beispiel auf der Tagung „Mensch und Computer“ und bietet damit deutschsprachigen Mitgliedern der internationalen Tangible and Embedded Interaction Community eine Plattform für Wissensaustausch und Zusammenarbeit.

Gegen Ende dieses Buchs soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass natürlich die vielfältigen Originalartikel im Bereich Mensch-Computer-Interaktion eine wesentliche Quelle für das persönliche Literaturstudium sind. So hat der Fachbereich Mensch-Computer-Interaktion (FB MCI) der Gesellschaft für Informatik eine Digitale Bibliothek, die MCI Digital Library²³, entwickelt. Während die Recherche in einschlägigen deutschen Publikationen wie den i-com Journalen oder der Tagung Mensch & Computer frei für alle Interessenten möglich ist, steht Mitgliedern des Fachbereichs auch der Download der PDF-Dateien zur Verfügung. Analog verhält es sich mit der ACM Digital Library²⁴, der weltweit führenden internationalen Bibliothek im Bereich MCI. Da Beiträge sämtlicher Spitzenkonferenzen (wie der ACM CHI oder UIST), von MCI-Spezialkonferenzen (wie der ACM Tangible & Embedded Interaction oder Interactive Tabletops & Surfaces) sowie aller Top-Journale und Transactions in diesem Fachgebiet (z. B. Transactions on Computer-Human Interaction) hier recherchierbar und verfügbar sind, kann diese Bibliothek als die ultimative Quelle der Recherche angesehen werden.

Schließlich kann man zur Lektüre auch die äußerst umfangreiche und online verfügbare²⁵ Enzyklopädie der Mensch-Computer-Interaktion sehr empfehlen, in der von führenden MCI-Wissenschaftlern einführende Kapitel zu verschiedensten auch in diesem Buch behandelten Themen und Aspekten frei verfügbar sind.

²¹ <http://www.tei-conf.org/>

²² <http://be-greifbar.de/>

²³ <http://dl.mensch-und-computer.de/>

²⁴ <http://dl.acm.org/>

²⁵ <http://www.interaction-design.org/books/hci.html>

Abschließende Gedanken. Die Kapitel dieses Buchteils und auch jenes zu 3D User Interfaces haben eine Reihe sehr spannender Entwicklungen in der Mensch-Computer-Interaktion aufgezeigt. Weit zurück liegt die Beschränkung auf grafischen Benutzungsschnittstellen, die allein mit Maus und Tastatur bedient werden. Das heißt weder, dass diese Schnittstellen für zahlreiche Aufgaben nicht nach wie vor die effektivste Form der Interaktion böten, noch, dass dreidimensionale und natürliche Benutzungsschnittstellen bereits so ausgereift und universell einsetzbar wären, dass sie GUIs überhaupt vollständig ablösen *könnten*.

Und das soll auch nicht das Ziel sein, wie Buxton [2007b] treffend beschreibt „Jede Eingabetechnik ist besser für eine Aufgabe geeignet und gleichzeitig schlechter für eine andere. Die Kunst ist es zu wissen, welche Technik wofür, wann, für wen und unter welchen Umständen geeignet ist und auch, warum das so ist.“ Wir hoffen, in diesem Buch einige Beiträge zu diesem Wissen geleistet zu haben, auch wenn sich nicht immer einfache Rezepte oder Empfehlungen formulieren lassen. Erst mehrere Jahre der Entwicklung und Etablierung von modernen Interaktionsformen der MCI werden auch klare Richtlinien hervorbringen, wie wir sie beispielsweise für grafische Benutzungsschnittstellen behandelt haben.

Verschiedenste, teils multimodale Interaktionsformen werden künftig gemeinsam existieren und die Bedienung von in unsere Umgebungen und Produkte integrierte Computerfunktionalität erleichtern und natürlicher gestalten. Bisherige Entwicklungen waren häufig an technologischen Innovationen und den Formfaktoren, Komponenten und Interaktionsschritten der neuartigen User Interfaces orientiert. Künftig werden wir zunehmend die Entwicklung interaktiver Dienste erleben, von Designrichtlinien und -modellen sowie eine konsequente Ausrichtung an der User Experience [Schmidt und Churchill, 2012]. Auch die Bewertung verschiedenartiger Interaktionstechnologien und damit einhergehend die Entwicklung eines Verständnisses, welche Interaktionsformen für eine gegebene Aufgabe in einem bestimmten Kontext mit einer bestimmten Gerätekonfiguration für einen bestimmten Benutzer die sinnvolle und ideale ist, wird eine zentrale Aufgabe der kommenden Jahre sein.