

Neuartige Display-Umgebungen zur intuitiven Datenvisualisierung

Raimund Dachzelt ¹

Abstract: Interaktive Datenvisualisierung spielt eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, Menschen Zugang zu immer komplexeren Daten zu ermöglichen, sie zu explorieren, zu analysieren und Erkenntnisse zu gewinnen. Die Vielfalt der Anwendungen reicht von persönlicher Datenvisualisierung auf mobilen Endgeräten bis hin zur kollaborativen Analyse komplexer wissenschaftlicher Daten in 3D-Umgebungen. Während früher Visualisierungen häufig am Schreibtisch mit Maus und Tastatur durch Experten genutzt wurden, stehen nun neuartige Display-Umgebungen und multimodale Interaktionsformen zur Verfügung, die eine intuitive Datenvisualisierung für viele ermöglichen. Der Beitrag diskutiert das Potenzial derartiger Visualisierungsumgebungen und mit ihnen verbundener Herausforderungen. Die kleine Systematik umfasst Datenvisualisierungen auf mobilen Endgeräten, auf Wanddisplays, in Multi-Device-Ensembles, mit immersiven Displaytechnologien (Immersive Analytics) und als dingliche Artefakte (Data Physicalization). Es wird jeweils auf weiterführende Literatur verwiesen, und einige am Interactive Media Lab Dresden entstandene Beispiellösungen zur intuitiven Datenanalyse illustrieren diese Visualisierungsumgebungen.

Keywords: Informationsvisualisierung, Multi-Display Environments, Mobile Datenvisualisierung, Immersive Analytics, Data Physicalization, Data-driven Storytelling

1 Einleitung

Mit der erheblichen Zunahme an Informationen und Daten und deren weltweiter Verfügbarkeit wächst das Bedürfnis, sie in menschlich verständliche Formate und Zusammenhänge zu bringen und für vielfältige Zwecke zu nutzen. Visualisierungen spielen dabei eine wichtige Rolle, weil sie komplexe und oft abstrakte Daten in verständlicher visueller Form präsentieren. Das können einfache Balken-, Linien- oder Streudiagramme sein, Node-Link-Diagramme für Bäume und Netzwerke, Kartenvisualisierungen mit georeferenzierten Daten, aber auch Dashboards oder komplexere Anwendungen mit mehreren Visualisierungsansichten, die verschiedene Perspektiven auf Daten eröffnen und sie interaktiv erfahrbar machen. Die menschliche Interaktion mit Visualisierungen auf möglichst intuitive Weise ist von zentraler Bedeutung, um Daten analysieren zu können, einen Überblick zu erhalten, Zusammenhänge, Abhängigkeiten und Muster zu erkennen oder Daten verschiedener Zeitpunkte miteinander zu vergleichen.

Interaktive Datenvisualisierung war lange Zeit Expert:innen vorbehalten und diente rein analytischen Zwecken, wofür vorrangig traditionelle Computer mit Bildschirm, Maus und

¹ Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Interactive Media Lab Dresden, 01062 Dresden, und Zentrum für taktiles Internet mit Mensch-Maschine-Interaktion (CeTI), Technische Universität Dresden, raimund.dachzelt@tu-dresden.de,  <https://orcid.org/0000-0002-2176-876X>

Tastatur an Büroarbeitsplätzen genutzt wurden. Dies hat sich grundlegend gewandelt, wobei zunächst der unglaubliche Siegeszug von mobilen Endgeräten, aber auch die Entwicklung anderer Formfaktoren, wie Smartboards oder großer Wanddisplays, und in den letzten Jahren auch die Verfügbarkeit kommerzieller Mixed-Reality-Brillen für die Darstellung dreidimensionaler Objekte und Welten wesentlich beigetragen haben. Auch das World Wide Web mit seinen inzwischen leistungsfähigen multimedialen Möglichkeiten hat zu einer Demokratisierung der Nutzung von Datenvisualisierungen erheblich beigetragen. So werden z.B. Wahlergebnisse schon lange nicht mehr nur als statische Bilder in Zeitungen gedruckt, sondern sind in aufwändigen interaktiven Onlinevisualisierungen für alle vernetzten Menschen erfahrbar. Und Journalist:innen entwickeln komplexe, teils interaktive Data Stories, bei denen Daten auf emotional ansprechende Weise thematisch in Bezug gesetzt und vermittelt werden.

Die Nutzung und Visualisierung ganz persönlicher Daten, z.B. über sportliche Aktivitäten, die eigene Gesundheit oder das Schlafverhalten, hat nicht zuletzt durch Fitnessarmbänder, Smartwatches und Handys enormen Zuspruch erhalten – allein die Zahl der Apps in diesem Bereich ist kaum noch überschaubar. Somit stellt sich auch die Frage, wie derartige Visualisierungen intuitiv für möglichst viele Menschen nutzbar gemacht werden können und welche Interaktionsformen dafür notwendig sind, wenn Maus und Tastatur ungeeignet oder gar nicht mehr verfügbar sind.

Dieser vortragsbegleitende Beitrag soll einen kurzen, notwendigerweise unvollständigen Überblick sowie einige Impulse anhand aktueller Entwicklungen und eigener Forschungsarbeiten des Interactive Media Labs der Technischen Universität Dresden geben.

2 Neuartige Visualisierungsumgebungen – eine kleine Systematik

Traditionell werden Desktopumgebungen, die aus Computern mit Maus und Tastatur sowie einem oder zwei Monitoren bestehen, für die Visualisierung abstrakter Daten (z.B. tabellarische multivariate Daten, Zeitreihendaten, relationale oder hierarchische Daten) sowie räumlicher Daten mit physikalischem Bezug aus Wissenschaftsbereichen wie Medizin, Strömungsmechanik oder Astronomie genutzt. Seit vielen Jahren, nicht zuletzt durch die eingangs beschriebenen technologischen Entwicklungen im Displaybereich, wird jedoch auch Forschung zu Datenvisualisierung *beyond the Desktop* betrieben [Le12; Ro14], wobei neue Formen der Ausgabe und Eingabe für Visualisierungszwecke kombiniert werden. Die folgenden Absätze geben einen Überblick zu den wichtigsten Kategorien.

2.1 Mobile Datenvisualisierung

Mit der Nutzung von Personal Digital Assistants (PDA) Anfang der 2000er Jahre begann das Interesse an der Entwicklung kleinformatiger Datenvisualisierungen, das durch den



Abb. 1: *Links:* Bei VisTiles [LHD18] werden mehrere mobile Endgeräte miteinander verbunden und die Visualisierungsansichten aufgrund der räumlichen Beziehung zueinander synchronisiert. Hier sieht man ein Overview-Tile (Handy) und zwei Detail-Tiles (Tablets). *Rechts:* Im MARVIS-Projekt [La21] werden auf, über und neben mobilen Endgeräten (mit 2D-Views) dreidimensionale Informationen mittels AR-Brille überlagert. Im Bildbeispiel erzeugt die räumliche Anordnung zweier Balkendiagramme ein augmentiertes 3D-Balkendiagramm zwischen den Geräten (Foto aus [La21]).

ab 2007 ausgelösten Smartphone-Boom kontinuierlich wuchs. Inzwischen sind mobile Endgeräte die dominierenden und am häufigsten genutzten Computer für die meisten Menschen, und kommerzielle Visualisierungsanwendungen existieren für Smartwatches, Smartphones und Tablets, Forschungsprototypen auch für andere Wearables (z.B. Armanddisplays), smarte Kleidung oder in Schmuck integrierte Displays, z.B. Ringe. Die zentralen Herausforderungen sind dabei die limitierte Displaygröße, die andersartigen Eingabemöglichkeiten (zumeist Multitouch, wobei das *fat-finger-Problem* präzise Eingaben erschwert) und vielfältige Wahrnehmungsprobleme, z.B. durch wechselnde Beleuchtung und Blickwinkel sowie Bewegungen während der mobilen Nutzung verursacht. Auch ist die Art der visualisierten Daten meist persönlicher Natur, und Nutzungskontexte, Vorkenntnisse und Bedürfnisse durch Milliarden von Menschen natürlicherweise sehr heterogen. Als Forschungsbeispiel ist in Abb. 1 (links) die Kombination verschiedener mobiler Endgeräte in Form komplexerer Visualisierungsumgebungen aus dem VisTiles-Projekt [LHD18] zu sehen. Eine ausführliche Darstellung wesentlicher Aspekte und Herausforderungen mobiler Datenvisualisierung bietet das gleichnamige Buch [Le21].

2.2 Visualisierung auf Wanddisplays

Auf der anderen Seite des Spektrums stehen große, wandfüllende Displays, zum Beispiel Smartboards und noch größere Formfaktoren. Diese bieten natürlich signifikant mehr physischen Displayraum und viel mehr Pixel zur Anzeige von Visualisierungsansichten. So könnten einzelne Views, z.B. Geovisualisierungen auf einer großen Weltkarte oder große Netzwerkvisualisierungen formatfüllend allein angezeigt werden. Alternativ lassen sich multiple, oft verschiedenartige Views nebeneinander in koordinierten Ansichten zeigen, wobei sich vielfältige Perspektiven auf die Daten ergeben. In [LKD19] sind es z.B. 47

verschiedene Visualisierungsansichten von Verbrechensdaten der Stadt Baltimore, die auf einer Displaywand zur kollaborativen Datenanalyse genutzt werden (s. Abb. 2, links). Das Beispiel zeigt auch, dass Displaywände – im Gegensatz zu mobilen Endgeräten – gut für Zusammenarbeit und mehrere Personen geeignet sind. Genau wie bei mobilen Lösungen kann man auch für Großdisplays die bekannten Visualisierungsansätze aus dem Desktopbereich nicht einfach übernehmen oder skalieren, sondern muss sie sorgfältig anpassen oder neu entwickeln. Dazu zählen auch die Interaktionsherausforderungen: nicht jedes Wanddisplay bietet Touch- oder Stiftinteraktion, und verschiedene Formen der Interaktion aus einem gewissen Abstand sind allein deshalb vonnöten, weil man den Überblick behalten möchte. Auch die Erkennung, welcher Nutzer oder welche Nutzerin gerade interagiert, ist eine Forschungs herausforderung. Weitere werden ausführlich im Überblicksartikel [Be24] beschrieben.



Abb. 2: *Links*: Displaywand mit multivariater Datenvisualisierung von Verbrechensdaten [LKD19]. Die kollaborative Datenanalyse erfolgt entweder per Touch oder aus der Distanz über ein räumlich getracktes Smartphone. *Rechts*: Analyse des gleichen Datensatzes in einer Multi-Displayumgebung, die ein Smartboard und mehrere Smartwatches miteinander verknüpft [Ho18] (Foto aus [Be24]).

2.3 Multi-Display-Umgebungen

Wir haben bereits gesehen, dass das Spektrum im Bereich Displays von ganz kleinen Formfaktoren (z.B. Smartwatches und Armbänder) über kleine mobile (wie Smartphones und Tablets) zu mittelgroßen (wie Laptops und Desktop-Computer), großen (Tabletops, Whiteboards) und ultragroßen (z.B. Displaywände) reicht. Neben der reinen Größe unterscheiden sich deren Fähigkeiten und Eigenschaften oft erheblich, z.B. im Bezug auf die Interaktionsmöglichkeiten, die Nutzungsflexibilität (mobil vs. stationär), den Personenbezug (privat vs. öffentlich) oder die Zahl der Nutzer:innen (1 bis viele). Daher ist ein großes Spektrum von Forschungsarbeiten den Multi-Display-Umgebungen gewidmet, die verschiedene Geräte auf geschickte Weise miteinander verbinden, um Vorteile zu kombinieren und Nachteile auszugleichen. So lassen sich Displays z.B. kombinieren, um mehr Displayfläche zu erhalten, um komplementäre Visualisierungsansichten zu nutzen, um persönliche Sichten auf (Teile von) Daten zu realisieren oder kollaboratives Arbeiten zu unterstützen. Die Kopplung und Synchronisation der Geräte, die Nutzung teils sehr unterschiedlicher Eingabemöglichkeiten und Ausgabequalitäten, Aufmerksamkeitswechsel und kognitive Belastungen sind nur einige der zu meisternden Herausforderungen. Abb. 2 (rechts) zeigt

z.B. die Kombination von Smartwatches und Displaywänden für Visualisierungszwecke aus dem Projekt „David meets Goliath“ [Ho18]. In einer anderen Forschungsarbeit beschreiben Horak et al. [Ho19] automatisierte Verteilungsalgorithmen für Visualisierungs-Views auf kombinierten Endgeräten. Im Überblicksartikel von Brudy et al. [Br19] wird ausführlich auf Kombinationsmöglichkeiten und Nutzungsformen eingegangen, Chung et al. [Ch15] tun dies speziell im Hinblick auf visuelle Datenanalyse in sogenannten *Display-Ecologies*.

2.4 Immersive Analytics

Dreidimensionale Datenvisualisierungen, die als 2D-Projektion auf einem Monitor aus Wahrnehmungs- und Interaktionssicht problematisch sind, haben mit der preiswerten Verfügbarkeit von Datenbrillen für Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) einen neuen Boom erlebt. Dabei müssen Daten nicht per se dreidimensional sein, aber auch die räumliche Anordnung von 2D-Datenansichten erlaubt eine Vielzahl von Lösungen. Der Begriff *Immersive Analytics* beschreibt das immersive Eintauchen in Daten zum Zwecke der Analyse; das erste Fachbuch zum Thema von Marriott et al. [Ma18] gibt ausführlich Auskunft, verschiedene Übersichtsartikel, z.B. von Fonnet; Prié [FP21] beleuchten die immer vielfältigeren Forschungsansätze in diesem aufstrebendem Gebiet. Ein Beispiel aus dem Projekt MARVIS [La21] ist in Abb. 1 (rechts) zu sehen, wo – in Ergänzung zu 2D-Datenvisualisierungen auf Tablets – zusätzliche dreidimensionale Daten an passender Stelle eingeblendet und analysiert werden können. Neben VR- und AR-Brillen (oft auch als Mixed Reality zusammengefasst), erlauben auch andere Displaytechnologien wie autostereoskopische Displays, CAVEs und Displaywände das Erzeugen eines Immersionsgefühls zur intuitiven Datenanalyse. Während VR-Brillen ein komplett virtuelles Erlebnis ermöglichen, können AR-Brillen besonders gut dazu verwendet werden, Daten und Informationen physisch realen Objekten und Räumen zu überlagern und sie damit in direkten Bezug zu setzen. Dieses Konzept der *Situated Analytics* (der situativen, kontextabhängigen Datenanalyse) [El16] ist besonders vielversprechend, weil benötigte Informationen genau an der passenden Stelle in realen Kontexten überlagert werden können oder Daten, die an räumlichen Standorten aufgezeichnet wurden, sichtbar gemacht werden. Ein Beispiel zeigt Abb. 3 (links), wo Menschen bei der Nutzung von Geräten in einem Raum Spuren hinterlassen haben, die mithilfe der im MIRIA-Projekt [BLD21] entwickelten Visualisierungstechniken für Trajektorien über AR-Brillen durch mehrere Personen zusammen analysiert werden können.

Wenn sich die bereits erwähnten Data Stories, wie sie im Online-Journalismus zunehmend zu aktuellen Themen wie Klimawandel, globaler Migration oder internationalen Kriegsherden „erzählt“ werden, immersive Technologien zunutze machen, können Daten auf besonders beeindruckende Weise dreidimensional erfahren werden. Der Überblicksartikel zum Thema *Immersive Data-Driven Storytelling* von Méndez et al. [Mé25] bietet dazu interessante Einsichten. 17 wesentliche Forschungsherausforderungen im aufstrebenden Bereich *Immersive Analytics* werden detailliert in [En21] diskutiert.

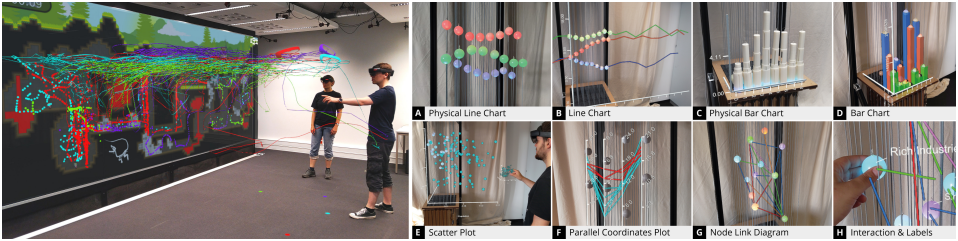


Abb. 3: *Links*: Das MIRIA-Toolkit erlaubt die kollaborative In-situ-Visualisierung und -Analyse von im Raum aufgezeichneten Bewegungs- und Interaktionsdaten verschiedener Personen (Foto aus [BLD21]). *Rechts*: Bei *Augmented Dynamic Data Physicalization* wird eine dynamische Datenphysikalisierung (an motorisierten Fäden aufgehängte Kugeln, Zylinder oder andere Objekte) mit räumlich passenden AR-Informationen überlagert, womit beliebige dynamische Sichten möglich sind (Foto aus [En25]).

2.5 Datenphysikalisierung

Die ersten drei Kategorien neuartiger Visualisierungsumgebungen bezogen sich auf starre, planare Displays in verschiedenen Größen, bei denen Pixel auf einer 2D-Ebene dominieren. Immersive Technologien hingegen erlauben durch stereoskopische Anzeige ein dreidimensionales, virtuelles Erlebnis, dem jedoch die Haptik fehlt. Dieses Problem wird durch das Konzept der *Data Physicalization* gelöst. Dabei erhalten Daten eine physikalische Form, z.B. als ausgedrucktes, be-greifbares 3D-Balkendiagramm (ein eher pragmatischer Zweck) oder als museale Datensculptur, die vielleicht den weltweiten Wasserverbrauch als Holzobjekt darstellt (eher eine künstlerische Absicht). Der Artikel von Jansen et al. [Ja15] führt in dieses interessante Thema ein, und die Webseite <https://dataphys.org/> bietet einen faszinierenden Überblick zu physischen Datenrepräsentationen aus einem Zeitraum von über 7.000 Jahren. Die Zwecke sind vielfältig: sehr persönliche, selbstreflexive Sichten können dabei entstehen (z.B. ein gewebter Schal, der die eigene sportlichen Leistungen über ein Jahr visualisiert), Kommunikation, Bildung und Austausch können wichtige Ziele einer Datenphysikalisierung sein, und seheingeschränkten Menschen können Visualisierungen mithilfe greifbarer Darstellungen möglicherweise überhaupt erst nahegebracht werden. Herausfordernd ist u.a., dass ein materielles Datenobjekt typischerweise nicht auf dynamische Änderungen reagieren kann, wie es in der digitalen Welt einfach möglich ist. Als Lösung werden z.B. *shape-changing*-Displays eingesetzt, die dynamische Änderungen physisch abbilden können. Abb. 3 (rechts) zeigt ein Beispiel, wo von der Decke hängende, bewegliche Kugeln oder auch andere Objekte eine 2,5-dimensionale Datenphysikalisierung erzeugen, bei der zugleich auch noch eine Überlagerung mit dynamischen AR-Inhalten möglich ist. Damit sind haptische Qualitäten gegeben bei gleichzeitiger dynamischer Aktualisierbarkeit, und auch ohne AR-Display entsteht eine Art Datensculptur [En25].

2.6 Vielfältige und multimodale Interaktion

Jede hinreichend komplexe Visualisierung profitiert von menschlicher Interaktion mit den Daten. Daher kommt den Eingabeformen und konkreten Interaktionstechniken – beispielsweise zum Navigieren einer Visualisierung, zur Selektion von Datenpunkten, zum Filtern, Vergleichen oder Abrufen von Details – eine besondere Bedeutung zu. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass die traditionell in Schreibtisch-Situationen genutzten Eingabegeräte Maus und Tastatur in vielen der oben diskutierten Visualisierungsumgebungen nicht oder nur schlecht funktionieren würden. Die Vielfalt der Eingabegeräte und damit möglichen Interaktionstechniken hat sich in den letzten 20 Jahren deutlich erhöht und wurde auch für Visualisierungszwecke in vielen Forschungsarbeiten ausführlich betrachtet. Touchinteraktion steht dabei an oberster Stelle, was aufgrund der Vielzahl mobiler Endgeräte nicht verwundert. Das Potenzial von Multitouch-Interaktion ist dabei jedoch immer noch nicht voll erschlossen. Auch die Eingabe mit Stiften ist vielversprechend, nicht nur wegen der höheren Präzision gegenüber Toucheingabe, sondern auch aufgrund der menschlichen Vertrautheit mit stiftbasierten Handlungen, wie Skizzieren, Schreiben, Einkreisen oder Annotieren.

Natürliche Sprache ist eine spannende Eingabeform für Visualisierungen, weil damit schnell komplexe Anfragen und Interaktionsschritte ausgedrückt werden können (z.B. „Selektiere alle Daten im Zeitraum XY, deren Attribut Z größer als 10 ist.“). Häufig wird Sprache auch in Kombination mit Touch- oder Stiftinteraktion eingesetzt, womit komplizierte Formulierungen oder Mehrdeutigkeiten einfach durch Zeigen vermieden werden (das obige Sprachbeispiel plus „...in diesem Bereich“, wobei Stift oder Touch den Ort spezifizieren). Auch die Kombination von Touch + Pen ist vielfältig eingesetzt worden. Blicksteuerung, Körperbewegungen oder Handgesten gehörten bisher eher zu den exotischeren, dennoch für bestimmte Aufgaben vielversprechenden Eingabeformen, haben aber durch die Nutzung in Mixed-Reality-Brillen höhere Verbreitung erfahren. Greifbare Objekte oder Controller zur Steuerung aus einer gewissen Distanz werden ebenfalls häufig eingesetzt, wenn Displays zu groß sind oder von Ferne bedient werden müssen oder es sich um räumliche 3D-Darstellungen handelt (z.B. Controller für VR-Brillen). Im Artikel von Belkacem et al. [Be24] werden diese Interaktionsformen im Visualisierungskontext ausführlicher diskutiert. Eine gute Quelle allgemein zum Thema Interaktion für Visualisierung bietet das gleichnamige Buch von Tominski [To15].

3 Zusammenfassung

Der Artikel soll für die Vielfalt von Displaytechnologien und damit verbundenen Eingabeformen für die Visualisierung von Daten sensibilisieren. Während einige Geräteklassen bereits sehr prominent für Visualisierungen genutzt werden (vor allem mobile und am Arm getragene Geräte) und weit verbreitet sind, ist das bei anderen eher noch wenig der Fall (z.B. immersive Technologien). Das liegt natürlich auch vorrangig an der noch geringen Verbreitung von z.B. AR-Brillen und an fehlenden kommerziellen Lösungen. Perspektivisch könnte

sich das jedoch ändern, weil gerade *Situated Analytics* ein großes Potential bietet. Datenphysikalisierungen sind sicherlich noch eher exotisch und weniger verbreitet, aber dennoch zunehmend in Museen zu finden. Zudem gestatten die „demokratisierten“ Fertigungstechnologien, wie sie z.B. durch 3D-Drucker und Lasercutter in Makerspaces und Fablabs zur Verfügung stehen, die Fertigung solcher dinglichen, persönlichen Datenrepräsentationen auch für einen größeren Personenkreis.

Das Spektrum an Visualisierungsumgebungen hat sich in den letzten 20 Jahren signifikant vergrößert und reicht von farbigen Pixeln auf starren 2D-Oberflächen über holografische 3D-Darstellungen und realitätsbezogene, situative Überblendungen im realen Raum bis hin zu rein materiellen Datenrepräsentationen. Auch die Orte sind vielfältiger geworden, an denen wir mit Daten umgehen. Es ist nicht mehr nur der Schreibtisch oder das Labor mit der großen Displaywand, sondern auch der Klassenraum mit dem Smartboard, der urbane (oder jeder beliebige) Raum mit mobilen Endgeräten oder sogar das eigene Wohnzimmer, wo eine kleine Datenskulptur uns vielleicht daran erinnert, wie viele Kilometer wir im letzten Jahr pro Woche gelaufen sind. Der Begriff *Ubiquitäre Datenvisualisierung* (s. z.B. [Le21], Kap. 9) beschreibt die spannende Durchdringung unserer Lebens- und Arbeitswelten mit Visualisierungen. Somit wird auch der Personenkreis diverser und reicht von Experten zur Datenanalyse bis hin zu Alltagsnutzer:innen mit geringer Visualisierungserfahrung, vielleicht auch mit körperlichen Einschränkungen. Die Visualisierungsforschung ist hier gefordert, nicht nur neuartige Ansätze zu entwickeln, wie man sie z.B. in den Abbildungen dieses Artikels sehen kann², sondern auch deren Eignung für konkrete Visualisierungsaufgaben systematisch zu untersuchen und mit empirischen Studien zu belegen.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 389792660 – TRR 248 (siehe <https://cpec.science>) und im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2050/1 – Projektnummer 390696704 – als Exzellenzcluster „Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop“ (CeTI) der Technischen Universität Dresden.

Literaturverzeichnis

- [Be24] Belkacem, I. et al.: Interactive Visualization on Large High-Resolution Displays: A Survey. *Computer Graphics Forum* 43 (6), 2024, <https://doi.org/10.1111/cgf.15001>.
- [BLD21] Büschel, W.; Lehmann, A.; Dachzelt, R.: MIRIA: A Mixed Reality Toolkit for the In-Situ Visualization and Analysis of Spatio-Temporal Interaction Data. In: *Proc. of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '21, ACM, Yokohama, Japan, 2021, <https://doi.org/10.1145/3411764.3445651>.

² Die Projektseiten unter <https://imld.de/research/research-projects/> enthalten Videos und weiterführende Infos.

- [Br19] Brudy, F. et al.: Cross-Device Taxonomy: Survey, Opportunities and Challenges of Interactions Spanning Across Multiple Devices. In: Proc. of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '19, ACM, Glasgow, Scotland UK, S. 1–28, 2019, <https://10.1145/3290605.3300792>.
- [Ch15] Chung, H. et al.: Four considerations for supporting visual analysis in display ecologies. In: 2015 IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology (VAST). S. 33–40, 2015.
- [El16] ElSayed, N. A. et al.: Situated Analytics: Demonstrating immersive analytical tools with Augmented Reality. Journal of Visual Languages & Computing 36, S. 13–23, 2016, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1045926X16300404>.
- [En21] Ens, B. et al.: Grand Challenges in Immersive Analytics. In: Proc. of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '21, Association for Computing Machinery, Yokohama, Japan, 2021, <https://doi.org/10.1145/3411764.3446866>.
- [En25] Engert, S. et al.: Augmented Dynamic Data Physicalization: Blending Shape-changing Data Sculptures with Virtual Content for Interactive Visualization. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, S. 1–17, 2025.
- [FP21] Fonnet, A.; Prié, Y.: Survey of Immersive Analytics. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 27 (3), S. 2101–2122, 2021.
- [Ho18] Horak, T. et al.: When David Meets Goliath: Combining Smartwatches with a Large Vertical Display for Visual Data Exploration. In: Proc. of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '18, ACM, Montreal QC, Canada, S. 1–13, 2018, <https://doi.org/10.1145/3173574.3173593>.
- [Ho19] Horak, T. et al.: Vistribute: Distributing Interactive Visualizations in Dynamic Multi-Device Setups. In: Proc. of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '19, ACM, Glasgow, Scotland UK, S. 1–13, 2019, <https://10.1145/3290605.3300846>.
- [Ja15] Jansen, Y. et al.: Opportunities and Challenges for Data Physicalization. In: Proc. of the 2015 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '15, Association for Computing Machinery, Seoul, Republic of Korea, S. 3227–3236, 2015, <https://doi.org/10.1145/2702123.2702180>.
- [La21] Langner, R. et al.: MARVIS: Combining Mobile Devices and Augmented Reality for Visual Data Analysis. In: Proc. of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '21, Association for Computing Machinery, Yokohama, Japan, 2021, <https://doi.org/10.1145/3411764.3445593>.
- [Le12] Lee, B. et al.: Beyond Mouse and Keyboard: Expanding Design Considerations for Information Visualization Interactions. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 18 (12), S. 2689–2698, 2012.
- [Le21] Lee, B. et al., Hrsg.: Mobile Data Visualization. Chapman und Hall/CRC, 2021.
- [LHD18] Langner, R.; Horak, T.; Dachzelt, R.: VisTiles: Coordinating and Combining Co-located Mobile Devices for Visual Data Exploration. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics 24 (01), S. 626–636, 2018.
- [LKD19] Langner, R.; Kister, U.; Dachzelt, R.: Multiple Coordinated Views at Large Displays for Multiple Users: Empirical Findings on User Behavior, Movements, and Distances. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 25 (1), S. 608–618, 2019.
- [Ma18] Marriott, K. et al.: Immersive Analytics. Springer Nature, 2018.

- [Mé25] Méndez, J. et al.: Immersive Data-Driven Storytelling: Scoping an Emerging Field Through the Lenses of Research, Journalism, and Games. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, S. 1–13, 2025.
- [Ro14] Roberts, J. C. et al.: Visualization beyond the Desktop—the Next Big Thing. *IEEE Computer Graphics and Applications* 34 (6), S. 26–34, 2014.
- [To15] Tominski, C.: *Interaction for Visualization*. Morgan & Claypool, 2015.