


4D-Bildgebungstechnologien erfassen und verarbeiten räumliche Informationen situativ und in Echtzeit. Sie verbinden physische und virtuelle Ebenen zu hybriden Bildräumen, die sich raumzeitkritisch an ihre Nutzung anpassen. Das 4D-Bild ist kein abgeschlossenes Objekt, sondern ein dynamischer Prozess. Es stellt Bildtheorie und Medienpraxis vor die Aufgabe, die Beziehungen von Bild, Raum und Handlung neu zu verhandeln.

4D

Reihe
Begriffe des
digitalen Bildes



4D



Herausgegeben von
Kathrin Friedrich
Moritz Queisner
Karl Eisenträger
Carolin Schabbing

München, 2026
Open Publishing LMU

1



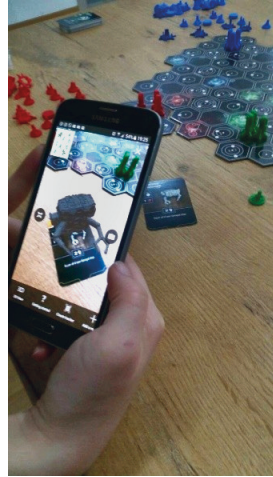
2



3



4



5



- 1 Mit der AR-App Trompe-l'œil erkunden Museumsbesucher*innen die verborgenen Rückseiten eines Triptychons.
- 2 Arkiio ermöglicht kollaborative Architekturplanung in Mixed Reality - gemeinsam im Raum oder remote - geräte- und softwareübergreifend.
- 3 Volumetrische Erfassung realer Personen und Objekte für VR/AR in einer Capture Stage mit Kameras und Sensoren.
- 4 Einzelne Spielelemente eines Brettspiels werden mithilfe einer AR-App visualisiert.
- 5 Das XRT im Staatstheater Nürnberg lässt Gäste via VR-Headsets das AR-Stück "Der Bau - Franz Kafka" in einer neuen, teils virtuellen Erzählform erleben.

6



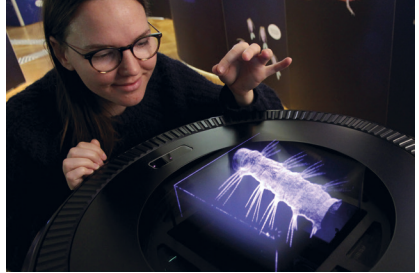
7



8



9



10



- 6 VR-Headsets erlauben es, medizinische Bildgebung als 3D-Modelle in virtuellen Umgebungen interaktiv erfahrbar zu machen.
- 7 VR-Headsets und haptische Systeme ermöglichen realistisches Chirurgie-Training an virtuellen Organmodellen.
- 8 Selfie mit Snapchat-Filter, der Kleidungsstücke augmentiert und vorhandene Elemente räumlich verzerrt.
- 9 Eine Person interagiert mit dem holografischen Modell eines Grundwassertiers.
- 10 Im Gait Real-time Analysis Interactive Lab (GRAIL) der TU Chemnitz werden mithilfe virtueller Umgebungen Ganganalysen durchgeführt.

Bildauswahl und Recherche: Julia Enders
Bildnachweis vorige Doppelseite

- 1 Ceren Topçu, 2020 (CC BY 4.0).
- 2 Arkio, www.arkio.is, 2023.
- 3 Christopher Remde, 2024 (CC BY NC 4.0).
- 4 Tashko Rizov, Jelena Djokic, Milan Tasevski: Design of a board game with augmented reality. In: FME Transactions, Jg. 47, 2019, Heft-Nr. 2, S. 255, Abb. 4.
- 5 Konrad Fersterer, 2024.
- 6 Karl Eisenträger, 2024.
- 7 Michelle Mantel, 2024.
- 8 Julia Enders, 2025.
- 9 Jacqueline Gitschmann, Voxon @ Senckenberg Museum für Naturkunde Görlitz, 2022.
- 10 @ Jacob Müller, TU Chemnitz, 2018.

Inhalt

4D Imaging. Challenges of Spacetime Critical Image Practices <i>Kathrin Friedrich, Moritz Queisner, Karl Eisenträger, Carolin Schabbing</i>	7
Default Engines. Normative Dynamiken in der Diffusion von 4D-Entwicklungsplattformen in Forschung, Kunst und Digital Twinning <i>Jens Fehrenbacher</i>	21
4D Imaging Tools in Architectural Co-Creation: The Role of Mixed Reality in Collaborative Spatial Design <i>Carolin Schabbing</i>	39
Kagome Cave. Bildräumliches Rekonstruieren als intervenierende Praxis <i>Carolin Höfler</i>	59
Entwicklung und Anwendung individueller dynamischer Patienten*innen-Modelle für Simulationen in erweiterter Realität <i>Karl Eisenträger</i>	77
Pain Assessment in VR <i>Zeynep Akbal, Johannes Breuer</i>	89
Surgical Use Cases of 4D Imaging <i>Moritz Queisner, Anton Hallmann, Karl Eisenträger, Carolin Schabbing, Kathrin Friedrich</i>	107

4D Imaging. Challenges of Spacetime Critical Image Practices

I. 4D - Making Physical Space Computable

Digital images influence how people interact with one another and with their physical surroundings. Today, navigation systems visually guide us through physical environments; sensors continuously capture and visualize physiological and biometric data that determine fitness routines; and video-based formats increasingly shape interpersonal communication. The shift from analogue to digital images has already significantly transformed the ontological and epistemological status of images. However, contemporary technological developments pose even more fundamental questions about the status and role of the image itself.

Ongoing debates around the concept of extended reality (XR) reflect a profound shift in the way images mediate human action and perception. This transformation is underscored by the increasing influx of capital and development efforts in this expanding domain. It appears that a new image type is evolving from a marginal phenomenon into an industrial-scale, multi-billion-dollar venture that claims to be the 'next medium' after the smartphone and mobile computing. Much like photography and film created and shaped a new technologically mediated iconosphere and visual culture,

today's emerging imaging technologies are on the verge of defining a new form of digital visuality, in which image, action, and space become intrinsically intertwined.

While the vision of the – or at least a – ‘metaverse’ increasingly turns out to be a socio-technological imaginary driven by marketing narratives and investor interests, the media practices and technologies that give rise to this imaginary are already being used in a variety of real-world contexts. On a technical level, the idea of integrating physical and virtual spaces relies on new imaging and sensing technologies capable of registering, processing, and transmitting information about the physical world in real time. This concept is summarized under the technical term of *spatial and embodied computing*, or as we propose more succinctly, 4D imaging. 4D imaging techniques combine data visualization with the registering of the topographical properties of physical space and the tracking of user movement and position.

The core principle of 4D imaging is to render physical space into computational models. This spatial registration enables the alignment of digital visual content with the physical world based on changes in user movement and device orientation. As a result, what an image shows now depends on the temporal dynamics and spatial configuration of a scene. Unlike conventional spatial visualization methods such as 3D scanning, 4D imaging not only captures the structure of space but also incorporates its transformation over time, treating movement and interaction as integral components. In practice, this fourth dimension means that digital objects can be manipulated and explored as users move through space, shift their gaze, or engage with images through bodily interaction.

Beyond this predominantly technological framing, we propose a theoretical and analytical perspective on 4D imaging

that considers its capacity to generate new forms of mediated agency. Images generated through 4D imaging – a type of adaptive images¹ – are gaining importance in operational contexts due to their ability to support, extend, and control a wide range of human-machine interactions. Their distinct potential lies in the real-time integration of spatial information, enabling image-based interaction to respond dynamically to users and their environments.

These multidimensional images diverge fundamentally from conventional static, two-dimensional screen representations. Mobile applications, such as those on smartphones and virtual reality headsets, are particularly capable of adapting images based on the user's position and field of view. As a result, visual perception becomes a hybrid media practice in which physical space and objects are overlain with a layer of digital artifacts that integrates shape, motion, location, orientation, and perspective. Unlike traditional 2D displays, adaptive images actively shape how users perceive and engage with the physical environment. This is evident in everyday applications such as smartphone-based navigation systems that use gyroscopic and geolocation data to adjust orientation in real time, or augmented reality experiences in museums that overlay digital information on physical exhibits. These examples illustrate how interacting with images becomes both context-sensitive and embodied, shifting the image from a representational medium to an interface for spatial interaction.

1 Kathrin Friedrich, Moritz Queisner, Matthias Bruhn: Adaptive images: Practices and aesthetics of situative digital imaging. In: *NECSUS_European Journal of Media Studies*, Vol. 9, 2020, No. 2, pp. 51-76, <http://dx.doi.org/10.25969/mediarep/15338>.

II. Intersections Between Digital Image Theory and Digital Image Practice

The intersection of image and media theory with 4D imaging presents a productive tension. Theoretical insights from humanities-based digital image research can inform the use and design of 4D imaging, offering critical perspectives on both the potentials and limitations of these technologies. Understanding the capabilities of 4D imaging requires a systematic connection between theoretical findings from visual, image, and media studies and the real-world contexts in which these technologies are applied. Rather than constituting merely an enhanced imaging modality defined by technical parameters, 4D imaging introduces a fundamentally new mode of accessing and interacting with digital images, physical objects, and spatial environments.

Therefore, the focus must shift from digitized practices to digital practices. A practice-based approach allows us to understand what 4D imaging can – and crucially, cannot or should not – do. Conceptually, there is a growing need to develop both a practice-based theory and a theory-driven practice of 4D imaging – one that enables users to critically engage with and shape the socio-technical imaginary surrounding these technologies. To investigate the practical potential of 4D imaging from a media and visual studies perspective, we propose two interrelated layers of inquiry: first, to critically reflect on the socio-historical conditions underpinning 4D imaging; and second, to foster critical visual competencies by empowering users to engage with 4D imaging practices.

Discourses surrounding 4D imaging are embedded in broader socio-historical narratives that legitimize its development and adoption. These narratives generate what we call

the 4D mandate² – the perceived necessity of employing 4D technologies in specific domains and under particular conditions. This mandate is not neutral; it is shaped by historical genealogies, institutional frameworks, and socio-political conditions that must be critically examined. The proclaimed necessity, innovation, or efficiency associated with 4D imaging reflects not only a form of technological solutionism – or *technofix* – but also discursively attributes images with a formative power that exceeds their immediate application.

Carving out the contours of the 4D mandate thus requires a historical perspective, drawing methodologically on the history of stereoscopic media³, media archaeology⁴, and historical discourse analysis⁵. This socio-historical foundation allows us to situate 4D imaging within a broader visual culture that aspires to extend agency over human perception and interaction. Through detailed, case-based analysis, this knowledge can be transferred into applied contexts. In particular, cultivating reflection-based visual skills can empower users to make informed decisions about when and how to use 4D imaging. Such skills include spatial awareness, visuomotor integration, and depth accommodation – competencies that are particularly relevant for embodied interaction with 4D images. Drawing on methods from design research⁶, interface

2 We derive the notion 4D mandate from Halpern et al. (2017) who use the term “smartness mandate” to frame the promises, political agendas and infrastructural transformations of smart technologies and to illuminate, amongst others, “some of the key ways in which the history and logic of the smartness mandate are dynamically embedded in the objects and operations of everyday life (...).” Orit Halpern, Robert Mitchell, Bernard Dionysius Geoghegan: *The Smartness Mandate. Notes toward a Critique*. In: *Grey Room*, 2017, No. 68, pp. 106-129, here p. 109.

3 Luisa Feiersinger: *Spatial Narration. Film Scenography Using Stereoscopic Technology*. In: Luisa Feiersinger, Kathrin Friedrich, Moritz Queisner (eds.): *Image Action Space. Situating the Screen in Visual Practice*, Berlin and Boston 2018, pp. 69-78; Nick Jones: *Spaces mapped and monstrous. Digital 3D cinema and visual culture*, New York 2020; Miriam Ross: *Virtual Reality's New Synesthetic Possibilities*. In: *Television & New Media*, Vol. 21, 2020, No. 3, pp. 297-314.

4 Erkki Huhtamo: *Screen Tests. Why Do We Need an Archaeology of the Screen?* In: *Cinema Journal*, Vol. 51, 2012, No. 4, pp. 144-148; Jens Schröter: *3D. History, Theory and Aesthetics of the Transplane Image*, London 2014.

5 Laurel J. Brinton: *Historical Discourse Analysis*. In: Deborah Tannen, Heidi E. Hamilton, Deborah Schiffrin (eds.): *The Handbook of Discourse Analysis*, Hoboken, NJ, 2015, pp. 222-243, <https://doi.org/10.1002/9781118584194.ch10>.

6 John M. Carroll: *Making Use. Scenario-Based Design of Human-Computer Interactions*, Cambridge, MA, 2000.

studies⁷, and aesthetics, a taxonomy of 4D imaging skills can be developed. A skill system of this kind not only promotes conceptual and operational understanding but also facilitates access to 4D imaging in contexts with limited resources.

To foster a productive exchange between theory and practice, we propose the development of practice-based formats, such as How-Tos that guide the situated use of 4D imaging. These may include protocols, visualizations, or video instructions detailing how to implement 4D imaging in domains such as surgical planning or digital theatre. These tools would not only assist users in technical execution but also embed critical reflection, providing contextual background on technological affordances, scenario design requirements, and the visual skills involved. Other interactive formats – such as co-creation workshops and participatory trials – could support iterative, collaborative exchanges between experts and trainees.

However, the development and analysis of 4D imaging are inherently context-specific. Cultural production and medicine represent two domains in which the 4D mandate is particularly pronounced. Both fields demand new forms of immersion and instruction, yet the visual competencies and embodied knowledge required to work effectively with 4D often remain tacit, exclusive, and difficult to communicate. This underscores the urgent need for interdisciplinary approaches to articulate, transfer, and critically engage with the skill sets necessary to develop and apply 4D imaging use cases across diverse real-world settings.

7 Søren Bro Pold, Christian Ulrik Andersen (eds.): *Interface Criticism. Aesthetics Beyond Buttons*, Aarhus 2011; Noortje Marres, Carolin Gerlitz: *Interface Methods. Renegotiating Relations between Digital Social Research, STS and Sociology*. In: *Sociological Review*, Vol. 64, 2016, No. 1, pp. 21-46.

III. Making the Case - 4D Imaging in Cultural Production

In the field of cultural production, 4D imaging opens up new operational possibilities – particularly in relation to immersive storytelling in theatre practices. 4D technologies promise significant potential in making spatially complex situations more accessible. As the cultural sector traditionally relies on physical presence and the liveness of performances, the COVID-19 pandemic accelerated the development of new forms of representation, interaction, and immersion. Cultural productions such as music concerts, artistic enactments, and theatre performances were confronted with the challenge of translating live experiences into virtual environments.

The emphasis on liveness provides a lens through which to investigate the historical, technological, and socio-political conditions of 4D live performances as historically “variable effects of mediatization.”⁸ This perspective raises critical questions such as: How has the development of 4D imaging altered the dimension of liveness? Or: Which bodies, abilities, and collectives are excluded from immersive experiences due to digital inequalities?

The often-celebrated promise of in particular virtual reality (VR) – to effectively mediate affective spatial interactions, whether by reproducing physical events in virtual realms⁹ or immersing users in entirely virtual scenarios¹⁰ – demands critical scrutiny. Theoretical reflection on these developments has only just begun to grapple with the pivotal role of 4D imaging in producing, experiencing, and archiving performances across diverse cultural contexts. Existing scholarship on mediated performances¹¹, screen-based immersive

8 Philip Auslander: *Digital Liveness. A Historico-Philosophical Perspective*. In: PAJ. A Journal of Performance and Art, Vol. 34, 2012, No. 3 (102), pp. 3-11, here p. 3; cf. Philip Auslander: *Liveness. Performance in a Mediatized Culture*, London (2nd Edition) 2008.

9 Joshua A. Fisher (ed.): *Augmented and Mixed Reality for Communities*, London 2021; Laura Gemini, Stefano Brillì, Francesca Guilliani: *Theatre Dispositif and the Challenge of Covid-19: Mediatization, Liveness and Audiences*. In: *Mediascapes Journal*, 2020, No. 15, pp. 1-15.

10 Kathrin Friedrich: *Therapeutic Media. Treating PTSD with Virtual Reality Exposure Therapy*. In: *MediaTropes*, Vol. 6, 2016, No. 1, pp. 86-113.

11 Auslander 2008 (see note 8); Steve Dixon: *Digital Performance. A History of New Media in Theatre, Dance, Performance Art, and Installation*, Cambridge, MA, 2007; Karin van Es: *Liveness Redux. On Media and*

technologies¹², and the temporality of media¹³ provides essential insights for evaluating and implementing 4D imaging within the cultural sector.

Beyond large-scale, high-budget productions with advanced technological infrastructures, smaller theatres and performance collectives are increasingly exploring 4D imaging as a tool for recording and reimagining live performance. In addition to virtual reality, augmented reality applications are enabling new forms of immersive storytelling that bridge physical and virtual spaces, enhance audience participation, and facilitate innovative artistic interventions.

A compelling example is *XRT Nürnberg's* production of *Der Bau*, based on Franz Kafka's text. Here, augmented reality (AR) operates as a 4D imaging tool that extends the physical stage through adaptive layers of digital imagery and video. This production blurs the traditional boundaries between actor and audience, allowing for new types of spatial and narrative interventions through the agency of 4D imaging technologies. In *Der Bau*, the audience is immersed in the protagonist's fragmented and schizophrenic inner perspective, which is rendered visible through layered visualizations. These multidimensional realities create novel modes of theatrical encounter, expanding both narrative structure and perceptual experience (fig. 1).

The visual and embodied skills required to interact with such environments still need to be theorized and systematized.

their Claim to be Live. In: *Media, Culture & Society*, Vol. 39, 2017, No. 8, pp. 1245-1256, <https://doi:10.1177/0163443717717633>; Steve Benford, Gabriella Giannachi: *Performing Mixed Reality*. Cambridge, MA, and London 2022; Daniel Jernigan, Stephen Fernandez, Russell Pensyl, Lee Shangping: Digital augmented reality characters in live theatre performances. In: *International Journal of Performance Arts and Digital Media*, Vol. 5, 2009, No. 1, pp. 35-49.

12 Ken Hillis: *Digital sensations. Space, identity, and embodiment in virtual reality*, Minneapolis 1999; Michael Madary, Thomas K. Metzinger: *Real Virtuality. A Code of Ethical Conduct. Recommendations for Good Scientific Practice and the Consumers of VR-technology*. In: *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 3, 2016, <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/frobt.2016.00003/full> [Accessed 08/2025]; Nanna Verhoeff: *Mobile Screens. The Visual Regime of Navigation*, Amsterdam 2012.

13 Wolfgang Ernst: *Chronopoetics. The Temporal Being and Operativity of Technological Media*, London and New York 2016; Mark B.-N. Hansen: *Feed-forward. On the future of twenty-first-century media*, Chicago 2015; Svetlana Chernyshova: *Bilder auf Zeit. Zur Bichronizität von Augmented Reality in Künstlerischen Settings*. In: *IMAGE. Zeitschrift für interdisziplinäre Bildwissenschaft*, Vol. 20, 2024, No. 39, pp. 103-125, <https://doi.org/10.25969/mediarep/23195>.

This involves carving out a specific “mediated habitus”¹⁴ – a subjective disposition that emerges in response to the technological affordances of these tools. It also invites us to rethink formats for the iterative exchange between theory and practice in the production and understanding of live performance.

While technical implementation may be conveyed through straightforward How-Tos (e.g., for programming a specific virtual scene), the transmission of embodied knowledge – such as how actors interact with both technology and co-performers – requires different forms of observation and instructional methods. This points to a broader issue: the concept of agency, central to the very idea of 4D, challenges conventional image theories and practices. It necessitates deeper theoretical engagement, particularly in relation to embodied knowledge and the complex dynamics of applied performance contexts.

Fig. 1. Interaction on the stage. The stage design is enhanced by adaptive image and video material (Konrad Fersterer, *Der Bau*, XRT Nürnberg 2024)



¹⁴ Nick Couldry: Liveness, “Reality,” and the Mediated Habitus from Television to the Mobile Phone. In: *The Communication Review*, Vol. 7, 2004, No. 4, pp. 353-361, <https://doi.org/10.1080/10714420490886952>.

IV. Making the Case - 4D Imaging in Medicine

In medicine, 4D imaging techniques hold significant potential for enhancing the quality of clinical decision-making. In fields such as surgery and radiology, a key competency lies in interpreting medical images to accurately identify anatomical structures and diagnose pathological conditions. While imaging modalities like computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) generate volumetric data, they are still predominantly presented as sequential two-dimensional tomographic slices – typically in standardized anatomical planes such as axial, sagittal, and coronal planes – rendered in greyscale on conventional monitors. This presentation method, while clinically established, creates a fundamental disconnect between the inherently three-dimensional nature of the acquired data and its two-dimensional visual representation.

However, surgical decision-making fundamentally depends on comprehending the three-dimensional spatial relationships between anatomical features. To prepare interventions, surgeons must mentally reconstruct 3D anatomical volumes from these 2D slices – a cognitive effort that relies heavily on visual-spatial reasoning and pattern recognition. Traditionally, this skill is acquired through extensive training that involves a bidirectional learning process between digital imaging and physical anatomy. Clinicians scroll through cross-sectional images while simultaneously correlating these representations with direct anatomical experience gained during surgical procedures, cadaveric dissections, and physical examinations. This creates a continuous feedback loop: surgeons learn to interpret CT/MRI slices by referencing their tactile and visual knowledge of actual anatomy, while their growing

imaging expertise actively deepens their understanding of physical anatomical relationships encountered in the operating room. Through this iterative process, clinicians gradually develop the ability to mentally assemble three-dimensional models that bridge the gap between digital representation and physical reality. Yet, this cognitive translation process is not without limitations. It carries the risk of misinterpretation or incomplete modelling, both of which may adversely affect surgical outcomes. Effective planning therefore requires not only deep anatomical knowledge but also advanced graphical literacy and spatial imagination to bridge the gap between digital image slices and the physical structures encountered during surgery.

4D imaging technologies challenge these traditional workflows by introducing new visualization strategies grounded in VR (fig. 2). As a form of computer-generated imagery, VR is specifically designed to convey spatial information. Unlike conventional 2D displays, which lack binocular depth cues, VR-based visualizations offer stereoscopic rendering of medical images. This enhances clinicians' depth perception of anatomical structures with different images for each eye (binocular disparity) and depth cues due to positional tracking (motion parallax). Although 3D datasets can be displayed on standard screens with depth cues such as shadows, contrast,

Fig. 2. VR visualization of photogrammetric cadaver models (left) and computed tomography data (right). The software used for rendering is Medical Holodeck, <https://www.medicalholodeck.com/en/> (Karl Eisenträger 2024)



relative size and perspective, conventional monitors do not provide the binocular disparity that drives human stereoscopic depth perception. This is why stereoscopic visualization makes VR an especially effective medium for presenting volumetric data.

This advantage is further amplified by VR's capacity to support embodied interaction with medical imaging. Head-mounted displays (HMDs) equipped with motion tracking synchronize a user's physical movements – translational (forward/backward, up/down, left/right along the x, y, and z axes) and rotational (pitch, yaw, and roll around those axes) – within the virtual environment. This dynamic coupling between bodily motion and image manipulation adds a sensory dimension absent from conventional 3D display technologies. Through vestibular and proprioceptive feedback, VR enhances clinicians' spatial awareness and fosters a stronger integration of sensorimotor input with spatial perception. By enabling direct, embodied interaction with volumetric data, 4D imaging has the potential to significantly deepen spatial understanding of anatomical relationships. In turn, this promises to advance both diagnostic precision and procedural planning in surgical contexts.

V. Further Perspectives for Image Theory and Image Practice

From the perspective of image and media theory, the design, production, and application of 4D imaging challenge existing theoretical approaches. Integrating space and time dynamically into an image constitutes a novel ontological condition of digital visibility. Traditionally, images represent spatial properties in ways that do not dynamically correspond to physical

space. This is due to two key reasons: first, in material terms, most images are two-dimensional objects – even if they depict three-dimensional scenes. Second, what an image depicts is typically spatially detached from the image’s physical presence. Consequently, relating an image to physical space requires cognitive effort and visual literacy to interpret parameters such as scale, perspective, rotation, or volume.

In contrast, digital images produced through 4D imaging cannot be analyzed as singular, static, or generalizable research objects. Instead, they are embedded in diverse media practices ranging from mobile, real-time, and embodied applications to data-driven techniques such as volumetric scanning. These practices enable the creation of dynamic digital twins as multimodal reconstructions of physical objects and environments. As a result, the classical theoretical question of ‘what is an image?’ must be reformulated into ‘what becomes image space, when, and from whose perspective?’. This shift demands a rethinking of both the ontology and the epistemology of the image, placing emphasis on the media dispositive and the distributed agencies and temporalities that shape image production, reception, and circulation.

To contribute meaningfully to the development and implementation of 4D imaging technologies, image and media theory must move beyond static, representational concepts and instead consider the image as a relational, adaptive, and processual form. The emergence of adaptive images – images that respond in real time to user position, orientation, and interaction – calls for a theoretical framework that recognizes the image as an interface between the user and the physical world. In 4D imaging, the image no longer simply represents space: it becomes an active component of the spatial configuration it helps to shape. Image theory is thus tasked not

only with conceptualizing what an image shows but how and when it becomes operational within specific technological and sociocultural contexts.

We propose a programmatic agenda to advance the intersection of image theory and image practice. In addition to the aforementioned How-Tos – open, low-threshold tools that translate analytical insights into accessible, practice-oriented instructions for working with 4D imaging – this agenda includes the development of further interdisciplinary formats. These could involve speculative design thinking, co-creation labs, and applied theory workshops that facilitate an iterative exchange between conceptual reflection and technological implementation. Such efforts must be grounded in a critical understanding of the 4D mandate and the historical and socio-cultural conditions under which 4D imaging is conceived and applied in real-world contexts. Rather than reinforcing techno-solutionist narratives, 4D imaging users must be empowered to critically engage with the adaptive quality of visual media. In this sense, 4D imaging becomes not only a subject of theoretical analysis but also a catalyst for developing new forms of spatial and visual literacy.

Default Engines. Normative Dynamiken in der Diffusion von 4D-Entwicklungsplattformen in Forschung, Kunst und Digital Twinning¹

Einleitung: Diffusion und Defaulting

Dieser Beitrag nimmt in den Blick, inwiefern die Nutzung von 4D-Entwicklungsplattformen in Kunst, Forschung und Industrie mit Dynamiken der Standardisierung und Normierung einhergeht. Die Ausgangsthese lautet dabei, dass die Standardisierungen, die sowohl die ästhetische wie auch die operative Gestaltung umfassen, in einem engen Zusammenhang mit den Voreinstellungen und Hilfestellungen sowie mit den vernetzten *Ökosystemen* der Plattformen stehen. Diese Dynamik der Normierung durch Vereinfachung möchte ich in der Folge als *Defaulting* konkretisiert, sowohl hinsichtlich einer *Default-Ästhetik* wie auch einer *Default-Agency*.

Diese These baut auf einer Beobachtung auf: 4D-Anwendungen, wobei in diesem Beitrag insbesondere interaktive beziehungsweise adaptive 3D-Anwendungen gemeint sind, erfahren seit Mitte der 2010er Jahre über Videospiele hinaus einen neuen Schub der Verbreitung.² Durch die verbesserte technische Stabilität, verringerte Einstiegshürden, insbeson-

1 Diese Arbeit wurde durch das Ministerium für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen unter der Fördernummer PB22-063A (InVirtuo 4.0: Experimentelle Forschung in virtuellen Umgebungen) gefördert.

2 Als prägende Entwicklungen ab Mitte der 2010er Jahre sind hier im Fall von Augmented Reality die populäre App Pokémon Go (2016) sowie das ARKit von Apple 2017 zu nennen, durch welches stabilere AR-Anwendungen möglich wurden. Letzteres ermöglichte ebenso die Entwicklung verschiedener Smartphone-Apps für 3D-Scanning. In Bezug auf Virtual Reality lässt sich u.a. durch die Entwicklung preiswerterer und PC-unabhängiger Modelle wie der Oculus Quest 2019 eine verbreitete Rezeption feststellen.

dere finanzieller Art, und ein erweitertes Angebot steigt die Popularität von Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR) und 3D-Scanning per Smartphone. In der Folge diffundieren auch die zugrunde liegenden sogenannten *Game-Engines*, in denen interaktive Anwendungen erstellt werden, in unterschiedlichste Anwendungskontexte: Entwicklungsumgebungen, die zuvor primär, wenn auch nicht ausschließlich, im Gaming-Bereich verortet waren, finden nun noch breitflächigere Anwendung in disparaten Feldern wie digitaler Kunst, (Aus-)Bildung, Tourismus, psychologischer Forschung oder industrieller Planung und Steuerung. Diese Medienkonstellationen der 4D-Entwicklung umfassen neben den Game-Engines 2D- und 3D-Gestaltungssoftware sowie eine Vielzahl von Onlineresourcen wie Tutorials, Foren und Objektbibliotheken, die zum Teil in die Plattformstruktur integriert sind, sich aber auch mit anderen Plattformen wie YouTube oder GitHub überschneiden.

Medienwissenschaftlich brisant wird diese medientechnische Umnutzung vor allem vor dem Hintergrund eines Prozesses der Standardisierung, den ich im Folgenden als *Defaulting* konkretisieren möchte. Orientiert an der Wortherkunft von *default* als (unter Umständen sträfliches) Unterlassen³, möchte ich deshalb den Begriff *Defaulting* für diesen beidseitigen Prozess des Nicht-Entscheidens vorschlagen. Von Plattformseite werden vorgefertigte, teils provisorische Lösungen in großem Umfang angeboten, welche auf Entwicklungsseite unter anderem aus Gründen der Zeitersparnis oder der Komplexitätsreduktion gehäuft in finalen Anwendungen angetroffen werden können. Dieses *Defaulting* soll insbesondere unter zwei Gesichtspunkten betrachtet werden:

³ Das englische ‚default‘ bezieht sich außerhalb der Informatik auf eine sträfliche Nachlässigkeit oder eine Unterlassung, häufig in Bezug auf nicht (zurück-)gezahlte Schulden oder Raten „to not do something you are legally obliged to do“, <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english-german/default> [Stand 01/2025].

1. der standardmäßige Rückgriff auf wenige, proprietäre Plattformen mit einem jeweils eigenen Ökosystem umgebender Angebote und

2. die Standardisierung durch teils versteckte Voreinstellungen und umfangreiche Vereinfachungen sowie Hilfsangebote, sowohl hinsichtlich einer *Default-Ästhetik* als auch einer *Default-Agency*.

In Bezug auf den ersten Punkt fällt auf, wie sich aus der Vielzahl der in der Videospielebranche verwendeten Game-Engines die Plattform Unity als eine der dominanten Softwareumgebungen für viele Bereiche außerhalb des klassischen Gamings etabliert hat.⁴ Gerade für den Einstieg in AR- und VR-Entwicklung wird Unity häufig als Standard empfohlen und erscheint gerade hier gewissermaßen als *Default-Game-Engine*.

Darauf baut der zweite Ansatzpunkt auf, insofern das Unity-Ökosystem mit Beispielprogrammen, Tutorials und einem Onlineshop für Entwicklungsbausteine umfangreiche Vereinfachungen und Hilfestellungen für Entwickler*innen anbietet, welche ebenfalls unter dem Vorzeichen der Standardisierung betrachtet werden können. Angesichts der hohen Komplexität des Erstellens von 4D-Anwendungen und der notwendigen Kompetenzen wird so in vielen Fällen ein einfacher, gut dokumentierter Weg vorgeschlagen, der zur Nachahmung einlädt und Mehrarbeit zu sparen verspricht. Die direkte Übernahme von *Default-Lösungen* lässt sich dabei, wie ich im Folgenden zeigen möchte, anhand konkreter Anwendungen thematisieren und in ihrer Fortführung im Kontext einer Standardisierungsdynamik problematisieren. Diese Dynamik betrifft sowohl die Einengung auf gewisse Körperformen und -kompetenzen, die sich unter Gender- und Ability-Gesichtspunkten als einseitig herausstellen, wie auch die Präfiguration

4 Zur Verbreitung von Unity vgl. Aleena Chia: *The metaverse, but not the way you think: game engines and automation beyond game development*. In: *Critical Studies in Media Communication*, Jg. 39, 2022, Heft-Nr. 3, S. 191-200; Eric Freedman: *The persistence of Code in Game Engine Culture*, New York 2020 sowie: Benjamin Nicoll, Brendan Keogh: *The Unity Game Engine and the Circuits of Cultural Software*, Cham 2019. Die größte Konkurrenz zu Unity ist die Unreal Engine, die zudem häufig in der Filmindustrie genutzt wird, vgl. James Malazita: *Enacting Platforms. Feminist Technoscience and the Unreal Engine*, Cambridge, MA, 2024. Da sich auch hier ein umfangreiches Netzwerk von umgebenden Angeboten wie einem spezifischen Marketplace entwickelt hat, lassen sich einige Parallelen zur hier angestellten Untersuchung ziehen, die sich aufgrund der höheren Heterogenität der Einsatzfelder auf Unity fokussiert.

von Verhältnissen zu virtuellen Inhalten, die sowohl durch die Vorprogrammierung von Handlungsoptionen wie auch in der gleichzeitigen Suggestion von Kontrolle geprägt sind.

4D-Entwicklungsumgebungen

Dieser Abschnitt bietet eine Übersicht über Elemente von 4D-Entwicklungsumgebungen unter besonderer Berücksichtigung der Plattform Unity, um im Anschluss ebenjene Standardisierungsdynamiken und deren *Defaulting*-Praktiken anhand von Beispielen aus Kunst, Forschung und Industrie zu analysieren. Folgende Elemente von Entwicklungsumgebungen werden dabei fokussiert:

- a) Game-Engines
- b) 3D-Grafiksuiten
- c) Tutorials und Samples
- d) Onlineresourcen und Asset-Stores⁵

a) Game-Engines

Game-Engines, mittlerweile teils auch unspezifischer bezeichnet als „Echtzeit-3D-Entwicklungsplattform[en]“⁶, stellen den zentralen Knotenpunkt der Entwicklung interaktiver 3D-Anwendungen dar.⁷ Hier werden unter anderem dreidimensionale Objekte und Szenarien, Bilder, Audio- oder Videoelemente, Schriftzüge, visuelle Effekte oder User-Interfaces arrangiert und mit Programmcode, also Skripten, gekoppelt. Diese Skripte ermöglichen sowohl das Vorprogrammieren gewisser Aktionsfolgen als auch interaktive Gestaltung und unterscheiden Game-Engines von reiner Grafiksoftware, in der auch Animationen und komplexe Abläufe erstellt werden können, diese aber nur linear und ohne Interaktion abspielen.

⁵ Weit mehr Programme können in die Entwicklung interaktiver 3D-Anwendungen involviert sein. Insbesondere 2D-Grafiktools zur Erstellung von Texturen und Digital-Audio-Workstations für die Klanggestaltung werden in der Regel ebenfalls genutzt, sind aber hinsichtlich der vorliegenden Fragestellung von peripherem Interesse.

⁶ <https://unity.com/de/products/unity-engine> [Stand 01/2025].

⁷ Auch zweidimensionale Spiele werden häufig in Game-Engines auf Basis eines 2D-Template erstellt. Dieser Text fokussiert sich auf dreidimensionale Anwendungen. Auch lassen sich selbstverständlich nicht alle Bestandteile dieser komplexen Software darstellen, sondern ein selektiver Überblick.

Im Bereich der Videospielementwicklung werden je nach Bedarf und Vorliebe unterschiedliche Engines mit jeweiligen Vor- und Nachteilen genutzt. So existieren kostenfreie Open-Source Projekte wie *Godot*, die eigenhändig erweitert werden können, oder die Unreal-Engine, die besonders für Hochglanz-3D-Spiele oder Animationsfilme genutzt wird. In dieser selektiven Übersicht fokussiere ich die Engine Unity, die in besonderem Maße für die Diffusion von Game-Engines in andere Branchen steht und insbesondere beim Launch 2005 mit der Demokratisierung der Entwicklung durch Vereinfachung des Zugangs warb.⁸

Das Unity-Interface besteht aus einer Szenenansicht, in der die verschiedenen Elemente in der jeweiligen Szene dargestellt werden und verschoben, rotiert und skaliert werden können (Abb.1). Alle Elemente der Szene (sogenannte Game Objects) werden in einer Liste, der *Hierarchy* aufgeführt (Abb. 1 links). Die Eigenschaften des angewählten Elements werden im *Inspector* angezeigt und können dort verändert werden (Abb. 1 rechts). Hier werden ebenfalls Skripte angezeigt, die mit dem jeweiligen Element gekoppelt sind (Abb. 1 unten links mit Raute-Symbol). Das Projektfenster zeigt eine Übersicht über weitere Dateien und Elemente, die zum Teil per Drag & Drop in die Szene eingefügt werden können. Das Game-Fenster zeigt schließlich den aktuellen Bildausschnitt der virtuellen Kamera.⁹ Sobald der Play-Button betätigt wird, kann in dieser Ansicht das Programm getestet werden, alle entsprechenden Skripte werden also aktiviert und beispielsweise ein Bewegen der Kameraposition per Pfeiltasten wird möglich.

Viele Elemente der Programmfunktion sind als *Default* voreingestellt, ohne dass auf den ersten Blick deutlich wird, dass es sich hierbei um veränderbare Wahlmöglichkeiten handelt. So gibt es bereits bei leeren Szenen einen umgebenden blauen Himmel samt Horizont, eine zentralperspektivische Kamera¹⁰

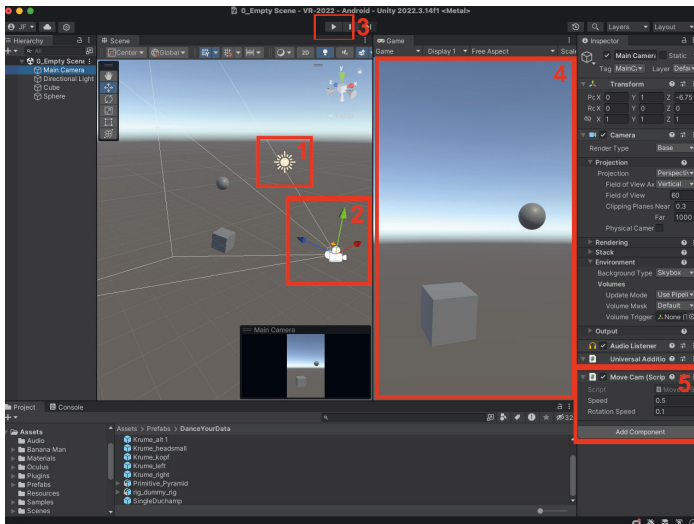
⁸ Vgl. Nicoll und Keogh 2019 (s. Anm. 4). Zur Kritik dieser user-friendliness als eine „Empowering Obfuscation“ vgl. Wendy Chun: *Programmed Visions. Software and Memory*, Cambridge, MA, 2011, S. 59-60.

⁹ Vgl. Jens Schröter: *Virtuelle Kamera. Zum Fortbestand fotografischer Medien in computergenerierten Bildern*. In: *Fotogeschichte*, Jg. 23, 2003, Heft-Nr. 88, S. 3-16. Zu aktuelleren Anwendungsfällen vgl. Tom Livingston: *Game Engines: Optimising VFX, Reshaping Visual Media*. In: *NECSUS - European Journal of Media Studies*, Jg. 13, 2024, Heft-Nr. 1, S. 180-201.

¹⁰ Zur Sedimentierung der Zentralperspektive als Realismus vgl. John Law: *After method. Mess in social science research*, London 2004, S. 22-23.

und ein voreingestelltes Licht. Objekte, denen die Eigenschaft ‚Festkörper‘ zugewiesen wird, fallen nach Drücken des Play-Buttons automatisch nach unten, da eine voreingestellte Physik-Engine die Schwerkraft simuliert. Und im Fall von AR oder VR vollzieht sich das gesamte Umgebungs- und Bewegungs-Tracking automatisiert im Hintergrund.¹¹ Es lässt sich also festhalten, dass diese Oberfläche zwar einen großen Gestaltungsspielraum eröffnet, aber gewisse Gestaltungsmittel und Funktionen weniger offensichtlich oder zugänglich sind und damit nahelegen, gewisse Voreinstellungen schlichtweg zu übernehmen.¹² Die *Default*-Struktur lässt sich so als eine Form des *nudging* verstehen, insofern vorgeschlagene Möglichkeiten Nutzer*innen dazu tendieren lassen, Voreinstellungen unhinterfragt zu übernehmen.¹³

Abb. 1, Annotierter Screenshot des User-Interface von Unity. 1: voreingestelltes Licht, 2: voreingestellte zentralperspektivische Kamera, 3: Play-Button, der das Programm ausführt und somit die Skripte aktiviert, 4: Game-Ansicht aus Perspektive der Kamera, 5: Skript, das dem Kameraobjekt zugewiesen wurde, als Teil des Inspektorfensters, das die Eigenschaften des ausgewählten Objekts anzeigt (Screenshot Verfasser)



11 Vgl. Jens Fehrenbacher: AR als Relationale Intervention. In: IMAGE. Zeitschrift für interdisziplinäre Bildwissenschaft, Jg. 20, 2024, Heft-Nr. 39S. 78-102.

12 Vgl. Nicoll und Keogh 2019 (s. Anm. 4) S. 63-64.

13 Zum sog. Default Effekt und dessen Kontext im sog. Nudging vgl. Lucia

b) 3D-Grafiksuiten

3D-Grafiksuiten decken häufig mehrere Aufgaben im Produktionsprozess von 3D-Anwendungen ab, etwa die Modellierung, Texturierung, Animation von 3D-Objekten und Szenerien sowie das Rendern der Ansichten, also das Exportieren von Bildern oder auch Filmsequenzen des jeweiligen 3D-Objekts. Manche Funktionsweisen, wie das Zuweisen von Texturen, Oberflächeneffekten oder Animation, werden in gewissem Maße sowohl von Game-Engines als auch von 3D-Grafiksuiten abgedeckt. 3D-Grafiksuiten halten jedoch weit mehr Funktionen zur konkreten Gestaltung der Elemente bereit, insbesondere das exakte, vielseitige Modulieren dreidimensionaler Formen (Abb. 2) und die Erstellung komplexer Animationen bei beweglichen 3D-Modellen. In 3D-Grafiksuiten können zwar potenziell ganze Filme produziert werden, aber in der Regel keine interaktiven Anwendungen. Ein typischer Workflow bei Videospiele besteht dementsprechend darin, dass Objekte in einer 3D-Grafiksuite moduliert, texturiert und bei Bedarf mit Animationen ausgestattet werden, woraufhin diese exportiert und in einer Game-Engine arrangiert und mit interaktiven Skripten versehen werden. Während auch zu 3D-Grafiksuiten umfangreiche Literatur vorliegt¹⁴, ist es für die vorliegende These, neben der Abgrenzung der Anwendungsfälle, insbesondere von Interesse, inwiefern die anspruchsvolle und zeitaufwendige Gestaltungsarbeit in 3D-Grafiksuiten in vielen Fällen umgangen wird, indem fertige Objekte aus Online-Bibliotheken übernommen werden.

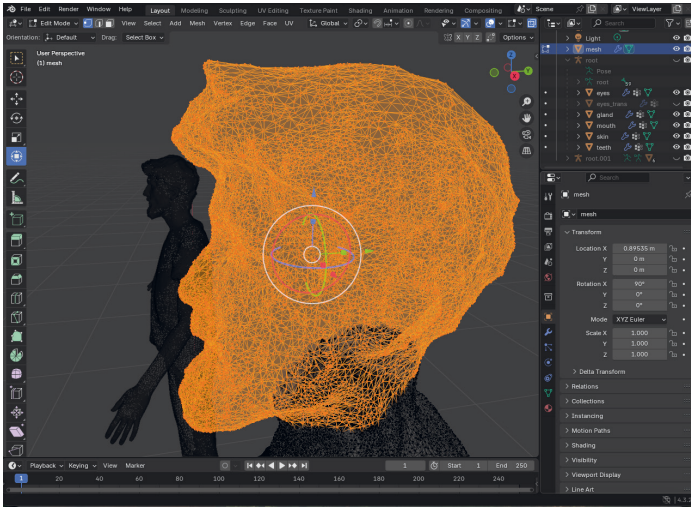
c) Tutorials und Samples

Die Tendenz der Vereinfachung von Workflows, die auf Anwender*innenseite häufig durch zeitlichen und damit finanziellen Druck begründet ist, lässt sich auch vor dem

Reisch, Wencke Gwozdz: Von der „Macht der Defaults“ und vom „sanften Stupsen“: Verhaltensökonomische Erkenntnisse als Impulse für eine effektive Ernährungspolitik. In: Angelika Ploeger, Gunther Hirschfelder, Gesa Schönberger (Hg.): Die Zukunft auf dem Tisch, Wiesbaden 2011, S. 323-336 und Isaac Dinner, Eric J. Johnson et al.: Partitioning default effects: Why people choose not to choose. In: Journal of Experimental Psychology: Applied, Jg. 17, 2011, Heft-Nr. 4, S. 332-341.

¹⁴ Vgl. etwa Carolin Scheler: Computergrafik - Zur Geschichte und Produktionsästhetik synthetischer Bilder, Bielefeld 2023.

Abb.2, Screenshot aus der 3D-Grafiksuite Blender im Edit Mode, in dem einzelne Ecken, Kanten oder Flächen eines 3D-Modells angewählt und verschoben werden können, was in der Regel bei Game-Engines nicht möglich ist (Screenshot Verfasser)



Hintergrund umfangreicher Hilfestellungen in Form von Tutorials und Samples betrachten, die größtenteils kostenfrei über Plattformen wie YouTube, GitHub oder das Unity Learn Kursystem abgerufen werden können.¹⁵ Bei letzterem werden in überblickshaften wie auch themenspezifischen Lernangeboten Umgangsweisen mit Unity erläutert, sodass sie selbst nachgebaut werden können. Um in den Tutorials gezielt die Game-Engine zu fokussieren und Vorarbeit in 3D-Grafiksuiten zu vermeiden, werden alle notwendigen Materialien wie 3D-Objekte, Landschaften und Texturen bereits in einem Zip-Paket zur Verfügung gestellt. So wird bereits im Lernprozess nahegelegt, weniger *from scratch* zu arbeiten, das heißt,

¹⁵ <https://unity.com/de/learn> [Stand 01/2025].

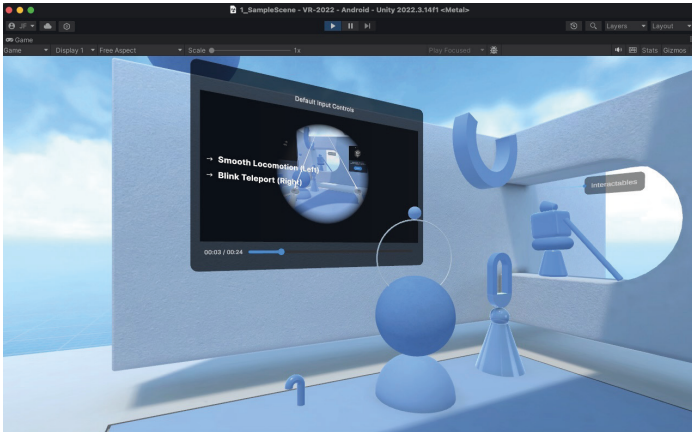
jedes Objekt und jeden Code selbst zu erzeugen, als vielmehr ein Collagieren bestehender Elemente zu vollziehen. Zudem orientiert sich die Auswahl an Themen und Herausforderungen an typischen, verbreiteten Anwendungsfällen. Die Steuerung einer Figur per Pfeiltasten, das Abfeuern von Projektilen und das Zählen von Treffern sind Bestandteile des Programmier-Basiskurses. Nischenthemen müssen häufig auf YouTube oder in Foren gesucht werden, wobei angebotene Lösungen häufig nicht mehr mit aktuellen Programmversionen kompatibel sind. Die Auswahl, was einfach erlernbar ist, prägt also in großem Maße, welche Anwendungen produziert werden.

Zusätzlich werden bereits mit dem Öffnen eines Unity-Projekts *Templates*, also Vorlagen angeboten, die auf jeweilige Anwendungsfälle zugeschnitten sind und häufig *Sample Scenes* enthalten. Im Fall des *VR-Templates* öffnet sich automatisch eine voll ausgestattete *Sample Scene*, mit Bewegungs- und Greif-Sripten, die darüber hinaus in einem In-Game-Video erklärt werden (Abb. 3). Diese *Sample Scene* kann erstens direkt auf ein VR-Headset geladen werden, sodass die Bedienung sofort getestet werden kann, und zweitens als Sammlung der jeweils entsprechenden Scripte verstanden werden, die per Copy & Paste auf beliebige eigene Projekte und Objekte übertragen werden können, ohne dass deren Verständnis vorausgesetzt wird. Hier wird also ein *Default* gesetzt, was unter VR verstanden wird, welche Nutzungsweisen als normal betrachtet werden und wie diese standardmäßig umzusetzen sind.

d) Onlineressourcen und Asset-Stores

Dass Anwender*innen schnell eigene Anwendungen aus Objekten collagieren können, hängt zudem mit dem breiten Angebot an Onlineressourcen zusammen, die Objekte, Landschaften, Texturen oder Skripte zum Kauf oder kostenlosen

Abb.3, Screenshot der Samplescene für VR-Anwendungen, die im VR-Modul der Software enthalten ist. In der Samplescene läuft ein Tutorialvideo ab (Screenshot Verfasser)



Download anbieten. Neben plattformunabhängigen Stores und Bibliotheken¹⁶ bietet auch hier die Unity-Plattform einen eigenen *Asset-Store* an, der gleichermaßen Kompatibilität mit der eigenen Software verspricht und weitere Wertschöpfung für das Unternehmen sichert.

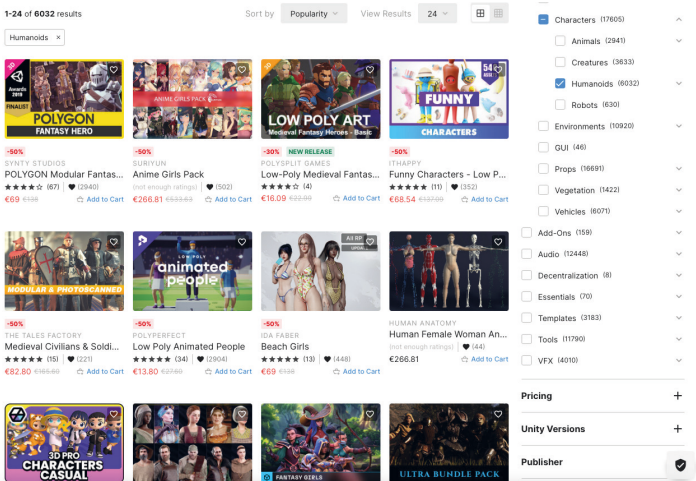
Auch die Übersicht über diese Angebote gibt Hinweise darauf, welche 3D-Modelle als typisch betrachtet, oft benutzt und somit auch im Store prominenter angezeigt werden.¹⁷ In der Kategorie „Humanoid Characters“, sortiert nach Popularität, finden sich neben Comic-Charakteren idealisierte mittelalterliche Helden, sexualisierte weibliche Figuren und eine Sammlung von über 100 Charakteren, die *by Default* allesamt die gleiche, helle Hautfarbe und keine sichtbare Behinderung aufweisen (Abb. 4).¹⁸ Bestehende Stereotype und normative, teils diskriminierende Körperbilder werden tendenziell also wiederholt. Auch hier ist zu betonen:

¹⁶ Etwa <https://www.cgtrader.com> [Stand 01/2025] bietet vermehrt auch kostenlose Objekte unter CC-Lizenzen an.

¹⁷ Vgl. Malazita 2024 (s. Anm. 4).

¹⁸ Vgl. „whiteness as the default“, André L. Brock: *Distributed blackness. African American cybercultures*, New York 2020, S. 5. Zur Andeutung einer intersektionellen Perspektive auf Default-Subjekte vgl. Catherine D'Ignazio, Lauren F. Klein: *Data feminism*. Cambridge, MA, 2020, S. 60.

Abb.4: Screenshot des Unity-Asset-Store. Anzeige ohne Suchbegriff mit den Filtern 3D/Characters/Humanoids, <https://assetstore.unity.com/?category=3d%2Fcharacters%2Fhumanoids&orderBy=1> [Stand 01/2025] (Screenshot Verfasser)



Mit spezifischeren Suchanfragen lassen sich auch Modelle finden, die von Stereotypen abweichen, ebenso wie sich stereotyp anmutende Modelle in 3D-Grafiksuiten modifizieren lassen. Für die Perspektive des *Defaultings* ist es aber von Bedeutung, welche Lösungen und Darstellungen schnell auffindbar und einfach zugänglich sind und somit umso häufiger ihren Weg in finale Anwendungen finden. Auf einer strukturellen Ebene des Unity-Ökosystems lassen sich die Dynamiken des *Defaultings* also zusammenfassen als:

- Übernahme von Voreinstellungen der Game-Engine selbst
- Rückgriff auf vorgeschlagene Lösungswege durch Tutorials und Samples
- Verwendung von Modellen aus Onlineresourcen, in denen stereotype Darstellungen dominieren.

Drei Schlaglichter des Defaultings

In der Gaming-Industrie hat sich die bereits kursierende Voraussage einer Verramschung des Marktes durch vorgefertigte Modelle und Interaktionslogiken laut dem Entwickler Bennett Foddy nicht bestätigt, da der Anspruch an Games weiterhin eine innovative, unverbrauchte Gestaltung sei.¹⁹ Außerhalb der Gaming-Branche werden jedoch andere ästhetische und arbeitsökonomische Ansprüche an Projekte gestellt, wodurch die Folgen dieser Asset-Libraries jeweils neu zu befragen sind. Einzelne Szenarien dieses *Defaultings* möchte ich in der Folge an konkreten Projekten und Problematiken in den Bereichen nachzeichnen, in welche die Medien der 4D-Entwicklung diffundieren. Dabei lässt sich sowohl die Herausbildung einer *Default-Ästhetik*, einer durch die Übernahme vorbereiteter Elemente geprägten, insbesondere optischen Gestaltung, wie auch eine *Default-Agency*, eine Verengung auf gewisse Interaktionslogiken, nachvollziehen.

Default-Körper in digitaler Kunst

In den digitalen Künsten drängt sich der Rückgriff auf Vorgefertigtes und Hilfestellungen vor allem aufgrund geringer Produktionsbudgets und des Mangels an vertieften Kenntnissen der hochkomplexen Entwicklungsumgebungen auf. Vor diesem Hintergrund lässt sich eine gestalterische Herangehensweise konturieren, die ich als *Default-Ästhetik* bezeichnen möchte und die in Kontinuität mit der langen künstlerischen Tradition der Collage gefundene Objekte modifiziert und arrangiert, häufig kombiniert mit der seriellen Vervielfältigung einzelner Elemente.²⁰ Wie bei der in Abb. 5 zu sehenden VR-Arbeit *Poly Mesh* (2021) des Kollektivs Banz & Bowinkel wird das Vorgefertigte, unendlich Duplizierbare

¹⁹ "For years now, people have been predicting that games will soon be made out of prefabricated objects, bought from a store, and assembled into a world. And for the most part, that hasn't happened, because the objects in the stores are trash. I don't mean they look bad or that they're badly made, although a lot of them are." Brennet Foddy zit. nach Nicoll und Keogh 2019 (s. Anm. 4), S. 106.

²⁰ Nicoll und Keogh haben dahingehend Manovichs Beschreibung der „deep remixability“ unterschiedlichster ästhetischer Praktiken und Gestaltungsprinzipien auf Game-Engines übertragen, vgl. Nicoll und Keogh 2019 (s. Anm. 4), S. 8; Lev Manovich: *Software Takes Command*. New York et al. 2013, S. 46, 267-268.

offen ausgestellt in Form einer Gruppe gleichförmiger, idealisierter digitaler Körper mit metallischer Textur, die sich lediglich durch hinzugefügte Masken unterscheiden. Die Schwierigkeit der eigenhändigen Erstellung komplexer und animierbarer Körper wird ausgeglichen mit dem Potenzial unendlicher Vervielfältigung vorgefertigter Modelle.

Dieses Motiv der *Default*-Objekte, insbesondere von vorgefertigten *Default*-Körpern, lässt sich in solchen digitalen Künsten häufig beobachten, die die Beschreibung einer *Default-Ästhetik* als Gestaltungsprinzip nahelegen. Die Schablonenhaftigkeit wird häufig konterkariert, etwa durch spezielle Texturen oder Oberflächeneffekte der Modelle, wie durch metallische Effekte bei *Poly Mesh* oder der Texturierung der Körper mit Aufnahmen von Organen bei Dominik Geis' *Body Vice* (2022) oder auch durch die Inszenierung der Körper als Dummies bei Et Atkins' *Ye Olde Food* (2019). Trotz dieser Brechungen zeigt sich in der Übersicht der Häufigkeit vorgefertigter Körper jedoch die Schiefelage, dass kaum nicht-idealisierte Körper zu sehen sind. Zwar hat nicht zuletzt die Bewegung des Cyberfeminismus gezeigt, dass jegliche denkbare Körperform digital erzeugbar ist²¹, und auch aktuelle Beispiele wie *Posthuman Wombs* (2021) von Anan Fries & Malu Peeters

Abb.5. Still aus der VR-Arbeit *Poly Mesh* (2021) von Banz & Bowinkel (<https://www.banzbowinkel.de/project/poly-mesh/> [Stand 01/2025])



21 Zum Cyberfeminismus in der Medienkunst vgl. Zoe Sofia: *Contested Zones. Futurity and Technological Art*. In: *Leonardo*, Jg. 29, 1996, Heft-Nr. 1, S. 59-66.

folgen dem Prinzip, mit Körperdarstellungen konträr zu Normvorstellungen zu experimentieren. In weiten Teilen der digitalen Künste verfestigt sich jedoch der digitale Körper als ein idealisierter Körper, wodurch auch trotz ironischer Brechung letztlich Dynamiken der Ausgrenzung und Verunsichtbarung abweichender Körper wiederholt und verfestigt werden.

Vorprogrammierte Agency in der Forschung mit virtuellen Klassenzimmern

In der Forschung mit VR zeigen sich ähnliche Problematiken hinsichtlich Budgets und Kompetenzen wie in den digitalen Künsten. Am Beispiel virtueller Klassenraum-Experimente lässt sich dabei zeigen, wie neben einer *Default-Ästhetik*, die allerdings nicht ironisch gebrochen wird, auch die strukturell bedingte Vorprogrammierung von Handlungsspielräumen zu Dynamiken der Standardisierung beiträgt. VR-Klassenzimmer kommen in Psychologie und Erziehungswissenschaft vermehrt zum Einsatz, um das Verhalten von Proband*innen zu klassifizieren (Psychologie) oder um zu testen, wie Proband*innen selbst das Verhalten virtueller Akteure klassifizieren (Erziehungswissenschaft, insbesondere Lehrer*innenbildung).

Da komplexe soziale Interaktion nach derzeitigem Stand der Technik kaum adäquat simuliert werden kann, dominiert eine binäre Wenn-Dann-Logik des erfolgreichen oder misslungenen Lösens simpler Aufgaben, die sich an gut dokumentierten Gaming-Prinzipien orientieren. In zahlreichen psychologischen VR-Experimenten wird etwa die Diagnose ADHS, die ein überaus vielgestaltiges Symptombild abdecken kann, darauf reduziert, wie oft von einer vorgesetzten, möglichst langweiligen Aufgabe abgeschweift wird (Abb. 6).²² Ähnliches zeigt sich in der erziehungswissenschaftlichen Erforschung von Lehrverhalten in VR, wo häufig nur das Registrieren eines störenden

²² Vgl. Annika Wiebe, Kyra Kannen et al.: Multimodal Virtual Reality-Based Assessment of Adult ADHD: A Feasibility Study in Healthy Subjects. In: *Assessment*, Jg. 30, 2023, Heft-Nr. 5, S. 1435-1453. Zur Übersicht von VR in der psychologischen Forschung vgl. Annika Wiebe, Kyra Kannen et al.: Virtual reality in the diagnostic and therapy for mental disorders: A systematic review. In: *Clinical Psychology Review*, Jg. 98, 2022, Artikel 102213.

Verhaltens von virtuellen Schüler*innen erkannt wird, aber nicht die umsichtige Reaktion auf oder gar Prävention eines solchen.²³ Aus der Anzahl der Fehler ergibt sich eine Score, die, so zumindest die Hoffnung, die Leistung der Lehrer*innen wiedergibt oder gar zu einer ADHS-Diagnose führen kann.

Wie im vorigen Abschnitt gilt auch hier, dass es nicht einzelne Experimente sind, durch die das *Defaulting* auf einer Metaebene problematisch wird, sondern die Schieflage, die resultiert, wenn die Repräsentation von Schule, Unterricht oder Lernen in VR weitgehend auf defizitorientierte Anordnungen reduziert wird, die einer binären Logik von richtig und falsch folgen. Analog zur *Default-Ästhetik* lässt sich hier eine *Default-Agency* beschreiben, die eine standardmäßige Beschränkung auf gewisse, durch Interaktions-Presets geprägte Handlungsoptionen nahelegt, die sich zur Gamifizierung oder

Abb. 6. Abbildung zur Darstellung des Experimentalsetups in Wiebe, Kannen et al. 2023 (s. Anm. 22)



Figure 1. The Virtual Seminar Room.

(A) Real-world third-person perspective and (B) first person perspective in the virtual environment. Participants were immersed into the Virtual Seminar Room (VSR), in which the continuous performance task (CPT) was presented at the canvas in front of the room.

23 Vgl. Yizhen Huang, Eric Richter et al.: Classroom complexity affects student teachers' behavior in a VR classroom. In: Computers & Education, Jg. 163, 2021, Artikel 104100; Axel Wiepke, Eric Richter et al.: Einsatz von Virtual Reality zum Aufbau von Klassenmanagement-Kompetenzen im Lehramtsstudium. In: DELFI, 2019, S. 133-144. Zur kritischen Perspektive auf diese Entwicklungen und die einhergehende Defizitorientierung vgl. Nicola Przybylka: Teach-R. In: Florian Sprenger, Patrizia Breil (Hg.): Virtuelle Universität - Geistes- und gesellschaftswissenschaftliche Zugänge, Bielefeld (im Erscheinen).

quantifizierten Auswertung anbieten. Responsive und eigen-sinnige Interaktionen jenseits des Prinzips der kontrollierten Einwirkung sind zwar möglich, aber bleiben unter anderem durch technische Herausforderungen Randerscheinungen.

Reinigung und Gamification im industriellen Digital Twinning

Zuletzt möchte ich mich einem Fall zuwenden, in dem derzeit neue *Defaults* entstehen. In einer browserbasierten Demo-Anwendung für das sogenannte *Digital Twinning* sollen die Vorteile einer virtuellen Simulation, etwa industrieller oder logistischer Anlagen, vorgeführt werden. Der Kombination aus einer Gaming-Optik und einer *Default-Agency*, also einem festgeschriebenen Set an Handlungsmöglichkeiten, wird dabei ein lebensechtes, interaktives Erlebnis zugesprochen.²⁴

Das User-Interface, das an ein Strategievideospiel erinnert, ermöglicht in dieser Demo die Überwachung einer fiktiven Fracking-Anlage in einem Wald in Ecuador und erlaubt das Heranzoomen an einzelne Geräte oder Tanks (Abb. 7).²⁵ Dabei wird als realistischer *Digital Twin* nur eine hochgradig selektive und gereinigte Version dieser Stätte präsentiert. Die menschlichen Arbeiter*innen sind ebenso wenig Teil dieser Darstellung wie Tiere, wuchernde Pflanzen oder die Verschmutzung des Grundwassers. Nicht nur das Fracking selbst stellt hier also eine Extraktionsbewegung dar, sondern auch die sterile Darstellung der Kontrolle der Anlage aus der Entfernung, die von weiß gelesenen Männern von einer Metropole aus überwacht und gesteuert werden kann, wie eine kurze Einblendung im Video zur Demo suggeriert. Die spielerische Vermittlung von Übersicht und Kontrolle geht also einher mit einer vielschichtigen Dynamik der Verunsichtbarung potenziell widerständiger, gewaltvoller oder extraktiver Prozesse.

²⁴ Die Unity-Plattform bewirbt dies explizit für Unternehmen als Echtzeit-3D und als „immersiv, weil die digitale Nachbildung der Realität lebensecht ist und der Authentizität unserer analogen Wahrnehmung der Realität sehr nahekommt, sowie [...] interaktiv, weil Nutzer, fast wie bei einem Videospiel, direkte Kontrolle über ihr Erlebnis haben.“ <https://unity.com/en/solutions/automotive-and-transportation> [Stand 01/2025]. Da sich die Webseite derzeit häufig ändert, ist nicht garantiert, dass Links und Inhalte dauerhaft existieren. Der Verfasser hat diese archiviert.

²⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=XHDRxqVrR-4> [Stand 01/2025].

Default-Ästhetik und Default-Agency

Anhand dieser kurzen Schlaglichter deuten sich vielseitige Risiken in der fortlaufenden Herausbildung von *Default-Ästhetiken* und *Default-Agencies* an. Wiederholt lassen sich Dynamiken von Normativierung, Ausschluss und Verunsichtbarung im Zusammenhang mit der Orientierung an gestalterischen wie interaktiven Prinzipien von Videospiele herausarbeiten, die von 4D-Entwicklungsumgebungen nahegelegt werden. Sowohl hinsichtlich der Plattformen und umgebender Angebote selbst wie auch deren Diffusion in unterschiedlichste Bereiche lassen sich also zahlreiche Desiderate für medienwissenschaftliche Untersuchungen ausmachen: detaillierte Studien der Voreinstellungen der Programme, der Onlinere Ressourcen wie Tutorials und Asset-Stores sowie ihres Einflusses auf die Anwendungsentwicklung über den Gaming-Bereich hinaus, wobei jeweils ein besonderes Augenmerk darauf zu richten ist, welche Gestaltungsoptionen dabei ausgeschlossen oder erschwert werden. Dabei plädiert der vorliegende Text insbesondere dafür, in Verschränkung mit der rezeptiven Betrachtung der Anwendungen ebenfalls strukturelle Produktionsbedingungen zu analysieren. Ausgehend von einzelnen Anwendungsbeispielen lässt sich so der Blick auf grundsätzlichere Implikationen dieser Diffusions- und Umnutzungsdynamik richten.

Abb.7. Still aus dem Imagevideo Digital twins for site operations | Unity (s. Anm. 24). Das Video ist nicht mehr auf der offiziellen Unity-Webseite verlinkt, aber weiterhin auf YouTube abrufbar: <https://www.youtube.com/watch?v=XHDrxqVrR-4> [Stand 01/2025]



4D Imaging Tools in Architectural Co-Creation: The Role of Mixed Reality in Collaborative Spatial Design

Impact of 4D Imaging on Architecture

Frank Lloyd Wright once remarked on the value of physical models in architecture: “The model is now finished. It is a great beauty. It will save us many thousands of dollars in the construction of the building, as any dubious points in the plans are cleared up immediately by a look at the model.”¹ Wright’s early insight into how physical models enhance spatial perception underscores the long-standing value of sensory engagement in architectural design.

While no digital approach has fully captured the tactile and spatial qualities of physical models, the introduction of 4D imaging technologies² is shifting architectural design processes towards more immersive, human-centered approaches. These aim to replicate and enhance the sensory experiences traditionally offered by physical models, expanding the possibilities for spatial interaction.

The classic design process begins with conceptualization, usually in the form of sketches (2D) or initial physical models. At this stage, ideas and basic concepts are put on paper, with

1 Frank Lloyd Wright: Letter to Solomon R. Guggenheim, 1945, <https://franklloydwright.org/illuminating-details-frank-lloyd-wrights-guggenheim-blueprints/> [Accessed 01/2025].

2 “4D imaging” or more broadly “4D technologies” refers to virtual reality (VR) and augmented reality (AR), extended reality (XR) hardware, and the necessary technological infrastructure. “4D imaging tools” or “4D tools” refers to the visualization and its temporality that allows interaction in the software applications. It is used in specific workflows depending on the expertise. See Matthias Bruhn, Kathrin Friedrich, Moritz Queisner: Adaptivität - die Zukunft digitaler Bildgebung? In: Matthias Bruhn, Kathrin Friedrich, Lydia Kähny, Moritz Queisner (eds.): Adaptivität (Begriffe des digitalen Bildes, 1), München 2021, pp. 85-90, <https://doi.org/10.5282/ubm/epub-76331>.

the architect or designer focusing on key spatial, functional, and aesthetic considerations.³

From today's perspective, physical models and early prototypes offer limited visual interaction, restricting design exploration. The designer can view the design and, in the case of the model, physically walk around it, but the interactivity with the space and the experience of the architecture is limited. These methods do not allow flexible, spontaneous, real-time adaptation of the design. Emerging digital design-to-fabrication technologies, coupled with the evolution of computer-aided design (CAD) and building information modelling (BIM),⁴ have changed the ability to translate digital models into precise physical components.

Spatial interaction with 4D tools such as virtual reality (VR) and augmented reality (AR) is the key to shaping the early design process here. As a result, the role of the physical model, which was central to the traditional design process, has changed significantly compared to the digital model. While the physical model usually facilitates a *first-person* perspective as a tangible, spatial object, with which the architect interacts directly, the digital model enables a fully interactive *third person* perspective. The term *immersion* is often used to describe the full experience and sense of being there.⁵ VR allows the designer to enter the space and experience the architecture directly and from multiple perspectives, both in terms of proportions and emotional experience (how does the space feel?).

3 For a deeper understanding of the architectural design process, the works of Donald Schön (The Reflective Practitioner), Christopher Alexander (A Pattern Language), and Christian Gänsshirt (Tools for Ideas) are recommended. These offer a rich foundation for studying the nature of architectural design, though exploring them in detail would be beyond the scope of this article.

4 Mario Carpo: A Short but Believable History of the Digital Turn in Architecture, 2023, <https://www.e-flux.com/architecture/chronograms/528659/a-short-but-believable-history-of-the-digital-turn-in-architecture/> [accessed 01/2025]. The development of CAD and BIM is covered in detail by Mario Carpo in his works Digital Turn and Second Digital Turn, where he describes the introduction of CAD in the 1960s by Ivan Sutherland at MIT and the later introduction of BIM in the 1980s and 1990s. Carpo shows how these technologies changed the relationship between design and fabrication and led to closer integration between design and construction. Further details can be found in Mario Carpo, Digital Turn (2013) and Second Digital Turn (2017).

5 William R. Sherman, Alan B. Craig: Understanding Virtual Reality. Interface, Application, and Design, Amsterdam et al. 2003, p. 381.

Mixed reality (MR)⁶ technologies extend beyond static visual representation by integrating both physical and digital spaces. Within MR, augmented reality (AR) plays a key role, allowing digital images to be seamlessly layered within the user's field of view. This enhances interactivity and enables real-time co-creation, allowing designers and stakeholders to engage with spatial designs more dynamically. Furthermore, MR incorporates dynamic visual experiences, such as moving images and virtual walkthroughs, to deepen the immersive engagement with the design. Within this MR framework, 4D tools allow immediate adjustments to the design, providing dynamic insights into how real-time changes impact the overall project. Together, these technologies create a collaborative, agile, and multi-sensory design environment, where real-time co-creation and iterative adjustments drive innovation and deeper understanding.

MR not only facilitates real-time interaction between architects and stakeholders, whether they are co-located⁷ or working remotely. It also integrates both physical and digital elements, such as models, into a hybrid, multi-sensory environment. This fosters deeper collaboration and allows design to be explored from different sensory, emotional, and temporal perspectives early in the design process. These insights would be difficult to achieve using traditional methods alone. In response to this, the project explores new approaches.

Applying 4D Imaging: A Case Study in Educational Design Projects

This article provides a detailed case study of the master's project *bridging+*,⁸ led by Prof. Dr. Nadine Zinser-Junghanns and

6 Mixed reality (MR), encompassing virtual reality (VR) and augmented reality (AR), enables 4D imaging. To provide context for its current implementation, an early reference is Ronald Azuma: A Survey of Augmented Reality. *Teleoperators and Virtual Environments*. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, 1997, No. 4, pp. 355-385, <https://doi.org/10.1162/106474697568434>.

7 'Co-located' is used here in two ways: first, to describe team members working together in the same physical space (e.g., office or city), and second, in reference to the Arkio virtual system, where all users' devices are synced in a shared 3D modelling session.

8 The hybrid project *bridging+*, initiated by Prof. Dr. Nadine Zinser-Junghanns (remote support from Shanghai, China) and led locally by research associate Carolin Schabbing, M.A. (MR support), was selected as a use case in the Corporate Architecture (COA) course at

research associate Carolin Schabbing, M.A. It explores how 4D imaging technologies enhance spatial design and interdisciplinary co-creation in real-world educational settings. It combines theoretical assumptions with practical insights from M.A. students' experiences and feedback, revealing both the benefits and challenges of implementing these technologies in the classroom. Although marketing proposals promise seamless integration, their actual implementation reveals a more complex landscape of interdisciplinary⁹ collaboration, requiring adjustments in educational settings and technical infrastructure.

The integration of 4D imaging into conventional architectural design processes also requires significant adjustments to the technical infrastructure and educational environment. At the same time, it promotes a new focus on interdisciplinary co-creation. This research focuses on the use of 4D technologies in spatial design and education, specifically through the Corporate Architecture (COA) master's program at TH Köln and the *bridging+* project. The project serves as an important case study, offering a practical example of how 4D tools influence co-creation in spatial design, particularly within an academic teaching context. To gather qualitative insights, the study collects data from various sources, including screenshots from the architectural VR/AR software Arkio, field notes, research surveys, and materials from the Arkio community.¹⁰

The M.A. project *bridging+* offers practical insights into the use of MR tools, specifically Arkio software (founded in 2017)¹¹ and Meta's Quest 2 hardware. These tools were selected by the author for their potential to enhance collaborative design and facilitate intuitive, co-creative spatial design processes.

4D imaging, a conceptual framework within the broader field of MR, extends the consideration of immersive experience by

the Faculty of Architecture at the at TH Köln - University of Applied Sciences (AKöln) during the summer semester of 2024.

- ⁹ The interdisciplinary aspect of co-creation using 4D tools such as Arkio is crucial because it enables a level of integration and interaction that traditional workflows cannot replicate. By breaking down the silos between disciplines, 4D technologies allow more holistic design processes, where real-time feedback, mutual understanding, and agile adaptations lead to more effective and innovative solutions. This is more than just collaboration; it is a deep, dynamic exchange of expertise, which results in better architectural outcomes.
- ¹⁰ Arkio Community, <https://community.arkio.is/> [Accessed 07/2024].
- ¹¹ Arkio featured as a launch app for Meta Quest Pro (October 14, 2022), Northstack, <https://www.northstack.is/arkio-featured-as-a-launch-app-for-meta-quest-pro/> [Accessed 08/2024].

incorporating the temporal dimension into virtual spatial design. Unlike traditional static models or 3D visualizations, 4D tools enable the dynamic evolution of designs in real time, with an emphasis on co-experiencing how spatial arrangements evolve over time. This capability enhances the collaborative design process by enabling virtual interactions that reflect real-time adjustments and transitions, providing a deeper level of insight into how design elements behave and evolve in a temporal context. The use of these technologies in educational settings leads to the question of how 4D imaging can transform co-creation in spatial design processes. How do MR tools enhance creative workflows, and how do they support learning and collaboration in architectural design? The opportunities and challenges of 4D imaging in spatial design can be understood through two key dimensions: first, its influence on virtual spatial co-experiences (Fig. 1) and co-creative design practices, and second, its role



Fig. 1, Model: Folding bridge, Students: Luca Christ, Kevser Gündoğdu, Francis Cüpper (TH Köln, MA course bridging+ SoSe2024, Image: Carolin Schabbing)

in facilitating interdisciplinary collaboration, where diverse technical and creative expertise must align to optimize these practices.

Three key areas where these impacts are most apparent are: a) technology management expertise, b) collaborative communication and design, and c) workflow and data management. While 4D imaging offers significant potential for real-time collaboration in hybrid environments, integrating these tools into existing workflows, such as architectural design, remains a challenge. The shift from physical models to digital tools highlights a move towards more dynamic co-creation and communication in the design process,¹² but realizing the full potential

¹² Hubert Locher, Florian Henrich: Zur Dialektik des digitalen Bildes im Architekturprozess. In: Hubert Locher, Dominik Lengyel, Florian Henrich, Catherine Toulouse (eds.): *Rendering / Visualisierung (Begriffe des digitalen Bildes)*, 5), München and Wien 2024, pp. 74-92, <https://doi.org/10.5282/ubm/epub.109214>.

Fig. 2. Final presentation: XR presentation using the software Arkio (TH Köln, M.A. course bridging+, SoSe 2024; image: Theo Zenker)



of 4D tools requires overcoming integration hurdles.

Virtual workspaces such as Arkio make it possible to leave a workspace in its current state during the work process. Adding thoughts or criticisms as notes and creating prototypes for later discussion with colleagues or for meetings in hybrid digital environments (e.g., remotely, in the office, or on construction sites) (Fig. 2) enables the team to work across different schedules.

Imagine you are an architecture student. For your M.A. course project, you are asked to design an analogue model and a virtual prototype¹³ of that model. The model consists of a cycle-and-pedestrian bridge across the river Rhine, linking Cologne's Südstadt district with the Deutz harbor (Fig. 3).

This scenario sets the stage for the *bridging+* project, which integrated MR and artificial intelligence (AI) technologies to

¹³ The tension between "analogue" and "virtual" design methods lies in the different modes of interaction: while analogue models provide haptic perception and a tangible experience of the design as a scaled-down model, virtual models (such as MR/4D) offer enhanced possibilities for real-time interactivity and perception, such as scaled models and light simulations throughout the day and night to help understand window and material choices. A combination of the two methods could open up new dimensions in the design process.

Fig. 3. Model: connect+, Students: Michel Seegers, Helen von Vöhren, Marie-Theres Dünker (TH Köln, M.A. course bridging+, SoSe 2024; image: Carolin Schabbing)

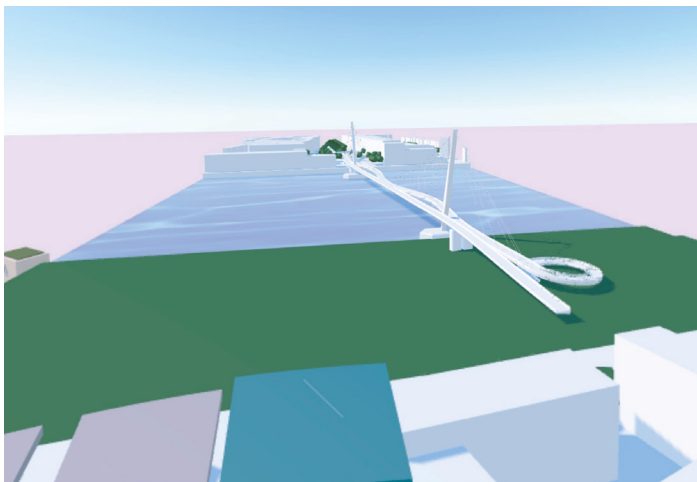


Fig. 4. VR-Showroom digital presentation in VR; Model: social bridge+, Students: Linus Bäumer, Carlo Lambrecht, Marie von Wirth (M.A. course bridging+ SoSe2024, Image: Carolin Schabbing)

support the design process. As part of this project, students were required to engage with these tools to collaborate, visualize their designs in Arkio in real time for feedback, explore hyper-realistic environments,¹⁴ and simulate outcomes. (Fig. 4)

The *bridging+* project encourages students to test, implement, and apply cutting-edge technologies while considering the cultural and social implications of their designs. It enables them to explore how new tools can enhance spatial design, improve workflow, and influence the future of architectural practices

¹⁴ Hyper-realistic environments are virtual spaces that replicate the physical world with extreme detail and accuracy, aiming to create immersive, lifelike experiences through advanced rendering and sensory simulation.

The integration of 4D tools into architectural workflows presents challenges, particularly in achieving a fluid user experience. This research contributes to further development by exploring how spatio-temporal interaction and real-time 4D editing are reshaping collaboration in early architectural design processes. By focusing on the use of Arkio in education, *bridging+* demonstrates the possibilities for interdisciplinary co-creation in virtual spatial interaction, allowing people to work on a model from different locations and with a time delay,¹⁵ revealing an emerging potential for more inclusive working processes. These technologies enable students to adapt to real-time visualization in review sessions and experience their designs aesthetically, understanding the emotional response triggered by the designs. They also highlight the growing intersection of traditional design practices with new digital practices.

From Theory to Practice: Field Observations in Spatial Design Through 4D Imaging Tools

The observations from *bridging+* illustrate how 4D imaging technologies enhance both co-creative design processes and interdisciplinary collaboration in educational settings. For example, the real-time editing and room-tracking features in Arkio enabled students to explore new design possibilities, transforming group brainstorming sessions into real-time 4D modelling, quickly sketching ideas in 4D, standing in space, using digital walkthrough presentations and engaging dynamically with stakeholders (Fig. 5 and 5.1). This new way of practicing and experiencing reviewing sessions was viewed positively by students.

¹⁵ This causes the Meta Quest 2 to look for the same spatial anchors on other nearby devices so that they can align and join the co-located group. The other co-located users are locked into the same position when the host locks their model position in god scale or human scale. Thus, users can see the same aligned model on the top of a table in a full-scale or human-scale mixed reality, where the Arkio scenery is aligned with the real world for digital twin superimposition or borderless exploration in virtual or mixed reality. See Johan Hanegraaf: Colocated mixed reality, 2025, <https://support.arkio.is/hc/en-us/articles/13477304942876-Colocated-mixed-reality> [accessed 01/2025].

Fig. 5, Arkio v1.6, Digital walkthrough presentations and engaging dynamically with stakeholders (<https://www.youtube.com/watch?v=jGytxvsepx4> [accessed 04/2025]; <https://www.youtube.com/watch?v=IL010r0k1bo> [accessed 04/2025])

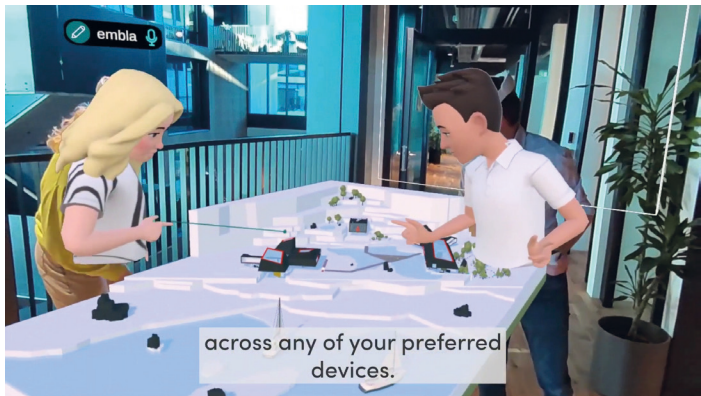


Fig. 5.1,
Model: Folding bridge,
Students:
Luca Christ,
Kevser Gündoğdu,
Francis Cüpper
(TH Köln,
MA course
bridging+
SoSe2024,
Image:
Carolin
Schabbing)

Utilising Arkio within the project facilitated testing and provided a snapshot of current 4D technologies. Identifying gaps in educational content, hardware/software interaction, infrastructure, and MR media expertise needed for effective integration into educational settings. In this context, *bridging+* serves as both a tool for insights and a platform for students and educators to explore how 4D tools can reshape architectural practice, design processes, and educational approaches. The project identified two key areas: 1. The impact of 4D imaging technology on co-creative design processes, and 2. the interdisciplinary collaborative infrastructure and technology management

expertise. These findings reflect both student and educator perspectives, offering early insights into how 4D imaging is transforming the design process and the supporting infrastructure.

The Impact of 4D Imaging Technology on Co-Creative Design Processes

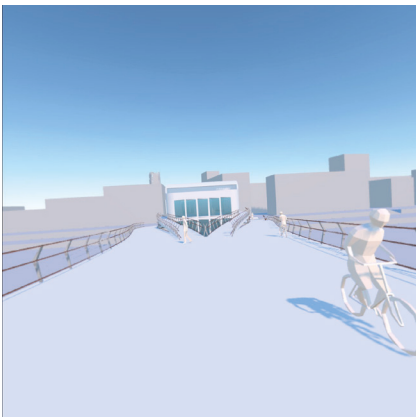
This first area investigates the impact of 4D imaging technology on co-creative design processes, emphasizing how it fosters experiential learning, emotional engagement, and teamwork. It shows the observed effects of 4D tools on skill development, the adoption of new methods, and the experiential nature of design across three interrelated levels:

a) Sensory Engagement (Sensual): The immersive experience of 4D tools allows designers to move through their models at full scale, creating a deeper emotional connection with the space. Students and stakeholders interacting with the bridge model in the context of Cologne gained critical insights into how design choices influence the perception of the space. (Fig. 6 and 6.1)

During the *bridging+* project, students used Arkio to navigate¹⁶ a virtual cityscape and explore their bridge concept in the context of Cologne. This allowed them to feel the space,

considering it from a pedestrian viewpoint and assessing scaling, positioning, and accessibility, particularly with regard to the bridge's landing-area and its connection to the riverbanks (Fig. 7).

Fig. 6. Bridge view in VR-hybrid space+HUB: Model: bridging+ Pietro Mazzucchi, Sebastiano Montorsi, Carolina Pica (M.A. course bridging+ SoSe2024, Image: Carolin Schabbing)



Real-time feedback and peer discussion facilitated iterative design adjustments in an interactive environment. This aligns with the notion that technology (such as Arkio) is a non-human actor that shapes and influences the actions of human designers. The feedback loops between the students, the tool, and the design are a form of co-creation, which is continuously being shaped by the technological features and capabilities of Arkio. Sensory engagement was key to creating designs that met the needs of the community. Such engagement felt authentic and helps to ensure that designs meet future users' realistic needs. Students were able to reflect on the emotional impact of interacting with the model and strengthen the feedback culture.¹⁷

b) Collaborative Decision Making (Emotional): Real-time, co-creative collaboration using Arkio provides a dynamic way to reduce cognitive overload while enhancing emotional and sensory engagement in the design process. Students can directly manipulate the virtual model, explore design elements and experiment with functional and aesthetic adjustments. They can play around with different elements, for example spraying graffiti on the walls, developing 3D sketch ideas, or placing a sailboat from the Arkio library on the river (Fig. 8). This immediate, hands-on interaction fosters a sense of ownership and emotional connection with the design, while the



Fig. 6.1, Virtual bridge walk: Model: bridging+ Pietro Mazzucchi, Sebastiano Montorsi, Carolina Pica (M.A. course bridging+ SoSe2024, Image: Carolin Schabbing)



Fig. 7, Bridge's landing area: Model: social bridge+: Linus Bäumer, Carlo Lambrecht, Marie von Wirth (M.A. course bridging+ SoSe2024, Image: Carolin Schabbing)

¹⁶ In the Arkio environment, the user must teleport to move forward.

¹⁷ This mirrors the operational analysis proposed by Friederich and Hoel, where technologies like Arkio are seen as non-human actors that mediate, alter, and shape the way we interact and create. This concept is akin to Latour's idea that the tool itself becomes an active participant in the design process, influencing not just the outcome but the way it is co-created. See Kathrin Friederich, A S Aurora Hoel: Operational analysis. A method for observing and analyzing digital media operations. In: *New Media & Society*, Vol. 25, 2021, No. 1, pp. 50-71. Online first: <https://doi.org/10.1177/1461444821998645>.



Fig. 8,
Perspective
water view
to bridge
model, Mod-
el: social
bridge+:
Linus Bäu-
mer, Carlo
Lambrecht,
Marie von
Wirth (M.A.
course
bridging+
SoSe2024,
Image:
Carolin
Schabbing)

ability to make real-time changes allows for faster decision-making and evolving designs.¹⁸

Sweller's cognitive load theory defines "intrinsic load" as the inherent complexity of a task, such as architectural design. As design tasks grow more complex, intrinsic load increases. However, Sweller also identifies the significance of "extraneous load" (unnecessary cognitive effort) and "germane load" (cognitive effort that contributes to learning). In architectural education, immersive tools such as Arkio can help reduce extraneous load by simplifying technical challenges and increase germane load by fostering emotional engagement and facilitating iterative design.¹⁹

Unlike traditional design reviews, which suffer from delayed feedback (e.g., due to tight schedules or time lags) and abstract critique (e.g., feedback lacking context from direct interaction with the model), real-time feedback in 4D environments such as Arkio enables students to interact with the model from multiple perspectives, move freely within it, and make immediate adjustments based on sensory and emotional cues. While this workflow offers significant advantages, it is still evolving. The process potentially reduces cognitive load by eliminating trial and error, accelerates decision-making, and encourages more effective collaboration. For example, students can quickly test and revise ideas in real time rather than waiting for feedback on static models. By capturing feedback, creating sketches, and integrating changes via tools such as the Arkio-Rhino plugin, the system supports continuous revisions, streamlining the design process.

¹⁸ Ibid. This is consistent with Friederich and Hoel's concept that technologies like Arkio mediate and shape the design process. As students manipulate the virtual model in real time, they not only make functional and aesthetic adjustments but also develop an emotional connection to the design through immediate, interactive engagement. This dynamic, co-creative process reflects how technology actively influences the evolution of design, facilitating a deeper emotional and sensory engagement.

¹⁹ John Sweller: Cognitive load during problem solving. Effects on learning. In: Cognitive Science, Vol. 12, 1988, No. 2, pp. 257-285.

c) Design Process (Practical): The integration of 4D tools such as Arkio has accelerated iteration and made design processes more intuitive, but it requires significant adjustments to traditional workflows, particularly in interdisciplinary co-creation, media literacy, communication, and design management. The introduction of 4D imaging prompted both students and lecturers to develop new strategies. The students' first contact with virtual reality (VR) generated an enthusiastic response. Students laughed, spoke excitedly into their microphones, and playfully interacted by scaling each other's avatars²⁰ from tiny to oversized, adding a sense of fun and engagement. Navigating VR and working with Arkio as an AR tool on the Meta Quest 2 presented new challenges compared to traditional physical models (Fig. 9).²¹

Although high-resolution, immersive environments on head-mounted displays (HMDs) offered exciting new possibilities, they also posed technical challenges, such as latency issues (Fig. 10).

Students adapted new problem-solving approaches to the 4D environment. Bottino et al. demonstrate how activity theory can provide a useful framework for understanding the influence of information and communication technology (ICT) tools such as Arkio on the design process.²² As Kuutti has argued, specific conscious goals are driven by actions



Fig. 9, Scale Avatar, glitch, loading VR Scene, Model: Zickzack, Students: Mert Saraf, Chelsea Britney Gonzales, Finn Nellesse (M.A. course bridging+ SoSe2024, Image: Carolin Schabbing)



Fig. 10, Latency, loading VR Arkio Model scene, Model: Parabola+, Lea Traue, Jana Huck (M.A. course bridging+ SoSe2024, Image: Carolin Schabbing)

²⁰ Avatars are digital representations of individuals within a mixed reality (MR) environment.

²¹ For example, they began using and learning new software, such as Rhino (CAD), for a better workflow in Arkio for 4D modelling.

²² Rosa-Maria Bottino, Giancarlo Chiappini, Paola Forcheri, Enrica Lemut, Maria-Teresa Molino: Activity theory. A framework for design and reporting on research projects based on ICT. In: Education and Information Technologies, Vol. 4, 1999, pp. 279-293, <https://doi.org/10.1023/A:1009692126355>.

and therefore inherently shaped by the tool being used.²³ Implementing Arkio as an interactive, goal-oriented environment allows students to develop new routines for rapid prototyping, reviewing and presenting. Version 1.8 includes features such as “gather all users” (Fig. 11; see also video Fig. 11.1) and “view position” (images interface), which not only help students to stay organized during presentations but also enhance co-creation and collaboration.²⁴

Despite these challenges, students appreciated the ability to quickly experiment with ideas, visualize designs at scale and collaborate more effectively. While traditional CAD tools remain essential for detailed modelling, the 4D environment provided a more engaging, interactive approach to decisionmaking, ultimately supporting more

Fig. 11. Interface UI, Arkio navigation, gather people in VR-meeting, Model: Folding bridge-space+ HUB, Students: Luca Christ, Kevsler Gündogdu, Francis Cüpper (M.A. course bridging+ SoSe2024, Image: Carolin Schabbing)



confident and effective design iterations. Looking ahead, it could be argued that Arkio supports learning and reflection, as Bottino et al. suggest. The tool helps students expand their “zone of proximal development,”²⁵ enabling them to achieve more than they could with traditional methods. Post-presentation interviews revealed that students found peer and client reviews within Arkio to be the

²³ Kari Kuutti: Activity theory as a potential framework for human computer interaction research. In: Bonnie A. Nardi (ed.): Context and Consciousness. Activity Theory and Human-Computer Interaction, Cambridge, MA, 1995, pp. 17-44.

²⁴ Johan Hanegraaf: Gathering users, 2024, <https://support.arkio.is/hc/en-us/articles/360007655598-Gathering-users> [accessed 10/2024].

²⁵ Lew Semjonowitsch Vygotsky: Mind in Society. The Development of Higher Psychological Processes, ed. by Michael Cole, Vera John-Steiner, Sylvia Scribner, Ellen Souberman, Cambridge, MA, and London 1978, p. 84.

most valuable use of 4D. As technical facilities and technology management expertise improve, the process promises greater efficiency, flexibility, and design quality. Further research and refinement is needed to realize its full potential.

Interdisciplinary Collaborative Infrastructure and Technology Management Expertise

These areas, technology management expertise, the role of system performance in user experience (UX), and design/workflow management, extend the practical implications of 4D tools in educational and professional settings. This section examines how Peter Morville's UX "honeycomb"²⁶ links UX principles to the evaluation of immersive tools, assessing whether 4D tools meet user needs in terms of usability, experience, and emotional engagement. Morville's seven UX qualities (useful, usable, desirable, findable, accessible, credible, and valuable) are particularly relevant in understanding how 4D tools shape the design process. Building on earlier discussions about the emotional and sensory aspects of interacting with 4D tools, this section evaluates how these qualities influence the effectiveness of the tools in fostering co-creative processes. Field observations from the *bridging+* project identify three critical areas of expertise: technology management expertise, design management, and workflow coordination, which are essential for optimizing



Fig. 11.11, Video Interface UI, Colocated: Arkio navigation, gather all users in VR-meeting, Model: Folding bridge-space+ HUB, Students: Luca Christ, Kevser Gündogdu, Francis Cüpper (M.A. course bridging+ SoSe2024, Image: Carolin Schabbing)

²⁶ Peter Morville: The Semantic Studios user experience honeycomb, Semantic Studios, 2004, https://semanticstudios.com/user_experience_design/ [Accessed 01/2025].

the use of 4D imaging technologies in a collaborative context.

a) Technology Management Expertise: Mastering the integration of 4D technology, especially when it comes to transforming user engagement with tools, solving problems effectively to bring design concepts to life in a virtual space, is consistent with the principles of activity theory.²⁷ One obstacle to the implementation of the technology in educational programs and degree projects is the fact that some educators and students are new to 4D imaging technology and the unique challenges it presents. The difficulties of adopting new technologies are often underestimated, especially when integrating them into existing systems and workflows.²⁸ When it comes to usability, a positive user experience is created—here, mastery over new tools—when the tools prove useful, usable, and desirable.²⁹ The project has shown that it is essential to offer effective onboarding, train users in hardware and software, and provide workshops. Experience shows implementing 4D tools in systems needs new strategies. Solutions must better support architectural craftsmanship, be accessible to people with disabilities, and address future challenges. Mastering 4D imaging tools leads to greater confidence and a more engaging experience, aligning with the principles of user-centered design in architectural education.

The challenges of integrating new tools into existing workflows and teaching environments included the need to set up individual accounts and run regular software updates for all Meta Quest 2 headsets. In an institutionally driven technical security system, this is not as straightforward as it might seem. Getting to grips with Arkio meant mastering the software's features, but also setting up backup systems to ensure the project's file exchange could run smoothly. Media expertise extended beyond technical skills in two key areas. The

27 Alexei Nikolajewitsch Leontiev: *Activity, Consciousness, and Personality*, Translated by V. M. Lobanov, S. I. Chudakov, Moskau 1978.

28 Bottino et al. 1999 (see note 22), p. 285.

29 Morville 2004 (see note 26).

first was strategic planning for maintaining and optimizing the technical infrastructure, such as renting headsets and collaborating with external software providers.³⁰ This posits that tools mediate not only actions and the creation of a well-organized educational framework, but also social interactions and collaborative work. As students adapt to new technologies, they shift their activity within the educational context, reshaping roles, goals, and routines. This dynamic process requires continuous adjustment, as well as feedback and reflection from peers, faculty, and industry professionals. Real-time interaction, iterative feedback, and spatial engagement, addressing spatial parameters such as scale, dimensions, and tactile interaction, is essential. For instance, sketching in 4D allowed users to interact with the design intuitively, enhancing engagement and giving them more control over the process. Mastering quick, digitally crafted design adjustments in 4D requires considerable practice.

The second area where media expertise extended beyond-technical skills was in designing and supporting collaborative, spatially and socially integrated workflows. This included ensuring that both on-site and remote participants could fully engage with virtual environments. Ensuring that external guests could fully engage with the virtual environments required detailed coordination, including providing them with the necessary hardware and software. Even though Arkio offers mobile and desktop versions, enabling remote users to join meetings and presentations effectively still required thoughtful planning and support systems. Ultimately, media expertise is not just about knowing how to use the tools but also about filling the gap between technology, design and architecture processes, and building the infrastructure, support systems, and learning environments that will allow

³⁰ For example, 4D spatial-design-driven software such as Arkio: Arkio - 3D collaborative design software, <https://www.arkio.is/> [Accessed 01/2025]; Gravity Sketch- Design in 3D with VR. Gravity Sketch, <https://gravitysketch.com/> [Accessed 01/2025].

students and educators to fully harness the potential of 4D technology and interdisciplinary collaborative communication.

b) **The Role of System Performance in the User Experience:** The effective use of 4D tools such as Arkio in collaborative design requires not only the technology itself but also a robust technical infrastructure, user training, and media expertise. A seamless user experience depends on stable infrastructure, efficient bandwidth management, and appropriate hardware configurations to minimize disruptions and keep users engaged. However, institutional infrastructure often presents challenges, particularly in large-scale settings, where network safety protocols and hardware limitations can complicate the smooth operation of such technologies. These limitations can sometimes hinder quick reactions to course demands and unexpected remote collaborations with international guests. Once these challenges are overcome, however, the technology can significantly enhance collaborative experiences. This underscores the importance of adapting and optimizing institutional setups to allow for greater flexibility in utilizing advanced tools such as 4D technology, while balancing safety and accessibility requirements.

c) **Design and Workflow Management:** Managing complex workflows across multiple platforms is a significant challenge in interdisciplinary projects, especially when integrating 4D imaging tools. Efficient data management and file exchange between architecture teams and stakeholders require tailored processes to handle large files, ensure version control, and maintain smooth collaboration.³¹ The need for iterative feedback and rapid prototyping further emphasizes the importance of well-structured workflows to transition from concept to execution. These workflows have yet to be developed. During the project, managing cloud-based file exchanges and updates

31] The multiple platforms needed to set up HMDs or provide the digital design space are Rhino or Autodesk (CAD), Arkio, Arkio-Cloud, Meta Quest accounts, and plug-ins that enable interoperability between software.

was essential for smooth collaboration. However, large 3D files often caused delays during uploads or downloads, hindering real-time interactions. Additionally, the organization of cloud storage was crucial to avoid confusion when switching between platforms (e.g., Rhino and Arkio). Issues such as file deletions or accidental removals of members from groups also disrupted workflow. These challenges highlight the need for carefully planned file management practices to ensure alignment across disciplines and efficient communication of design changes.

Reflections and Key Insights

In conclusion, the *bridging+* project provides valuable insights into the transformative potential of 4D imaging technologies in architectural education and practice as essential components of the design network. Integrating tools such as Arkio and the Meta Quest 2 exposes students to cutting-edge technologies and allows them to experience the 4D imaging tool not just as a neutral instrument, but as a co-actor. They also develop new skills for dynamic co-creation with 4D iterative design processes and interdisciplinary communication across platforms.

However, while the project demonstrates significant potential to enhance the co-creation in spatial design processes, the challenges of integrating these technologies into traditional workflows and academic environments cannot be overlooked. Media expertise, technical infrastructure, and workflow management all need to be built up if the full potential of 4D tools is to be realized. Future work should focus on strengthening institutional support, improving training resources, and seamlessly integrating 4D tools into architectural curricula to prepare students for MR-related spatial design.

The insights from the *bridging+* project underscore the

importance of integrating 4D tools such as Arkio at an early stage in spatial design education. While these tools primarily enhance the design process through improved spatial understanding and ideation, they also offer significant benefits in terms of accessibility. By enabling new forms of interaction and engagement, these technologies help make the design process more inclusive. Improving accessibility and the inclusion of people with disabilities is a key area where these technologies could be developed and could potentially disrupt existing processes. This aspect could not be fully integrated into the current study, due to the framework conditions and the early stage of the research. For future processes, however, these aspects need to be taken more into account by developing specific design and development strategies that meet the needs of people with disabilities. This could be achieved through accessible interfaces, adaptable user experiences, and collaboration with experts on accessibility technology.

However, challenges such as technical difficulties (e.g., software compatibility, account and network challenges) were most problematic and time-consuming. Smooth user interaction and integration with other software were frequently mentioned, with users emphasizing the need for improved compatibility. The research suggests that 4D tools will play an increasingly important role in shaping creative agency, interdisciplinary processes and the evolving role of 4D imaging in design. While the project's combination of 4D technology and real-time co-creation offers clear educational and practical benefits in spatial design disciplines, further refinement is required to fully unlock its potential in architectural environments.

Kagome Cave. Bildräumliches Rekonstruieren als inter- venierende Praxis

Angesichts der Krisenhaftigkeit der Gegenwart erleben rekonstruktive, investigative und kontrapräsentische Verfahren in der zeitgenössischen Architektur eine Konjunktur, die gleichermaßen in die Vergangenheit wie in die Zukunft ausgreifen. Aktuelle Auseinandersetzungen mit der Geschichte des Kolonialismus und ökologischen Herausforderungen führen zu der Frage, wie Architektur durch digitale Bildgebung und Modellierung als intervenierende Praxis des Erinnerens und Imaginierens gesellschaftlich wirksam werden kann.¹ Der Beitrag beleuchtet exemplarisch eine computerbasierte Ausstellungsinstallation der kenianischen Architekturgruppe Cave_bureau, die die Rekonstruktion marginalisierter kultureller Räume zum Ziel hat und dabei das Potenzial medialer und materieller „Spürtechniken“ jenseits tradierter Natur-Kultur-Dichotomien auslotet. In diesem Prozess werden aufzeichnende und sendende Medientechnologien mit physischen Umgebungen gekoppelt. Die maschinell empfangenen Signale werden durch verschiedene Verfahren digitaler Visualisierung und Materialisierung in eine für den Menschen wahrnehmbare Form gebracht, um Handeln und Orientierung zu ermöglichen. Vor diesem Hintergrund entwirft der vorliegende Beitrag ein Verständnis von 4D Imaging, bei dem erinnerungskulturelle Orte und Situationen mit Sensoren erschlossen und durch vielfältige Verbildlichungs- und Verkörperungsprozesse zugänglich gemacht werden. Die so erzeugten Rekonstruktionen können

1 | Eva-Maria Ciesla, Susanne Hauser, Hannah Strothmann, Julia Weber (Hg.): *Dimensions. Journal of Architectural Knowledge*, Bd. 4, Bielefeld 2024, Heft-Nr. 7: *Architecture as Intervention*.

als immersiv bezeichnet werden, wobei Immersion gerade nicht das visuelle Eintauchen in eine virtuelle Umgebung meint, sondern ein tatsächliches, körperliches Eintreten in das materielle Geschehen eines realen Milieus, um an ihm teilzuhaben. Im vorliegenden Beitrag wird untersucht, inwiefern solche modellhaften Nachbildungen die Teilnehmenden für komplexe Prozesse wie die Konstruktion des kulturellen Gedächtnisses der Kolonialvergangenheit oder den neokolonialen Kampf gegen den globalen Klimawandel sensibilisieren können. Wie kann eine sensorische Erfassung der Umgebung ein sinnlich-körperliches Spüren anregen? Welche Rolle spielen digitale Materialsysteme bei der Förderung von gesellschaftlicher Betroffenheit und Empathie? Wie können digital-performative Verfahren der Vergegenwärtigung von Vergangenheit in dominante Geschichtsnarrative eingreifen und Raum für neue Erzählungen schaffen, um die aktuelle Verfasstheit der Gesellschaft zu befragen? Der Beitrag widmet sich diesen Fragen, indem er räumlich-visuelle Praktiken untersucht, die Spuren einer vergangenen Wirklichkeit sichern und erzeugen. Die Praxis der Sichtbarmachung dieser Spuren zielt darauf ab, neue Handlungsspielräume für die Gestaltung alternativer Zukünfte zu eröffnen.

Techniken des Nachspürens

Gegenwärtig lässt sich ein gesteigertes Interesse für den Einsatz von sogenannten „Spürtechniken“² als Medien der architektonischen Rekonstruktion und Investigation beobachten: Sensing- und Recording-Technologien sollen dazu beitragen, dass die ‚sensorisch bewusste‘ Materie des umgebenden Raumes Zeugnis von marginalisierten Orten und Ereignissen der Vergangenheit ablegen kann, um jene sozialen Ungerech-

60

2 Abgeleitet von der Geschichte des Begriffs „spüren“ als „eine Spur aufnehmen, einer Fährte folgen“, verstehen Birgit Schneider und Evi Zemanek unter „Spürtechniken“ sowohl „alle Fertigkeiten und Routinen, mittels derer gespürt wird“, als auch „einen speziellen Typ von Tätigkeiten, die im Umgang mit zeichenhaftem Material wie Schrift, Zahlen und Symbolen bestehen, also zum Beispiel im Gebrauch von Messinstrumenten“. Birgit Schneider, Evi Zemanek: Spürtechniken. Von der Wahrnehmung der Natur zur Natur als Medium - Einleitung. In: Medienobservationen, Sonderausgabe, 30. April 2020, S. 2.

tigkeiten in der Welt wahrnehmbar zu machen, die sich der menschlichen Aufmerksamkeit bisher entzogen haben.³ Forschungsagenturen wie Forensic Architecture in London oder Killing Architects in Amsterdam haben es sich zur Aufgabe gemacht, Umwelt- und Menschenrechtsverletzungen durch Gewalteinwirkungen und Eingriffe im physischen Raum aufzudecken, die vor allem über „Spurmedienmaterial“⁴ von Social-Media- und Medienplattformen erschlossen werden. Die Idee, mit medienforensischen Methoden wie Remote Sensing eine physische Umgebung zu erfassen, die der unmittelbaren Beobachtung unzugänglich ist, wird in Susan Schupplis Studie *Material Witness* (2020) theoretisch entfaltet. Sie definiert materielle Objekte, bauliche Strukturen und natürliche Massen wie Wasser oder Eis als sensible Informationssysteme, die in der Lage sind, Ereignisse und Handlungszusammenhänge aufzunehmen und zu speichern.⁵ Bildgebende Verfahren wie Radar, Multispektral- oder 3D-Laserscanning machen diese Systeme les- und analysierbar.

Darüber hinaus entwickelt und zelebriert die digitale Rekonstruktionsarbeit in der Architektur Techniken des Spürens, die die Aktivität des Sich-Einlassens und Teilnehmens am Leben anderer fördern. Es handelt sich dabei um imaginative, ästhetische und aktivistische Techniken des Spürens als eines eher diffusen und umfassenden Wahrnehmungs- und Empfindungsprozesses, der inhärent auf Körperlichkeit beruht, das heißt auf der Materialität des Körpers als eines sich selbst spürenden und erlebenden Körpers, und damit an phänomenologische Überlegungen zu gesamtleiblichen Epistemologien anknüpft.⁶ Sensing-, Imaging- und Manufacturing-Technologien erfassen, verarbeiten und übertragen Informationen über vergangene Räume und Situationen, machen sie in Echtzeit berechenbar und transformieren sie ausschnitthaft in materi-

3 Carolin Höfler: Materielle Zeugen, digitale Muster. Überzeugungsarbeit in der Architektur der Gegenwart. In: Joachim Harst unter Mitwirkung von Nursan Celik und Rahel Jendges (Hg.): *Virtuelle Investigationen. Revisionen des Indizienparadigmas in Literatur und Kunst*, Köln 2024, S. 211-237, hier S. 224.

4 Simon Rothöhler: *Medien der Forensik*, Bielefeld 2021, S. 109.

5 Susan Schuppli: *Material Witness. Media, Forensics, Evidence*, Cambridge, MA, und London 2020, S. 18.

6 Christiane Heibach: Dem Spüren auf der Spur. Zur Wahrnehmung biologischer und technischer sensorischer Systeme. In: *Medienobservationen*, Sonderausgabe, 30. April 2020, S. 1-2.

elle Objekte, um sie physisch erfahrbar zu machen. Sie dienen dabei weniger der Beweisführung als vielmehr der Erschließung, Bewahrung und Zugänglichmachung marginalisierter Erinnerungen und Imaginationen. Bild und Raum als komplexe Sinnstrukturen greifen im Prozess der physisch-digitalen Rekonstruktion und Rezeption so ineinander, dass die Vergangenheit auf eine Weise wahrgenommen werden kann, die betroffen macht. Diese Form digitaler Visualität und Räumlichkeit im Zusammenspiel mit physischer Materialität und Haptik ermöglicht eine Erfahrung, die affektiv berührt und ergreift. Damit zielt sie auf ein konkretes Erinnerungshandeln der jeweiligen Akteur*innen – seien es nun Architekt*innen, Initiativen und Institutionen oder Ausstellungsbesucher*innen. Sie setzt einen Überschuss an Sinn frei und produziert ästhetische Settings und Erfahrungsmöglichkeiten, die den Anspruch erheben, nicht in den Grenzen dichotomischer Argumentationen und ihrer hegemonialen Technologien aufzugehen, sondern neue Formen der Relationalität und der Sorge um das noch nicht Gewusste und Erfahrene hervorzubringen.⁷

Durch die Verbindung von sensorischer Erfassung und Speicherung mit körpergebundener Wahrnehmung und Aktivierung entfalten die bildräumlichen Rekonstruktionen der Architekt*innen Kabage Karanja und Stella Mutegi ihr spezifisches Interventionspotenzial.⁸ Seit 2019 arbeitet das in Nairobi ansässige Studio Cave_bureau an dem Forschungs- und Entwurfsprojekt „Anthropocene Museum“. Ziel dieses Projekts ist es, koloniale Nutzungsgeschichten bisher unbeachteter Landschaftsräume sichtbar zu machen und Verfahren des bildräumlichen Wiederaufführens und Nacherlebens als methodisches ‚Verlernen‘ in dominante Geschichtsnarrative zu integrieren. Gegenstand ihrer Untersuchung sind die ausgedehnten vulkanischen Höhlensysteme in der

7 Yvonne Volkart: Spürtechniken. Von den Medien der Naturvermittlung zu den Ästhetiken des Spürens. In: ebd., S. 1, 3 und 18.

8 Mette Marie Kallehauge, Malou Wedel Bruun (Hg.): Cave bureau. The Architect's Studio, Zürich 2023.

Umgebung von Nairobi und Mombasa, die dafür bekannt sind, dass in ihnen die ersten Hominiden gelebt haben sollen (Abb. 1). Weniger bekannt ist, dass sie im 17. und 18. Jahrhundert als Zwischenlager und Gefängnis für Sklaven dienten, bevor diese auf Schiffe verladen und zu den Sklavenmärkten transportiert wurden. Nicht zuletzt versteckten sich Mitte des 20. Jahrhunderts Kämpfer der antikolonialen Unabhängigkeitsbewegung Mau-Mau in den Höhlen, was sie zu einem symbolischen Ort der Widerstandsgeschichte Kenias und zum Geburtsort der modernen Nation macht.

In einer Ausstellung im Louisiana Museum of Modern Art in Humlebæk bei Kopenhagen enthüllte Cave_bureau die Geschichte der Shimoni-Höhlen an der Südküste Mombasas

Abb. 1, Cave_bureau, Erfassung der Slave Caves in Shimoni bei Mombasa mithilfe von Fotogrammetrie und Laserscanning, Kenia, 2021, Foto: Kabage Karanja



Abb. 2, Cave_bureau, Anthropocene Museum 1.0 - Of Steam and Struggle, Überlagerung eines 3D-Scans der Mbai Mau Cave mit einem fotogrammetrisch erzeugten 3D-Modell, Kenia, 2019

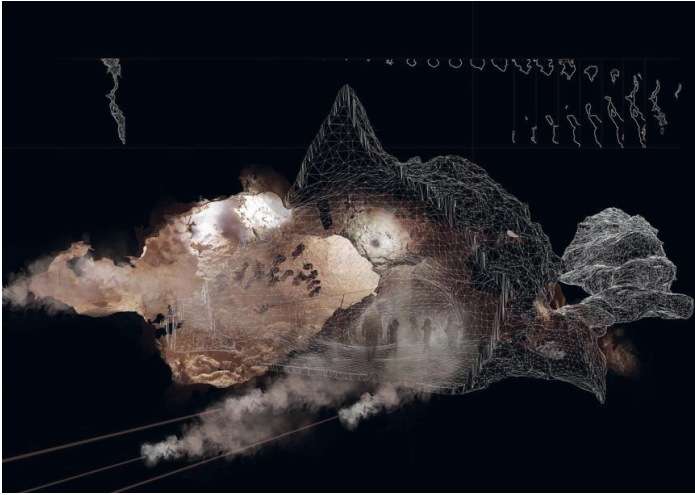


Abb. 3, Cave_bureau, Rekonstruktion der Shimoni Slave Caves aus Rattan, in Kooperation mit Phil Ayres und Architekturstudierenden der Royal Danish Academy, Kopenhagen, 2023, Foto: Cave_bureau



durch eine fragmentarische, bodenlose Architektur – eine hängende Flechtstruktur, die einen Ausschnitt der Höhlen im Eins-zu-eins-Maßstab wiedergab. Vor der Herstellung der 300 m² großen Raumstruktur, die Architekturstudierende der Royal Danish Academy von Hand geflochten haben, wurde die Höhle mithilfe von Fotogrammetrie und Laserscanning erfasst. Die daraus resultierenden Daten führten zu einer Punktwolke, die in ein trianguliertes 3D-Mesh-Modell und anschließend in eine hexagonale Flächenstruktur umgewandelt wurde (Abb. 2). Auf dieser Grundlage entstand ein Flechtwerk aus indonesischem Rattan, das mithilfe der japanischen Kagome-Flechttechnik hergestellt wurde (Abb. 3).

Durch den Prozess des Flechtens wurde die Höhle in einen transluzenten, textilen Raum verwandelt, der eine Atmosphäre schafft, in der die rekonstruierte Höhle nicht als distanzierteres Objekt wahrgenommen wird. Stattdessen bezieht sie die Anwesenden sowohl durch die materielle Präsenz des Geflechts als auch durch das Licht- und Schattenspiel der Struktur mit ein (Abb. 4). Dies spiegelt sich auch in dem japanischen Begriff

Abb. 4, Cave_bureau, The Anthropocene Museum 7.0 - New Age Africana, Louisiana Museum of Modern Art, Humlebæk, 2023. Lebensgroßes Modell der Shimoni Slave Caves aus Rattan (oben), 3D-gedrucktes Modell im Maßstab 1:50 (unten), Foto: Kim Hansen, Courtesy Louisiana Museum of Modern Art



„kagome“ (かごめ) wider, der sowohl ein traditionelles Muster bezeichnet, das an ein Korbgeflecht erinnert, als auch ein Gefühl des Eingebunden- und Eingeschlossenseins ausdrückt.⁹ Das situative Eintauchen in den atmosphärischen Raum ermöglicht es, die Höhle und die traumatische Geschichte der indigenen Bevölkerung Ostafrikas gesamtleiblich zu empfinden beziehungsweise zu ‚erspüren‘, wie es Hermann Schmitz formulieren würde.¹⁰

Eine solche Arbeit kann basierend auf dem ästhetischen Konzept des Theoretikers Jack Burnham und des Künstlers Hans Haacke als „Realzeitsystem“ bezeichnet werden.¹¹ Im Gegensatz zu einem statischen, endgültigen Objekt artikuliert ein Realzeitsystem ein Materialereignis im Hier und Jetzt, das atmosphärische, affektive und soziale Prozesse in Gang setzt. Realzeitsysteme bestehen häufig aus ephemeren oder beweglichen Materialien, die ihre Umgebung ‚erspüren‘, auf sie reagieren und sie gleichzeitig beeinflussen und damit sowohl registrierend als auch sendend wirken. Material und Umgebung stehen dabei in einem wechselseitigen Wirkungsverhältnis, in dem ein ständiger Austausch über sensorische und spürende Prozesse stattfindet. Durch ihre Prozesshaftigkeit, ihre spezifischen Eigenschaften und Verhaltensweisen stellen die flüchtigen und fragilen Materialien Systemzusammenhänge her oder greifen in bestehende ein. Ihre aktive Materialität macht die Realzeitsysteme unabhängig von der Vorstellungskraft der Rezipient*innen: Sie sind, so Haacke, „real“, „not imagined“.¹² Hier liegt – im Vorgriff auf Spatial- und Embodied-Computing-Systeme – der Kern eines neuen bildräumlichen und materialökologischen Ansatzes, der auch im hybriden Geflecht von Cave_bureau nicht nur Ausdruck und Repräsentation, sondern Stimulanz und Präsenz erkennt – hervorgerufen durch ein Beziehungsgefüge von Komponenten

⁹ Koh Masuda (Hg.): Kenkyusha's New Japanese-English Dictionary (Fourth Edition), Tokyo 1974, S. 657.

¹⁰ Hermann Schmitz: Der Leib, der Raum und die Gefühle, Ostfildern 1998, S. 58-59; ders.: Atmosphäre und Gefühl - Für eine Neue Phänomenologie. In: Christiane Heibach (Hg.): Atmosphären. Dimensionen eines diffusen Phänomens, München 2012, S. 39-56, hier S. 39.

¹¹ Edward F. Fry: Hans Haacke - Realzeitsysteme. In: ders. (Hg): Hans Haacke. Werkmonographie, Köln 1972, S. 8-22.

¹² Hans Haacke, zit. nach Germano Celant (Hg.): Art Povera, New York und Washington 1969, S. 179.

und Akteur*innen, die miteinander und mit ihrer Umgebung interagieren.

Ein solches realzeitsystemisches Verständnis bildet auch die Grundlage für Timothy Ingolds Konzept des *weaving* als paradigmatische Praxis der Auseinandersetzung mit Materialien und Umgebungen, die sich kontinuierlich im Werden befinden. In seinem Essay „Of Blocks and Knots“ unterscheidet Ingold zwischen einer Welt, die „durch das hierarchische Zusammenfügen vorgeformter Teile zu größeren Einheiten entsteht“, und einer Welt, die „aus immer neuen Fäden [gewebt ist], die sich verdrehen und umeinanderschlingen und dabei immer weiterwachsen, ohne je zu einem Ende zu kommen“.¹³ In einer „architecture as weaving“ erkennt er das Potenzial, die Beziehungen zwischen Menschen und ihrer Umgebung grundlegend neu zu gestalten. In Projekten der zeitgenössischen Künste wird das Flechten oft als emanzipatorische, dekolonialisierende Praxis eingesetzt, um ein neues soziales Miteinander zu erproben. Die Materialstruktur von *Cave_bureau* evoziert ähnliche Lesarten – vom Flechten als gemeinschaftsstiftende und kulturerzeugende Praxis bis hin zum Geflecht als topografische Karte und kollektives Psychogramm. Im metaphorischen Sinn zeigt es, wie vielschichtige landschaftliche, politische und kulturelle Verbindungen über viele Jahrhunderte ein komplexes, dicht verwobenes System geschaffen haben. So entsteht das Bild einer Kultur, in der eine extreme Verflechtung sowohl im wörtlichen als auch im übertragenen Sinne für Stabilität sorgt.

(P)Reenacting Spaces

Die Auseinandersetzung mit vergessenen oder bewusst übersehenen Räumen, wie den Höhlen Kenias, ist ein wesentlicher Aspekt

¹³ Timothy Ingold: *Of Blocks and Knots. Architecture as Weaving*. In: *The Architectural Review*, Bd. 234, 2013, Heft-Nr. 1400 (25. Okt.), S. 26-27, hier S. 26 (Übersetzung: C. H.).

intervenierender Rekonstruktionen. Solche Räume werden in postkolonialen Studien und kulturwissenschaftlichen Theorien mit Begriffen wie „beyond“, „in-between“, „liminal“, „interstitial“ und „third space“ erfasst, die Homi K. Bhabha in seinem Buch *The Location of Culture* diskutiert.¹⁴ Diese Begriffe beschreiben sowohl materielle als auch imaginäre Zwischenräume, die sich durch räumliche Unbestimmtheit und gleichzeitige Ungleichzeitigkeit gegenüber ihren gesellschaftlich vorderstrukturierten und klar definierten Umgebungen auszeichnen.

In diesem Sinne können die kenianischen Höhlen als kulturelle Grenzbereiche beschrieben werden, die im Projekt von *Cave_bureau* ermittelt, dekonstruiert und rekonstruiert, in neue Kontexte gestellt und aktualisiert werden. Die Besucher*innen erleben die dezentrierten Räume der Vergangenheit durch eine Serie von räumlich-visuellen und stofflichen Umkehrprozessen: Im Zuge ihrer digitalen Erschließung und physischen Zugänglichmachung verwandelt sich das Steinerner in etwas Textiles, das Materielle in etwas Bildhaftes, das Subtraktive in etwas Additives, das Geschlossene in etwas Offenes, das Dunkle in etwas Helles und das Gedrückte in etwas Gespanntes. Die Besucher*innen werden von diesen gegensätzlichen Wirkkräften der rekonstruierten Umgebung sensuell aktiviert; ihre Bewegungen werden suchender, zögernder und tastender. Die Rekonstruktion erweist sich so als szenisches Experiment, als „Reenactment“, das nicht als Versuch einer originalgetreuen Nachbildung zu verstehen ist, sondern als eine Interpretation mit neuen Mitteln in einem erweiterten oder veränderten Kontext.¹⁵ Sie entfaltet ihre Wirkungskraft durch den prozesshaften Vollzug komplexer Akte der Sichtbarmachung von Vergangenem und der Imagination von Neuem: Diese reichen von der Vermessung und 3D-Modellierung der Höhlen bis hin zu ihrer Herstellung und Ausstellung



¹⁴ Homi K. Bhabha: *The Location of Culture*, London und New York 1994, S. 1-4, 36-39.

¹⁵ Ralf Baecker, Dennis Paul, Andrea Sick: Einleitung. In: dies. (Hg.): *Reenactments in Kunst, Gestaltung, Wissenschaft und Technologie*, Hamburg 2020, S. 7-14, hier S. 11.

als Flechtstruktur in einem anderen Kontext durch andere Akteur*innen. Die Rekonstruktion oszilliert zwischen einer Simulation, die sich der Realität annähert, verdrängten Erinnerungen und einem potenziellen Modellcharakter. Sie ruft modelltypische Perspektiven auf, die zur Exploration einladen und Interaktionen befeuern.¹⁶ Dadurch werden die zugrunde liegenden Machtstrukturen aufgedeckt, die die erinnerungswürdigen Räume durch Mechanismen der Ausgrenzung geformt haben. Gleichzeitig fördert die Rekonstruktion die kollektive Erinnerung an die in diesen Räumen stattgefundenen Ereignisse und trägt somit zur Bildung von Gemeinschaft bei. Sie gewinnt jedoch erst dann an Wirksamkeit als intervenierende Praxis, wenn nicht nur verschiedene Perspektiven auf die historischen Räume und Narrative zur Diskussion gestellt, sondern auch die gesellschaftlichen Verflechtungen der Gegenwart hinterfragt werden. In diesem Kontext wird sie mehr als nur eine Methode der kulturwissenschaftlichen Gedächtnisforschung; sie entwickelt sich zu einem Instrument der Intervention in erinnerungskulturelle Prozesse. So wird sie zu einer kreativen Praxis des *doing memory* und kann als eine performative Praxis des Erinnerns verstanden werden, die in eine „hegemoniale Basiserzählung“ eingebettet ist und in diese eingreift.¹⁷

Eine solche Praxis verleiht vergangenen Räumen und Ereignissen in der Gegenwart eine Bedeutung, die das Potenzial für spekulative Zukunftsentwürfe eröffnet. Dabei folgt sie einem nicht-linearen Geschichtsbewusstsein: Zeit ist machtvoll verschachtelt; verschiedene Zeitschichten und Zeiterfahrungen sind eng miteinander verflochten. Wie Nina Möntmann betont, ermöglicht das Aufbrechen der Chronologie zugunsten ungleichzeitiger und relationaler Zeitlichkeiten, Geschichte als ein komplexes Geflecht offener Stränge und

¹⁶ Inge Hinterwaldner: Prolog. Modellhaftigkeit und Bildlichkeit in Entwurfsartefakten. In: dies. und Sabine Ammon (Hg.): *Bildlichkeit im Zeitalter der Modellierung. Operative Artefakte in Entwurfsprozessen der Architektur und des Ingenieurwesens*, Paderborn 2017, S. 13-30, hier S. 17.

¹⁷ Fabian Virchow, Tanja Thomas: *Doing Memory an rechte Gewalt in Medienkulturen. Grundzüge eines interdisziplinären Forschungsprogramms*. In: dies. und Matthias N. Lorenz (Hg.): *Rechte Gewalt erzählen. Doing Memory in Literatur, Theater und Film*, Heidelberg 2022, Kindle eBook, S. 29-51, hier S. 29.

polychroner Erzählungen zu begreifen, die durch Praktiken der Wiederaufführung, des Wiedererlebens und der Aktualisierung in unterschiedliche Richtungen gelenkt werden können.¹⁸ Auf diese Weise lassen sich auch „kontrapräsentische“ Szenarien entwickeln, in denen versäumte Möglichkeiten und ungenutzte Chancen der Vergangenheit sichtbar gemacht werden, um Orientierung in der Gegenwart und Hoffnung für die Zukunft zu bieten.¹⁹ Die Kulturtheoretikerin Ariella Aïsha Azoulay hat für dieses Geschichtsverständnis den Begriff der „potential history“ geprägt, der dazu dient, alternative Erzählungen und nicht realisierte Zukunftsvisionen, die aus dem dominanten Blick auf die Vergangenheit ausgeschlossen wurden, zurückzugewinnen und als Potenzial für Akte kollektiver Selbstermächtigung zu nutzen.²⁰

Um diese anderen Geschichten zu erzählen, werden mediale und materielle Rekonstruktionen geschaffen, die als Speicher und Agenten historischer Dynamiken fungieren.²¹ Sie bewahren das energetische Potenzial vergangener Ereignisse in ihrer performativen Materialität; ihnen wohnt eine „mne-mische Energie“ inne – wie es Jan Assmann in Anlehnung an Aby Warburg beschreibt.²² Diese Energie kann sich unter veränderten historischen Umständen und an einem anderen Ort wieder entladen, wodurch das Vergangene erinnert, das heißt, verleblicht und erfahren wird und dadurch Neues prägt. Phänomenologisch betrachtet, befördern die energetisch aufgeladenen Erinnerungsfragmente einen sinnlichen „Ausleibungsprozess“, in dem sich nach Hermann Schmitz das leibliche Empfinden der teilhabenden Akteur*innen ausweitet und auf die (in diesem Fall rekonstruierte) Umgebung ausdehnt, um sich mit ihr und untereinander solidarisch zu verbinden.²³ Genau dies führt weder zu einer Kopie noch zu einem Zitat

18 Nina Möntmann: *Plunging into the World. On the Potential of Periodic Exhibitions to Reconfigure the Contemporary Moment*. In: *On Curating*, 2017, Heft-Nr. 33, S. 122-131, hier S. 128-129.

19 Jan Assmann: *Das kulturelle Gedächtnis. Schrift, Erinnerung und politische Identität in frühen Hochkulturen*, München 1992, S. 79.

20 Ariella Aïsha Azoulay: *Potential History. Unlearning Imperialism*, London und New York 2019, S. 10, 56.

21 Astrid Erll: *Memory in Culture*, London 2011, S. 19.

22 Jan Assmann: *Kollektives Gedächtnis und kulturelle Identität*. In: ders. und Tonio Hölscher (Hg.): *Kultur und Gedächtnis*, Frankfurt am Main 1988, S. 9-19, hier S. 12; Martin Warnke (Hg.): *Aby Warburg. Der Bilderatlas MNEMOSYNE (1924-29)*, Berlin 2000, S. 5.

23 Heibach 2020 (siehe Anm. 6), S. 5; Schmitz 1998 (siehe Anm. 10), S. 29-35.

des Ortes und der an ihm stattgefundenen Ereignisse, sondern zu einer komplexen zeitlichen Verflechtung. Die Rekonstruktionen sind „auf Gegenwart und Zukunft bezogene Vergangenheitskonstruktion[en]“²⁴; sie konfrontieren historische Fakten mit der Gegenwart, indem sie die Unausweichlichkeit vergangener Ereignisse zurückweisen und eine bedingte Zukunft vorschlagen. So weckt das lichte Geflecht der Shimoni-Höhlen auch die Hoffnung, den Umgang mit historischem Wissen zu verändern und koloniale Kontinuitäten gestalterisch und diskursiv aufzubrechen. Insofern kann es auch als ein „preenactement“ verstanden werden, in dem die Kämpfe der Vergangenheit als unerledigte Aufgaben der Gegenwart wahrgenommen und mit den Mitteln der Architektur und Performance in die Zukunft verlängert werden.²⁵

Ausschließendes Anschließen

Mit den Höhlenrekonstruktionen spannt Cave_bureau ein transnationales architekturgeschichtliches Beziehungsgeflecht auf und reaktiviert ein universalhistorisches Narrativ, das die Architektur der frühen Hominiden mit der aller Götter verbindet: In einer Projektzeichnung werden die Höhlen mit dem römischen Pantheon verglichen. Die subtraktive Architektur, die durch eingestürzte Höhlendächer gekennzeichnet ist, ähnelt verblüffend der Kuppel des Pantheons mit ihrem Oculus.²⁶ Darüber hinaus weckt das raumgreifende Flechtwerk Assoziationen an frühe menschliche Behausungen, wie sie in der Kunsttheorie und Kunstgeschichtsschreibung um die Mitte des 19. Jahrhunderts beschrieben wurden: Gottfried Semper etwa untersuchte das Verhältnis von Textil und architektonischem Raum und argumentierte in seiner Schrift *Die vier Elemente der Baukunst*, dass das Knüpfen und Flechten zu den

24 Virchow und Thomas 2022 (siehe Anm. 17), S. 74.

25 Oliver Marchart: Public Movement. The Art of Pre-Enactment. In: *On Curating*, 2022, Heft-Nr. 54, S. 171-173, hier S. 170-171.

26 Kallehauge und Wedel Bruun 2023 (siehe Anm. 8), S. 42-43.

ältesten menschlichen Fertigkeiten gehöre, aus denen sich das Bauen mit Mauerwerk entwickelt habe.²⁷ In den Mittelpunkt seiner Theorie stellte er den Begriff des „Stoffwechsels“, mit dem er das Phänomen beschrieb, dass Strukturformen, die ursprünglich mit der Bearbeitungstechnik eines bestimmten Materials verbunden waren, auf andere Materialien übertragen werden können. Auf dieser Grundlage konstruierte er die Entstehung der ‚modernen‘ Baukunst aus der nomadischen Architektur des Flechtens und Knüpfens.

Das Flechtmodell der Shimoni-Höhlen spielt auf diese Geschichtskonstruktionen des 19. und frühen 20. Jahrhunderts an, in denen außereuropäische Künste an den Anfang der Kunst gestellt werden, um sie in den Status der Vorkunst oder des Kunsthandwerks zu verweisen. Folgt man der These von Susanne Leeb in *Die Kunst der Anderen* (2015), dann bedurfte es sowohl der Integration als auch der Zurückweisung nicht-europäischer Künste und Kulturen, damit sich Kunstgeschichte und Kunstwissenschaft als ihrem Selbstverständnis nach universelle Wissenschaften etablieren konnten.²⁸ Diese doppelte Bewegung des Anschließens und Ausschließens wird im Modell der Shimoni-Höhlen subtil unterlaufen: Da das Flechtwerk nur mithilfe avancierter Bildgebungs- und Modellierungstechnologien erzeugt werden kann, steht es in der linearen Fortschrittslogik weniger am Anfang als vielmehr am vorläufigen Ende der Baukunstgeschichte. Auf diese Weise wird die abwertende Dichotomie prähistorisch / historisch, vormodern / modern ad absurdum geführt.

Die Figuration des ausschließenden Anschlusses wird erneut aufgerufen, wenn die Rekonstruktion der Shimoni-Höhlen auf die ungleiche Zerstörung der Ökosysteme im Kampf gegen den Klimawandel aufmerksam macht. So plant die kenianische Regierung mit Unterstützung der Europäischen Investitions-

27 Gottfried Semper: *Die vier Elemente der Baukunst. Ein Beitrag zur vergleichenden Baukunde*, Braunschweig 1851, S. 56-57.

28 Susanne Leeb: *Die Kunst der Anderen. „Weltkunst“ und die anthropologische Konfiguration der Moderne*, Berlin 2015.

bank, im Umfeld der Höhlen großflächig geothermische Energie zu gewinnen – mit gravierenden Folgen für Vegetation, Tier und Mensch, insbesondere für die Massai. Die Maßnahmen für eine globale Energiewende stehen damit im diametralen Widerspruch zum Schutz der indigenen Kultur und der ressourcenschonenden Praktiken der Massai.²⁹ Einmal mehr blickt Cave_bureau auf die eng verbundenen Prozesse des Anschließens und Ausschließens nichteuropäischer Kulturen im Lichte ‚universeller‘ Entwicklungsziele (hier für eine nachhaltige Welt) und stellt ihnen das zukünftige Szenario eines Geflechts ineinander verwobener Bewegungslinien gegenüber – als eine Form der Unterbrechung und des Widerstandes.

Schluss

Welchen Begriff von Intervention könnte dem hier diskutierten Projekt zur Seite gestellt werden? Grundsätzlich interveniert die bildlich-räumliche Rekonstruktion marginalisierter Räume in eine Wirklichkeit, mit der sie eng verstrickt bleibt. Sie zielt nicht auf eine abstrakte Überwindung der Probleme, die eine konkrete Wirklichkeit bereithält. Vielmehr hinterfragt sie vorherrschende Problemlösungskonstruktionen und bezieht sich auf eine Wirklichkeit, die stets im Wandel begriffen ist, und damit auf eine Zukunft, die nicht vorhersehbar ist. In diesem Sinne bricht sie mit dem traditionellen genealogischen Prinzip der Geschichte und stellt die Erwartung in Frage, dass Gegenwart und Zukunft innovativ sein müssen. Stattdessen dekonstruiert und erweitert sie Geschichtsnarrative und entwickelt ein kontrapräsentisches Szenario, das auf wiederbelebten und unvollendeten Erzählungen der Vergangenheit basiert.

Durch die Rekonstruktion einer politisch aufgeladenen Geschichtslandschaft legt die interventionistische Arbeit von Cave_bureau die Spuren und Einschreibungen frei, die die Kolonialzeit im landschaftlichen und infrastrukturellen Raum Kenias, aber auch in dominanten Geschichtsnarrativen hinterlassen hat. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, bis heute wirksame koloniale Denk- und Entwurfsmuster, Raumkonzepte und Gesellschaftsbilder sowie darauf basierende Machtstrukturen zu verstehen, bewusst zu machen und zu überwinden. Darüber hinaus fordert die Intervention dazu auf, nicht-hegemoniale und bislang bekämpfte Epistemologien, die in westlichen Diskursen als „andere“ markiert werden, als gleichwertig anzuerkennen und zu fördern.

Wesentlich für eine solche Intervention ist, dass sie aus sich selbst heraus kollektive Erinnerungs- und Interventionsakte generiert und damit gestaltet, was als mögliches Szenario für die Zukunft denkbar ist. Die Herstellung und Ausstellung eines geflochtenen Modells kenianischer Höhlen in Kopenhagen vermittelt ein Länder und Zeiten überschreitendes Bild-, Material- und Raumgedächtnis, in dem sich übergreifende, transkulturelle „Erinnerungsgemeinschaften“³⁰ konturieren und konstituieren. Das der Rekonstruktion zugrunde liegende Konzept des kollektiven Gedächtnisses baut auf Maurice Halbwachs' Idee des „*mémoire collective*“ auf, das als Repertoire identitätsstiftender Erzählungen einer sozialen Gruppe über ihre Vergangenheit verstanden wird.³¹ Mit einer erweiterten transnationalen Dimension legt dieses Konzept einen besonderen Fokus auf minoritäre Erinnerungskulturen. Es versteht das kulturelle Gedächtnis als ein offenes und wandelbares Geflecht mentaler, materieller und sozialer Phänomene, das in der Installation von Cave_bureau konkret zum Ausdruck kommt.

30 Erll 2011 (siehe Anm. 21), S. 20.

31 Maurice Halbwachs: *La mémoire collective*, Paris 1950.

Das nachspürende und intervenierende Potenzial der physisch-digitalen 3D-Rekonstruktion liegt darin, kulturelle Räume und kollektive Ereignisse durch ihren prozesshaften-Nachvollzug neu zu interpretieren und erfahrbar zu machen, um so Handlungsspielräume für die Gestaltung alternativer Zukünfte zu eröffnen. Die Rekonstruktion tritt sowohl virtuell als auch stofflich als reales Ereignis in Erscheinung und richtet sich vor Ort und online an transnationale Öffentlichkeiten, nicht zuletzt mit dem Ziel, künstlerische und soziale Widerstandskräfte gegen Ungleichheit und Entdemokratisierung zu mobilisieren. Die raumgreifende Flechtstruktur bezieht die Körper der teilhabenden Akteur*innen umfassend mit ein. Körperliche Immersion bedeutet hier nicht nur, dass das Publikum inmitten eines materiellen Raumgeflechts situiert und damit in die atmosphärische Situation eingebunden wird, sondern auch, dass die räumlich-visuelle Vergegenwärtigung unerledigter Aufgaben der Vergangenheit als Vorgriff auf den Zustand ihrer Erfüllung körperlich erfahrbar wird. Die Arbeit gehört damit zu den performativen Praktiken des Probens, des Übens und Trainierens einer anders erlebten oder verlaufenen Vergangenheit und einer erwünschten, wenn auch nicht vorhersehbaren Zukunft.³² Eine egalitäre Gesellschaft, eine ressourcenschonende Architektur oder eine partizipative Stadt- und Landschaftsentwicklung sind dann keine realitätsfernen Fiktionen, sie entstehen vielmehr im Prozess der digitalen und materiellen Vergegenwärtigung der Vergangenheit selbst – als „real utopia“ in der Gegenwart.³³

32 Marchart 2022 (siehe Anm. 25), S. 172.

33 Erik Olin Wright: *Envisioning Real Utopias*, London 2010.

Entwicklung und Anwendung individueller dynamischer Patienten*innen-Modelle für Simulationen in erweiterter Realität

In der Chirurgie gewinnen sogenannte *digitale Zwillinge* – virtuelle Abbilder, welche die Anatomie von Patienten*innen möglichst realitätsnah widerspiegeln – zunehmend an Bedeutung. In diesem Beitrag beleuchte ich, wie individuelle dynamische Patienten*innen-Modelle mithilfe moderner Technologien erstellt und in der virtuellen Realität eingesetzt werden können, um chirurgische Eingriffe zu planen und zu üben. Solche Modelle eröffnen nicht nur der Ausbildung neue Perspektiven, sondern liefern auch Chirurgen*innen eine präzisere Planungsgrundlage für komplexe oder neuartige Eingriffe – ein wichtiger Schritt zur Verbesserung der Sicherheit und Effektivität der Patienten*innenversorgung.

Im Rahmen der Fortentwicklung von erweiterter Realität als Computerplattform und Schnittstelle sowie dem Wirken von Moore's Law und Huang's Law¹, den Gesetzen der stetig steigenden Rechen- und Grafikleistung, wird das Umsetzen zunehmend komplizierterer und plausiblerer Simulationen möglich. Ein Anwendungsgebiet ist die Simulation von chirurgischen Eingriffen. Genauer gesagt, die Simulation einer Operation oder eines Teilschrittes einer Operation an einem virtuellen Abbild der zu operierenden Person. Hierfür muss die Anatomie der Patienten*innen als dreidimensionales virtuelles Modell

1 Gordon E. Moore: Cramping More Components onto Integrated Circuits. In: Electronics, Jg. 38, 1965, Heft-Nr. 8, S. 114-117; Tekla S. Perry: Move Over, Moore's Law: Make Way for Huang's Law, <https://spectrum.ieee.org/move-over-moores-law-make-way-for-huang-s-law> [Stand 02/2025].

dem Original getreu visualisiert werden. Ist diese Visualisierung interaktiv, kann man sie als dynamisch beschreiben. Das Ziel ist, Teilschritte der bevorstehenden Operation zu simulieren. Diese Simulation muss die patienten*innen-spezifische Anatomie einrechnen. Je mehr relevante interindividuelle Unterschiede die Simulation informieren, desto plausibler und nützlicher wird sie. Solche Modelle können als dynamische Modelle bezeichnet werden.² Im Folgenden beschreibe ich den Nutzen, die Entwicklung sowie die Anwendung solcher Modelle.

Mithilfe der Darstellung von Computertomografie- (CT) und Magnetresonanztomografiedaten (MRT) als Schnittbilder können die individuelle Anatomie und Pathologie beurteilt werden. Sie funktionieren ähnlich wie Schnittzeichnungen von Gebäuden. Die mentale Integration der einzelnen Schnittbilder ist notwendig, um ein zusammenhängendes dreidimensionales Verständnis der anatomischen Strukturen zu entwickeln. Erst durch diesen kognitiven Prozess der räumlichen Synthese wird es möglich, aus einem CT-Datensatz patienten*innen-spezifische Informationen über die räumliche Anordnung von Organen, Gefäßverläufen, knöchernen Strukturen und pathologischen Veränderungen zu gewinnen und korrekt zu interpretieren. Das mentale Zusammensetzen erfordert erhebliche Erfahrung, hohe räumlich kognitive Fähigkeit und Anstrengung.

Die Verlässlichkeit von CT- und MRT-Darstellungen ist eingeschränkt, da sie einen vergangenen Zeitpunkt abbilden – die Momente des Scans. Jede Lageveränderung des Körpers, Muskelanspannung, die Atmung und viele andere Faktoren ändern durchgehend die Lagebeziehungen des Inneren. Diese Dynamik wird im Rahmen einer Operation befeuert. Abhängig vom Ausmaß eines chirurgischen Eingriffs verändert sich

² Vgl. Saul Heredia, Hiromasa Masuda, Atsushi Miyamoto, Yohei Kuroda: A Physically Based Deformable Model with Haptic Feedback for Real-Time Robotic Surgery Simulation. In: 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2023, S. 5079-5086, <https://doi.org/10.1109/IROS55552.2023.10341694>.

die Lage der Anatomie. Je invasiver der Eingriff, desto größer ist der sukzessive Informationsverlust der initialen Bildgebung. Selbst in der Neurochirurgie, die sich mit einem recht formfesten und im Schädel fixierten Organ beschäftigt, verändert sich durch das bloße Öffnen der Schädeldecke die Lage des Gehirns, sodass intraoperative Planungsanpassungen nötig werden können. Verantwortlich sind Gravitation, veränderter intrakranieller Druck, Flüssigkeitsverlust, Anschwellen des Gehirns und weitere Einflüsse. Eine Rolle bei der Verlässlichkeit der präoperativen Bildgebung spielt die betroffene anatomische Struktur, die Gewebeart und ihre Lage im Körper. Je weniger dicht und fest verbunden, desto mehr bewegt sich das Gewebe. Knochen werden ihre Form kaum verändern – sie sind fest –, während die Form und Lage eines Lungenlappens hochvariabel sind. Lungenlappen sind deutlich abhängiger von Atmung, Herzschlag, Muskelspannung und Körperlage. Sie sind verformbarer als Knochen. Diese Einflüsse spielen eine besonders ausgeprägte Rolle für die Thorax- und Viszeralchirurgie.

Ein weiterer Faktor ist das differierende Erscheinungsbild von medizinischer Bildgebung und dem Patienten*innen-Körper während einer Operation. In der Bildgebung fehlen Farben, Spiegelungen, die ständige Bewegung des Körpers und die Okklusion, die den direkten Blick auf den Operationssitus auszeichnet. Medizinische Bilder sind abstrakte Rekonstruktionen aus Daten, die Artefakte enthalten und qualitativ variabel sind. Vor allem für Berufsanfänger*innen ist es eine Herausforderung, die Bildgebung mental zu verarbeiten und das gewonnene patienten*innen-spezifische pathoanatomische Verständnis auf den realen Körper der betreffenden Person zu übertragen.

Dynamische anatomische Modelle von Patienten*innen können der Kategorie des digitalen Zwillings zugeordnet werden. Dieses von Michael Grieves Anfang der 2000er Jahre

entwickelte Konzept beschreibt eine virtuelle Darstellung, die das reale Leben digital abbildet. Grieves bezieht sich hierbei vornehmlich auf Produktionsstätten und auf den Lebenszyklus von Produkten.³ Die digitale Patientenakte kann als Beispiel für einen digitalen Zwilling im Bereich der menschlichen Gesundheit angeführt werden. Ein solcher Zwilling einer Person kann mit zahlreichen Datenpunkten gespeist werden, darunter Untersuchungsberichte, Gutachten, Befunde, Herzfrequenz, Blutzucker, Körpertemperatur, Schlafdaten, Bewegungsdaten, Gesundheitsdaten, genetische Informationen, medizinische Bildgebung, subjektives Befinden, Ernährung und Blutanalysen. Diese Daten können kontinuierlich (Herzfrequenz, Blutzucker, Bewegungsaktivität), periodisch (Blutanalyse, Vorsorgeuntersuchungen, Gutachten) oder aus akutem Anlass (CT, MRT) erfasst werden. In einer Zeit, in der Entscheidungen und Empfehlungen zunehmend auf Basis von Daten, deren Auswertung durch statistische Methoden und den daraus resultierenden Prognosen getroffen werden, liegt der Einsatz von digitalen Zwillingen für eine personalisierte und datengetriebene Gesundheitsversorgung nahe. Die Hoffnung ist, dass sie Ärzte*innen entlasten, Gesundheitsdaten objektivieren und Entscheidungen auf Basis von Wahrscheinlichkeiten, maschinellem Lernen oder etablierten Schwellenwerten fördern.

Das dynamische anatomische Modell eines*r Patienten*in muss eine Reihe von Anforderungen erfüllen, um Chirurgen*innen zu nutzen. Es muss die patienten*innen-spezifische Anatomie oder zumindest einen für den Eingriff relevanten Teil der Anatomie abbilden, wie etwa die Leber. Es muss möglich sein, mit dem Modell so zu interagieren, dass es die Interaktion mit dem echten Körper während einer Operation spiegelt. Wobei die Benutzer*innen-Schnittstelle nicht zwingend

3 Michael Grieves: Origins of the Digital Twin Concept. Working Paper, August 2016, Florida Institute of Technology / NASA, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>.

den Kern der Interaktion darstellen sollte, sondern die plausible Reaktion des Modells auf die Interaktion. Handlungen wie Schneiden, Ziehen, Drücken oder Heben sollen am digitalen Zwilling so simuliert werden können, wie sie während des Eingriffs am echten Körper durchgeführt werden. Je akkurater die Simulation, desto größer der Nutzen. Idealerweise ist die Darstellung flüssig und in Echtzeit. Je näher die Simulation auf den Ebenen Schnittstelle, Genauigkeit und Reaktion auf interaktive Eingaben der Realität kommt, desto verlässlicher ist sie. Wobei beim Realismus gezielt Eigenschaften geändert werden können, sodass der Informationsgewinn maximiert wird. Zum Beispiel sollte es möglich sein, ein Organmodell transparent zu machen, sodass die Lage der Blutgefäße innerhalb des Organs erkannt werden kann.

Wie kann nun ein solches Modell erstellt werden? Welche Daten, Informationen, Technologien werden benötigt? Eine Reihe von grundlegenden Vorgehensweisen und Konzepten werden nachfolgend beschrieben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dreidimensionalen Modellen, die auf der patienten*innen-spezifischen Anatomie basieren und Echtzeit-Interaktion sowie eine grafische Darstellung der Simulation beinhalten.

Als Grundlage für dynamische Modelle dienen zum Beispiel CT- oder MRT-Daten. Obwohl CT- und MRT-Daten häufig als zweidimensionale Schnittbilder dargestellt werden, basieren sie tatsächlich auf dreidimensionalen Daten. Diese Schnittbilder lassen sich mit Baumscheiben oder Brettern vergleichen, die aus einem Baumstamm geschnitten wurden. Bei der bildlichen Darstellung werden sie vollständig verflacht, wobei jeder Pixel einen Durchschnittswert der Gewebedichte über die gesamte Dicke der jeweiligen Schicht repräsentiert. Im Fall von CTs bewegt sich die ‚Dicke‘ der Schichten typischerweise zwischen einem halben Millimeter bis hin zu mehreren

Millimetern, abhängig von der klinischen Fragestellung. Diese Umwandlung von dreidimensionalen Strukturen in zweidimensionale Bilder ermöglicht es Mediziner*innen, das Innere des Körpers schichtweise zu betrachten und zu analysieren. CTs sind Datensätze bestehend aus Voxeln (dreidimensionale Pixel, Datenpunkte in einem dreidimensionalen Gitter). Diesen Voxeln werden Werte zugewiesen, die Informationen darüber geben, wie – vereinfacht ausgedrückt – dicht das erfasste Körpergewebe an dieser Stelle ist. Typischerweise schwächen verschiedene Gewebe, Materialien oder Substanzen Röntgenstrahlen in unterschiedlichem Maße ab, diese Abschwächung wird in Hounsfield-Einheiten (HU) gemessen.⁴ Wasser liegt per Definition bei 0 HU und Luft per Definition bei -1000 HU. Fett bei circa -100 HU und Knochen bei 500 bis 1500 HU. Die Werte vieler Gewebetypen überschneiden sich, was ihre Identifikation in der Bildgebung erschwert, zum Beispiel Milz und Leber. Weitere wichtige Indikatoren, um Gewebe und Organe zu identifizieren, sind die Position relativ im Körper sowie das Gefälle der Dichte zwischen unterschiedlichen Gewebearten.

Auf Grundlage eines dreidimensionalen Datensatzes des*r Patienten*in von zumindest der relevanten Anatomie können nun die Voxel den einzelnen Organen und Geweben zugeordnet werden. Dieser Prozess heißt Segmentierung. Segmentiert wird meist halbautomatisiert mithilfe von Bildverarbeitungsalgorithmen und Deep-Learning-Techniken, und bei Bedarf wird manuell nachgebessert. Bei der Segmentierung eines Datensatzes zur präoperativen Planung einer Leberresektion ist es beispielsweise typisch, folgende anatomische und pathologische Strukturen zu differenzieren: das Leberparenchym, die funktionellen Lebersegmente, die vaskuläre Architektur (einschließlich arterieller, venöser und portalvenöser Gefäße) sowie die präzise Demarkation und Volumetrie pathologischer Läsionen,

⁴ Vgl. Kathrin Friedrich: Medienbefunde. Digitale Bildgebung und diagnostische Radiologie, Berlin und Boston 2018, S. 28-39.

wie Lebermetastasen oder Lebertumore. Die Granularität des Segmentierungsvorgangs ist abhängig von der zugrunde liegenden Bildgebung, dem Zweck der Segmentierung und der Praktikabilität. Ein CT weist, wie bereits erwähnt, typischerweise eine Schichtdicke von circa 0,5–3 mm auf, während ein Micro-CT eine Auflösung von 0,1 mm hat. Allerdings kommt letztere für die Anwendung am lebendigen Menschen aufgrund der hohen Strahlendosis nicht in Frage. Je höher die Auflösung ist, desto kleiner sind die Strukturen, die erkannt und segmentiert werden können.

Ein segmentierter Datensatz bildet die Grundlage für ein dynamisches Modell, mit dem Interaktionen, ähnlich wie am realen Körper, simuliert und grafisch dargestellt werden können. Die Simulation, welche die Interaktion und Reaktion ermöglicht, kann unterschiedlich aufgebaut sein. Es ist möglich, jedem Segment relevante mechanische Eigenschaften zuzuordnen. Handlungen, wie etwa ein Schnitt, können so auf den zugrunde liegenden mechanischen Prozessen mathematisch modelliert werden. Die meisten der relevanten Eigenschaften müssen dabei geschätzt werden. Die quantitative Erfassung der gewebespezifischen biomechanischen Eigenschaften basiert maßgeblich auf Experimenten an postmortalem Humangewebe und korrespondierenden Untersuchungen an präklinischen Tiermodellen, die eine Approximation der In-vivo-Gewebeeigenschaften erlauben.⁵ Alternativ wird auf einfachere Approximationen zurückgegriffen, wie zum Beispiel Schätzwerte, die in Versuchen zu ausreichend plausiblen Gewebeerhalten führen. Beide Herangehensweisen haben ihre Vor- und Nachteile, und eine Vermischung der beiden wird oft vorgenommen. Der theoretische Vorteil biomechanischer Modelle ist die Möglichkeit, irgendwann einmal die Rea-

5 Vgl. YiDong Bao, DongMei Wu: Real-Time Cutting Simulation in Virtual Reality Systems Based on the Measurement of Porcine Organs. In: SIMULATION, Jg. 93, 2017, Heft-Nr. 12, S. 1073-1085, <https://doi.org/10.1177/0037594717726144>; Guanglei Wang, Bin Wang, Qinguo Gang, Suiping Zhou, Xiulin Liu: Physical Modeling of Vascular Tissues and Stress Analysis Optimization Based on Real Soft Tissue Characteristics. In: CASA '16: Proceedings of the 29th International Conference on Computer Animation and Social Agents, 2016, S. 29-34, <https://doi.org/10.1145/2915926.2915934>; Jaesung Eom, Xie George Xu, Suvranu De, Chengyu Shi: Predictive Modeling of Lung Motion over the Entire Respiratory Cycle Using Measured Pressure-Volume Data, 4DCT Images, and Finite-Element Analysis. In: Medical Physics, Jg. 37, 2010, Heft.-Nr. 8, S. 4389-4400, <https://doi.org/10.1118/1.3455276>.

lität sehr akkurat simulieren zu können. Ihr Nachteil ist, dass sie rechenaufwendig sind, mehr Segmentierungsarbeit benötigen, dass oft nicht alle relevanten Eigenschaften bekannt sind und teilweise selbst passende mathematisch-physikalische Modelle fehlen. Rein mathematische Modelle sind leichter zu erstellen, benötigen weniger Vorwissen, sind weniger rechenintensiv und liefern in vielen Fällen plausible Ergebnisse. Die Frage, wie ein dynamisches Modell aufzubauen ist, hängt immer von der intendierten Anwendung ab, etwa ob es möglich sein soll, in Echtzeit mit der grafischen Repräsentation zu interagieren.

Ein Beispiel für ein vereinfachtes Modell wurde von Nakao und Kollegen vorgestellt.⁶ Der Hintergrund ihrer Studie war die Planung der Entfernung von Lebertumoren. In der Interaktion mit dem Modell war es möglich, die Leber zu bewegen und das Abschneiden eines Teils der Leber zu simulieren. Gleichzeitig wird die daraus resultierende Lageänderung der Lebergefäße imitiert. Als Grundlage dafür wurde ein CT der Leber verwendet. Für das Modell wurden das Leberparenchym, die Gefäße und der Tumor segmentiert. Um die Berechnung leichter zu machen, wurde die Leber als isotrope homogene Masse modelliert. Das vereinfacht die Erstellung eines Modells, weil wenige Informationen benötigt werden. Zusätzlich wird die grafische Echtzeit-Darstellung der Gewebedeformation mit ‚normal‘ ausgestatteten Computern möglich, da die Berechnungen weniger komplex sind. Eine mechanisch akkurate Simulation der Elastizität der Leber wird dadurch nicht gewährleistet, sondern vielmehr eine plausible Approximation. Es wurde für alle vorgestellten Fälle eine einheitliche und circa zehnfach höhere – als realistisch – Steifigkeit angenommen.⁷ Die Steifigkeit der Leber ist innerhalb des Organs nicht homogen, über Menschen verschieden genauso wie

⁶ Megumi Nakao, Yuya Oda, Kojiro Taura, Kotaro Minato: Direct Volume Manipulation for Visualizing Intraoperative Liver Resection Process. In: Computer Methods and Programs in Biomedicine, Jg. 113, 2014, Heft-Nr. 3, S. 725-735, <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.12.004>; Megumi Nakao, Kojiro Taura, Tetsuya Matsuda: Deformable Resection Process Map for Intraoperative Cutting Guides. In: 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2016, S. 2554-2557, <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591251>.

⁷ Vgl. ebd.

über das Alter und kann sich durch Krankheiten verändern.

Ein Beispiel für ein dynamisches Modell, das mehr Wert auf eine akkurate Simulation von mechanischen Prozessen legt, wurde von Bao und Wu entwickelt.⁸ Es ist im Rahmen der Interaktion mit ihrem Modell darüber hinaus möglich, dass der nutzenden Person haptisches Feedback durch die Kontrollkonsole gegeben wird. Um die Vorhersagen ihres Modells möglichst realistisch zu machen, maßen sie die Steifigkeit, die Stressentspannung und weitere mechanische Eigenschaften von Schweinelebern und Nieren mithilfe einer Reihe von Sensoren und Maschinen. Die Validierung des Modells erfolgte durch umfangreiche experimentelle Vergleiche mit Messungen an Schweineleber und -niere, wobei sie die Genauigkeit ihres Modells beweisen konnten. Ein besonderer Vorteil dieses Ansatzes liegt in seiner Vielseitigkeit: Das Modell ermöglicht die präzise Simulation von Oberflächen- und Volumenschnitten an virtuellen Weichgeweben. Durch die umfassende Berücksichtigung zahlreicher mechanischer Eigenschaften bietet das komplexe Modell von Bao und Wu eine deutlich realistischere Simulation des Gewebeverhaltens im Vergleich zu vereinfachenden Ansätzen. Die Erstellung des Modells ist jedoch aufwendiger und die benötigte Rechenleistung viel höher.

Im Moment sind die Anwendungsbereiche von dynamischen Modellen überschaubar und sie haben ihren Platz in der Praxis noch nicht gefunden. Pionierarbeit auf diesem Gebiet leistet das Unternehmen Surgical Reality in den Niederlanden, dessen Software automatisiert dynamische Modelle von Lungen erstellt.⁹ Diese Modelle werden für die Planung von Eingriffen benutzt und in die Konsole von Operationsrobotern eingebildet, um die Operation zu begleiten. Dies geschieht bisher nur im wissenschaftlich-klinischen Kontext. Surgical Reality stellt eine Ausnahme dar. Das Erstellen von dynamischen

8 Bao und Wu 2017 (s. Anm. 5).

9 Surgical Reality: <https://www.surgicalreality.com/> [Stand 03/2025].

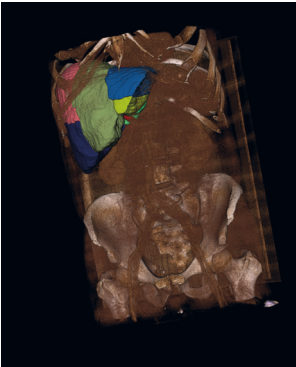
1



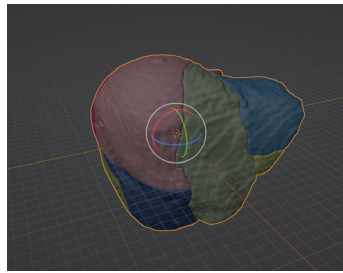
2



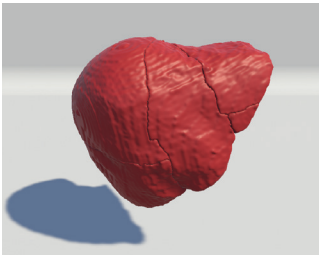
3



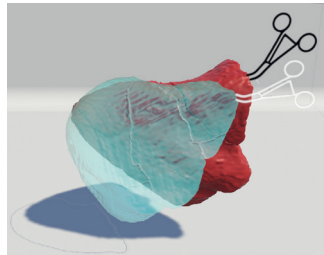
4



5



6



- 1 Darstellung eines CT-Datensatzes als Schnittbild in der Software 3D Slicer1 (Karl Eisenträger, 2025)
Ron Kikinis, Steve D. Pieper, Kirby G. Vosburgh: 3D Slicer. A Platform for Subject-Specific Image Analysis, Visualization, and Clinical Support. In: Ferenc A. Jolesz (Hg.): Intraoperative Imaging and Image-Guided Therapy, New York 2014, S. 277-289, https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7657-3_19
- 2 Automatisch segmentierte Leber im gleichen CT-Datensatz, segmentiert mit dem Deep-Learning-Tool TotalSegmentator2 (Karl Eisenträger, 2025)
Jakob Wasserthal et al.: TotalSegmentator. Robust Segmentation of 104 Anatomic Structures in CT Images. In: Radiology: Artificial Intelligence, Jg. 5, 2023, Heft-Nr. 5, <https://doi.org/10.1148/ryai.230024>
- 3 Volumetrische Visualisierung des segmentierten CT-Datensatzes (Karl Eisenträger, 2025)
Blender Foundation, Blender.Org - Home of the Blender Project - Free and Open 3D Creation Software, <https://www.blender.org/> [Stand 02/2025]
- 4 Import und Weiterbearbeitung der segmentierten 3D-Modelle in Blender3 zur weiteren Anpassung und Optimierung (Karl Eisenträger, 2025)
Unity 6000.0.29, <https://unity.com/releases/editor/whats-new/6000.0.29> [Stand 02/2025]
- 5 Integration der 3D-Modelle in die Unity-Engine4, um verformbare Modelle via Obi5, einer Echtzeit-Partikel-Physik-Engine, zu erstellen (Karl Eisenträger, 2025)
Obi - Unified Particle Physics for Unity 3D, <https://obi.virtualmethodstudio.com/index.html> [Stand 02/2025]
- 6 Simple Demonstration der Verformbarkeit der 3D-Modelle in Unity4 (Karl Eisenträger, 2025)

Modellen benötigt typischerweise individuell konfigurierte Software, technische Expertise und leistungsstarke Computer. In Zukunft werden dynamische Modelle praktikabler. Gründe sind leistungsstärkere Computer und Segmentierungsalgorithmen. Eine Reihe von Anwendungsfeldern bietet sich für sie an. Dynamische Modelle können im Rahmen der Medizin, in der Lehre und in der Aus- und Weiterbildung genutzt werden. Für erfahrene Chirurgen*innen bieten sie sich an, um seltene oder komplexe Operationen zu trainieren und Pionieroperationen zu simulieren. Man könnte sie auch im Nachgang eines chirurgischen Eingriffs nutzen, um Fehler nachzuvollziehen und Alternativen zu explorieren. Im Rahmen der Ausbildung könnte es Lernenden helfen, OPs in der Simulation zu üben. In biomedizinischen Simulationen

könnten Prozesse wie Wundheilung oder Organregeneration simuliert werden, sodass Eingriffe sicherer und effektiver durchgeführt werden können – nicht nur effizienter. Eine automatische Simulation parallel zur Operation, die den Eingriff fortwährend am Modell simuliert, ist ebenfalls denkbar. Diese Simulation könnte Chirurgen*innen über die Lageveränderung des Gewebes und der Gefäße informieren oder auch als Warnsystem agieren, wenn es wahrscheinliche Fehler vorhersagt und diese anzeigt.

Pain Assessment in VR

Introduction

Imagine a time when you were waiting for a physical examination for the pain you were in. The experience you are enduring is probably too complicated for your mind to find the right words to communicate your state to your physician. Now, on top of your physical discomfort, you are squirming within the maze of your limited verbalization, wishing there were another way to share how you feel with your doctor. Or imagine you are trying to communicate your chronic pain to a friend; while you would never wish this pain on anyone else, you feel utterly desperate because you are incapable of conveying your pain. When categorizing types of pain, we use established terms such as pounding, intermittent, sharp, throbbing, burning, and shooting. However, these descriptions fail to fully capture the intense, visceral nature of pain, offering only a glimpse of what is happening. “We can say about pain what Augustine has said about time: ‘What is pain? If no one asks me, I know what it is. If I wish to explain it to him, I do not know’”¹. Indeed, our potential for a shared understanding of pain is constrained by a limited common vocabulary. In this paper, we argue that communicating experiences of pain, physical discomfort, and other bodily sensations through visualization can serve as a valuable complementary approach.

Various research projects indicate that visual methods of communication are superior to verbal or number-based forms of pain description for patients.² So far, however, they have

1 Saulius Genusas: *The Phenomenology of Pain*, Ohio 2020, p. 1.

2 Carolin Luise Bohn CL, Jens Christoph Türp: „Ein Bild sagt (noch) mehr ...“. *Diagnostik orofazialer Schmerzen mittels Dolografie®*. In: *Der Schmerz*, Vol. 35, 2021, pp. 307-314, <https://doi.org/10.1007/s00482-021-00532-x>; Subin Kim, Hyunju Lee: *A Metaphor-based Approach to Pain Pictogram Design*. In: *Archives of Design Research*, Vol. 34, 2021, No. 1, pp. 157-171, <http://dx.doi.org/10.15187/adr.2021.02.34.1.157>; Nema Rao, Sophy Perdomo, Charles Jonassaint:

been limited to pictorial and graphic forms. Virtual reality (VR) exposure provides the viewer with a first-person perspective. Unlike 2D movies we watch in movie theatres, in which the camera eye has already decided what we are about to see in the next scene, in VR, viewers can move their heads around and observe their respective environment from the angle they prefer. This autonomy of movement in visual narration and spatiality brings a sense of immersion, as if they are physically emerging in the real dimension. Exploring physical pain in different VR setups which provide such multi-dimensional bodily experiences can help people to communicate their experience of pain, which can eliminate the limitations of verbal and pictorial forms.

1. Pain: Difficult to Conceptualize and Difficult to Measure

What is pain?

Pain is generally understood as an unpleasant sensory and emotional experience associated with actual or potential tissue damage or described in relation to such damage.³ This frequently used definition by the International Association for the Study of Pain (IASP) highlights the multidimensionality and complexity of the phenomenon. Firstly, the subjective experience is mentioned; pain is not a mechanism, but a multi-dimensional construct that encompasses somatic, psychological, and spiritual aspects. Secondly, pain is not necessarily associated with obvious somatic damage but can also be a projection or have a neuropathic cause.

In general, the cause of pain can be divided into nociceptive and neuropathic.⁴ Nociceptive pain is the body's response to actual or potential tissue damage, detected by specialized

A Novel Method for Digital Pain Assessment Using Abstract Animations: Human-Centered Design Approach. In: JMIR Human Factors, Vol. 9, 2022, No. 1, <https://doi.org/10.2196/27689>.

3 IASP. 2022. Terminology | International Association for the Study of Pain. In: International Association for the Study of Pain (IASP), <https://www.iasp-pain.org/resources/terminology/> [Accessed 08/2025].

4 Jens Vater, Lars Töpfer: BASICS Anästhesie, Intensivmedizin und Schmerztherapie, München (5th Edition) 2019.

sensory neurons called nociceptors. Different receptors are specialized “to detect various kinds of triggers, such as the elevated temperature of a hot plate or the sharp blade of a knife”⁵. If the pain affects the skin, muscles, or connective tissue, it is referred to as somatic and is typically easy to localize and to describe. Looking at the visceral organs (e.g., intestines and pancreas), the situation is different – we see a limited number of sensory receptors. The pain associated with these organs primarily arises from the activation of receptors located in their protective capsules. When nociceptive stimuli affect the viscera, they produce a diffuse pain that is particularly challenging to pinpoint to a specific trigger.⁶ As a result, “referred pain” can occur in areas of the body far away from where the injury or harmful stimulus is located, since this type of pain does not result from direct nerve root stimulation.⁷ This can lead to phenomena, such as when someone has kidney problems but feels invasive pain in their lower back. It gets even more complicated in cases of chronic pain or phantom pain as there is often no direct link to an ‘external’ trigger at all, rather, the pain can be caused by a specific context that manifests itself in a physical experience. For instance, when tissue is injured, neurons increase their sensitivity, causing stronger pain from certain stimuli (hyperalgesia) or the perception of previously unnoticed stimuli (allodynia).⁸ Unlike smelling or hearing, where these stimuli are filtered out after a certain time, pain does not adapt; on the contrary, pain perception intensifies over time.⁹ This occurs due to the spread of neurotransmitters which enhance the sensitivity of surrounding neurons in the periphery.¹⁰ Prolonged pain can lead to lasting changes in the central nervous systems, stabilizing new neural connections that persist after the tissue has healed, resulting

5 Lynette Jones: Haptics, London 2018, p. 9.

6 Aage R. Møller: Pain: Its anatomy, physiology, and treatment, CreateSpace Independent Publishing Platform 2018.

7 Qianjun Jin, Yuxin Chang, Chenmiao Lu, Lunhao Chen, Yue Wang: Referred pain: characteristics, mechanisms, and clinical management. In: Frontiers in Neurology. Vol. 14, 2023, <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1104817>.

8 David S. Butler, Lorimer G. Moseley: Schmerzen verstehen, Heidelberg 2009.

9 Fernando Cervero: Understanding pain. Exploring the perception of pain, Cambridge, MA, 2014.

10 Steve Haines, Sophie Standing (Illustration): Schmerz ist ziemlich strange, Heidelberg 2019.

in hypersensitivity and chronic pain.¹¹

Nevertheless, pain models have been dominated by a Cartesian cause-and-effect principle since the beginning of the modern age. It sees pain as a symptom of a specific cause or underlying disease which must be eradicated.¹² Over the course of the 20th century, this understanding has shifted toward a more nuanced view of pain (e.g., the ‘gate control mechanism’¹³), leading to the development of contemporary multimodal approaches in diagnosis and treatment.¹⁴ It is, however, surprising how simplistic and mechanistic current assessment methods still are, as we will explain below.

How pain is assessed today

The most commonly used pain rating scale is the “numerical rating scale” (NRS), in which the patients are asked to circle a number between 0-10, 0-20 or 0-100 that corresponds to their pain intensity.¹⁵ Another established form is the Likert scale, which has different levels of agreement to disagreement to assess the state of respondents’ attitudes and opinions.

Both pain rating scales are universally established and have proven to be effective and efficient assessment tools. However, they are also recognized as insufficient, especially in terms of articulation and detection of pain levels which change over time.¹⁶

Numeric pain scales can indeed be quite useful for medical staff to provide suitable and immediate help, but beyond their functionality in urgent situations, the scale leads to open questions. When someone is asked “From 1-10, 10 being the worst, how bad is your pain?”, we can easily understand a patient who circles 9; it is obvious that the pain is about to be or is already excruciating and demands urgent attention. But,

11 Cervero 2014 (see note 9).

12 Niklaus Egloff, Ulrich T. Egle, Roland von Känel: Weder Descartes noch Freud? Aktuelle Schmerzmodelle in der Psychosomatik. In: Praxis, Vol. 97, 2008, No. 10, pp. 549-557.

13 Ronald Melzack, Patrick D. Wall: Pain Mechanisms. A New Theory. In: Science, Vol. 150, 1965, No. 3699, pp. 971-978, <https://doi.org/10.1126/science.150.3699.971>.

14 Ulrike Kaiser, Rainer Sabatowski, Shahnaz Christina Azad: Multimodale Schmerztherapie. Eine Standortbestimmung. In: Der Schmerz, Vol. 29, 2015, pp. 550-556, <https://doi.org/10.1007/s00462-015-0030-4>.

15 Mathias Haefeli, Achim Elfering: Pain assessment. In: European Spine Journal, Vol. 15, 2006, pp. 17-24, doi: 10.1007/s00586-005-1044-x.

16 Ibid.

for example, how can we assess what it means when someone says level 6? What makes a person circle level 6, instead of level 7?

Qualitative pain questionnaires are significantly more differentiated, but also equally more complex. There are questionnaires addressing pain quality and location, pain interference and functional limitations, disease-specific pain experiences, psychosocial factors, and more.¹⁷ However, like the scales, they also use predefined options, which are ticked by the patients. In interaction design terms, it can be stated that pain questionnaires work by means of *resources* (i.e., provide discrete options) instead of offering directly *manipulative* systems (in which patients can generate their own content) (“resources” vs “direct manipulative systems”¹⁸).

In the Project “SCHMERZEN FORMEN”, carried out at the Bauhaus-University Weimar in collaboration with the Jena University Hospital, four key issues on the current form of pain assessment were identified¹⁹: 1) Low resolution: There is a limited (quantitative) range of response options. 2) Static nature: The use of pen and paper restricts pain expression to a static format. 3) Passivity: Patients remain passive in the process, as they can only match their personal experience to the available options. 4) Discreteness: The available options are limited to discrete yes / no choices.

This applies not only to paper questionnaires, but also to digital forms of pain assessment. In digital environments, pain is also predominantly captured in quantified states or through the same mechanistic and reductionist frameworks. As a result, they resemble sports and fitness applications²⁰, failing to provide individualized, high-resolution, and body-focused

17 Elizabeth J. Dansie, Dennis C. Turk: Assessment of patients with chronic pain. In: British Journal of Anaesthesia, Vol. 111, 2013, No. 1, pp. 19-25, <https://doi.org/10.1093/bja/aet124>.

18 Michael Herczeg: Menschliche Maschinen, maschinelle Menschen, virtuelle Realitäten und greifbare Medien: Verwirrende Bilder von Mensch und Computer im Zeitalter der Digitalisierung. In: Carl-Peter Busch-Kühle, Jutta Felke (Hg.): Mensch, Bilder, Bildung, Oberhausen 2005, S. 160-169.

19 Johannes Maria Breuer: SCHMERZEN FORMEN. Agentielles Design in der Schmerzerfassung, Wiesbaden 2024, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-45977-2>.

20 Johannes Maria Breuer: „Sexy Beine und Po Tag 1“. Zum Design von Eigenkörpererfahrung in mHealth-Apps. In: IMAGE - Zeitschrift für interdisziplinäre Bildwissenschaft, Vol. 32, 2020, pp. 16-38, <http://dx.doi.org/10.25969/mediarep/16339>.

pain assessments. Body-specific (i.e., local, regional, and/or global) pain references and representations are often excluded. This means that pain as a holistic experience, with physical, psychological, social, and spiritual aspects, is not adequately captured. These aspects can be explored with the aid of phenomenological approaches, with the aim of tackling the subjective experience of pain in depth.

2. Phenomenology of Pain in VR

Phenomenology of pain is a philosophical and psychological exploration of the subjective experience of pain, emphasizing how individuals perceive and interpret their pain, rather than focusing solely on its physiological or biomedical aspects. A phenomenological exploration underlines the fact that pain is a deeply personal and subjective experience. Individuals experiencing the same injury or medical condition often report vastly distinct levels of pain and emotional responses, as this subjective experience is intricately linked to one's overall sense of self.

The existing literature about pain is mostly built on the empirical findings of biological and neurobiological research. The phenomenological approach aims to dig through lived-body experiences²¹ and, when we are trying to understand the experience of pain, consulting phenomenological methods seems almost mandatory. However, as Geniusas emphasizes, it is quite unusual for phenomenology as a branch of philosophy—which “prides itself on being attentive to lived-experience”²²—to have been largely silent in terms of reflecting on the experience of pain. We propose closing this gap with our speculative designs in VR, with a phenomenological investigation, placing a strong emphasis on the subjective evaluation of

21 “Lived-body experiences” refers to how a person perceives and experiences their own body from a first-person perspective, including sensations, emotions, and interactions with the world.

22 Geniusas 2020 (see note 1), p. 5.

lived-body awareness during a VR experience. This approach of enveloping technology with traditional phenomenology is also recognized in the post-phenomenology movement²³, as it blends technological formations into phenomenological understanding, and uses technology as a philosophical tool to re-discover perceptual experiences. Our work contributes toward the post-phenomenological movement as well, by using VR technology as a medium to explore self-perception, more specifically, to reconstruct the subjectivity of pain as an experience.

By their nature, lived-body experiences are accessible only to this person and communicating such an elusive state is a challenging task, especially when it comes to articulating physical discomfort. For this reason, visualization of pain in VR can help both the person who wants to share their experience of pain and the other person, who wants to understand what this state would feel like. Meeting in a virtual environment and reflecting on the experience of pain through a virtual body (as a mirrored representation of one's own body) can enable a shared experience; a potential playground to exchange visual information (for example with a doctor who is also wearing a VR set and participating in the same virtual space), practice a better localization of pain, and therefore improve communication beyond the restricted realm of verbalization. Our argument in this article serves this purpose precisely, as we suggest that 4D imaging and VR technologies are methods for relating, evoking, and transferring nuanced experiences that state-of-the-art pain assessment instruments cannot transcribe.

Perspectival givenness

One of the key points of phenomenology is the notion of perspectival givenness, as it encapsulates the core insights of this

philosophical tradition: objects, experiences and phenomena are always given to consciousness from a particular perspective. Perspectival givenness is also rooted in the phenomenological emphasis on intentionality, the idea that consciousness is always directed toward something. In this context, no object or phenomenon is ever given to us in its entirety at once but is revealed through a series of perspectives or profiles. Edmund Husserl emphasized that our perception of an object is always partial and contextual, with various aspects becoming salient depending on our vantage point and focus.²⁴ In other words, perspectival givenness is the revealed side of the object to the subject's eye. In *Phenomenology of Perception*, Maurice Merleau-Ponty explains the nature of perspectival givenness of objects through the observation of a house.²⁵ If we look at the house from the front, we will define the house from this specific angle with its door. But to someone who looks at it from an airplane, the house is just a roof.²⁶ Nevertheless, the visually unperceived sides of the object in our horizon are already tacitly embedded in our understanding: even if we do not possess an omni-perspectival perception of the house, we inherently know that there are more sides to it. The same understanding goes for our own bodily perception; even if we do not see the back of our neck, we know it is there and although we may have never seen our kidneys, we know that they exist. In our suggested speculative applications below, we apply this notion of perspectival givenness: to give a glimpse of what remains inaccessible to our visual perception and seek the possibility to localize the sensation of pain through this revelation. The ultimate motivation here is to use these applications in VR as a tool to unlock keyholes of perception, which are not easily (if at all) accessible in our reality.

²⁴ Edmund Husserl: *Cartesian Meditations. An Introduction to Phenomenology*, Translated by Dorion Cairns, Dordrecht 1977.

²⁵ Maurice Merleau-Ponty: *Phenomenology of Perception* (1945), London 2002.

²⁶ Zeynep Akbal: *Lived-Body Experiences in Virtual Reality. A Phenomenology of the Virtual Body*, Bielefeld 2023, <https://doi.org/10.14361/9783839466766>.

3. Speculative Design

As outlined above, we argue that current methods of pain assessment do not, or do not sufficiently, address the subjective and multidimensional nature of pain. We are convinced that this is due to the media set-up, which captures and represents pain as separate from the body itself. Below, we present four speculative scenarios, which transfer the visual pain approach, developed in the Project SCHMERZEN FORMEN²⁷ (Fig. 1)²⁸, into a VR-based form of pain assessment.

Speculative design as a research method is an umbrella term for various design practices that are not aimed at developing a market-ready or fully functional product. Instead, ideas are visualized and made debatable through renderings,

Fig. 1. Visualpain.app as the basis for the speculative VR-based pain assessment applications



²⁷ The "SCHMERZEN FORMEN" project is a collaborative effort between the Faculty of Art and Design at Bauhaus-Universität Weimar and the Department of Anaesthesiology at the Jena University Hospital. Utilizing a participatory research approach, the project developed a visual-haptic pain assessment tool. This tool allows individuals to create personalized, animated graphical representations of their pain experiences by adjusting seven parameters, including size, color, shape, and pulsation. The aim is to provide a more nuanced and individualized method for patients to express and document their pain. For a short overview: <https://www.youtube.com/watch?v=8qeWLM0Muuc> [Accessed 08/2025].

²⁸ Breuer 2024 (see note 19).

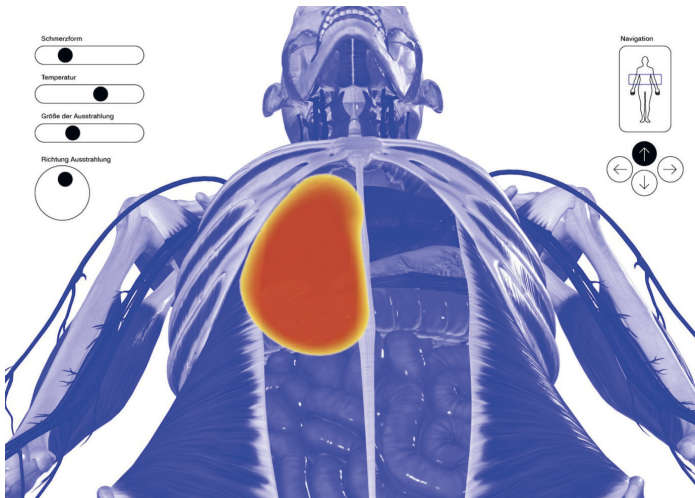
prototypes, and other representational techniques.²⁹ This less clearly defined field is divided into two subcategories: design fiction, which focuses more on future possibilities, and critical design, which takes a critical stance on technological progress and current conditions.³⁰ Speculative design is a research approach in the sense of “research through design”³¹, which allows for the exploration of possible futures through a design process. Following this approach, we, the authors, have developed a speculative application with four scenarios to investigate the potential of VR in the field of pain assessment.

Four Speculative Scenarios of Pain Assessment in VR

1) Inner journey (emerge in pain)

You select “Map a new pain” to document pain in your mid-torso. The menu retracts, and a life-sized anatomical model appears in front of

Fig. 21. Speculative VR-based pain assessment application: “Inner Journey”



29 Claudia Mareis: *Theorien des Designs zur Einführung*, Hamburg (2nd corrected edition) 2016, p. 215.

30 Marie Lena Heidingsfelder: *Zukunft gestalten. Design Fiction als Methode für partizipative Foresight-Prozesse und bidirektionale Wissenschaftskommunikation*, Berlin 2018, p. 99.

31 Christoph Frayling: *Research in Art and Design*. In: *Royal College of Art Research Papers*, Vol. 1, 1993, No. 1.

you. Moving closer with the navigation controller, you pass organs until reaching the pain's location, displayed in a transparent mid-torso location between the liver and heart. You activate the drawing tool, releasing red color to mark the pain and stopping it with a fist. Using the shaping tool, you adjust the pain's size and shape, refining its sharp, radiating nature with sliders. Finally, you animate it with a pulsing effect radiating into the chest. You can navigate around and immerse yourself in the virtual pain model.

This application provides an altered state of perception, resembling the body-size changes in the “Alice in Wonderland” story; first, we see a life-sized anatomical model in front of us, and as we move closer into the body, we emerge in the body itself – we become encapsulated in what we encapsulate.³² We can explore the inner parts of our body as the setup provides visual access to internal organs, allowing us to navigate through a virtual anatomical body. We can then map pain onto specific areas by manually drawing and modelling the pain location.

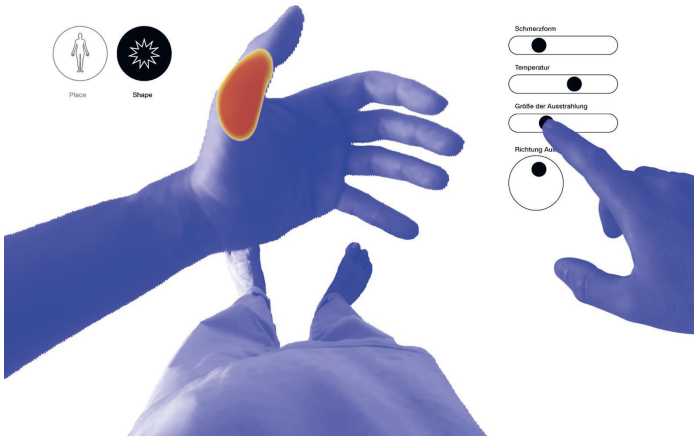
The idea behind this application is to get familiar with the “unknown” parts of our own body and therefore anticipate a shift in the ability to localize and identify pain, recognizing the totality of the body. The potential effects of this method can answer the questions: Can visualization of pain in VR improve interoception (the sense of the internal state of the body)? If we could see precisely where an internal organ lies in the abdominal area compared to other neighboring organs, would we be more interoceptive of it in our daily life?

2) Frontal first-person perspective in mixed reality

You select “Map a new pain,” and the menu shifts aside as you look down at your own body and focus on your hand. Activating a drawing tool, you apply a glowing red color to your aching thumb, shaping and

³² This perspective evokes Wittgenstein's observation on the paradoxical nature of this issue: “If someone says, ‘I have a body,’ they can be asked, ‘Who is speaking with this mouth?’” Ludwig Wittgenstein: *On Certainty*. Edited and translated by G. E. M. Anscombe and G. H. von Wright, New York 1972, p. 244.

Fig. 3. Speculative VR-based pain assessment application:
"Frontal first-person perspective in mixed reality"

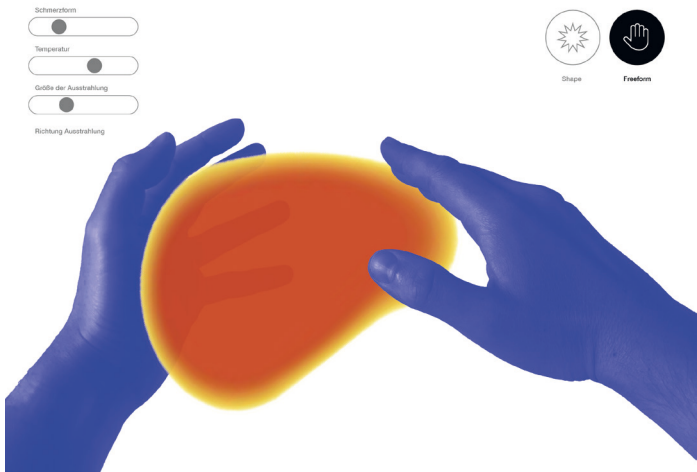


stretching the marking as needed. You adjust the model, extending it along the tendons to match the pain's spread. Using sliders, you refine the pain's texture, selecting a sharp, radiating sensation with defined edges. Finally, you animate the pain with a pulsing effect, adjusting the frequency until it aligns with your sensation.

We tend to do this act of tracing the borders of pain we feel to show the doctor and/or anyone we would like to share our experience with. But unlike in physical reality, this application may enable us to give a first-person perspective to show the precise location of the pain for another person to observe. As mentioned before, the first-person perspective is a powerful and crucial aspect of embodied experience, as it is our visual portal opening onto the world, cultivating our sense of body-ownership.

3) Hand interaction and modulation of pain

Fig. 4. Speculative VR-based pain assessment application: "Hand interaction and modulation of pain" "Frontal first-person perspective in mixed reality"



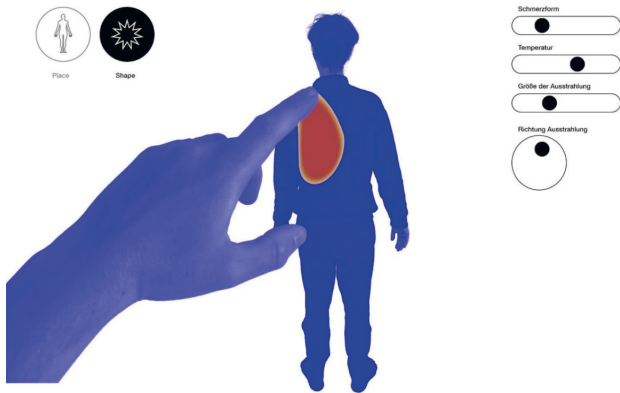
You put on the VR headset, and, after calibration, you see a virtual reconstruction of your surroundings. Pain is represented as a thick, red-glowing substance held in your hands, ready to be shaped. You manipulate it like malleable dough, stretching and compressing it to match your headache's sensation. Your fingers refine its edges, creating sharp and soft areas to reflect the pain's nuances. A floating menu appears, allowing you to adjust settings. You select a sharp, piercing quality and refine the model until it mirrors your experience. Activating the animation, the pain mass pulses in rhythm with your headache, becoming a tangible, visible construct.

In this application, the sensation of pain detaches from the body, floats in virtual space, and can be shaped and modelled

with the hands. The sensation of pain becomes an external entity, and we can therefore interact with what has now become a detached form of being. This application can be seen as in opposition to the first method of “emerge in pain,” as the users are invited to have an externalized relationship with the pain sensation when they see it as an object in their hands – indicating our usage of the perspectival givenness as a phenomenological method.

4) Spatial mapping of back pain on Doppelgänger

Fig. 5. Speculative VR-based pain assessment application: “Doppelgänger”



You move around your transparent virtual body, focusing on your painful shoulder. Activating the drawing tool, you use your right hand to apply a glowing red color to mark the exact spot of discomfort. Using the shaping tool, you mold the pain coloration onto the shoulder, pressing it to reflect the sensation. Through sliders on an interface, you adjust the pain's character to a sharp, stabbing texture with radiating

edges. You fine-tune until the model matches your real pain. Finally, you activate the animation, making the pain pulse into the neck with a rhythmic wave. After adjusting the intensity and frequency, you step back and view the replica from different angles, confirming that the pain is now accurately visualized on your Doppelgänger.

In this application, we envision a pain assessment method where users can paint their pain onto a mirrored virtual Doppelgänger, allowing us to visualize and position the pain on the back of our “own” body.

Unlike the objects around us, our own body is not entirely available for us to observe and interact with. We cannot lift ourselves and twist around to see a skin irritation on our back, freedom of movement is restricted as we try to look over our shoulders. This application therefore provides a third-person perspective (an observer’s viewpoint) for us to observe our own body, not with the intention of inducing some sort of detachment, but rather to help us to map the pain and discomfort in a more accurate way.

Discussion

We gained two main insights through our speculative applications. First, the application of VR as a tool for visualizing offers a stronger visual link between the user’s body and the pain representation, facilitating communication about pain both for the patient and the physician. VR technology has the potential to refine pain assessment by employing 3D spatial depth and transparency, allowing for more precise localization in terms of position and volume. The first-person perspective and embodied interaction offer an intuitive, situated experience, surpassing traditional pictorial methods. The technology allows doctors and patients to simulate discomfort in VR,

potentially improving shared body experiences in medical diagnostics. These applications can be further developed to enhance doctor-patient communication and understanding, as they could bridge gaps in communication, enabling more accurate and timely diagnosis. Such a shared experiential platform would not only empower patients to express their pain more effectively but can also aid doctors in translating complex visceral sensations into understandable terms. For instance, illustrating the nature of a pain through an interactive VR experience can transcend traditional methods, such as sectional images from CT scans or X-rays, and advance a deeper understanding of conditions.

The second insight is a more elevated self-body perception and body ownership through the visualization of bodily sensations in VR. By immersing users in simulations that highlight various bodily experiences, individuals not only become better equipped to localize their pain but can also investigate different states of lived-body experiences. This state of immersion can potentially result in heightened self-awareness and can encourage self-regulation strategies, such as finer management of emotions and cognitive reframing. Our speculative designs therefore invite users to practice perspectival givenness to visualize and understand the nature of pain through the composition of different angles: inside the body, looking at the body from the first-person perspective, externalizing the body and then approaching it on a mirrored body image

In addition to our aim for better medical communication, we suggest that such confrontational motives in VR can activate new dimensions of subjective experience.³³

We believe that enhanced pain communication and elevated self-body perception represent relevant aspects that will potentially improve the situation for individuals suffering

³³ Further research could verify these hypotheses by e.g. using micro-phenomenological interview methods (developed by Claire Petitmengin: *Uncovering the dynamics of lived experience through micro-phenomenology*, Seminar of the Cognition Institute, University of Plymouth, Nov 2017, Plymouth 201) following the VR experiences, as this technique allows the subjective and detailed lived-experience of participants to be captured, focusing on how pain is lived and perceived in the moment.

from pain. With the increasing prevalence of digital medical provision, we believe that exploring the use of VR technology for patients with chronic and recurring pain is worthwhile, and that its potential should also be utilized for pain assessment. With our contribution, we aim to outline the field and encourage further research in this area, particularly in exploring visualizations of bodily sensations. This includes investigating where the sensation of pleasure lingers in the body, identifying the origins of motion sickness, and determining whether nausea and dizziness can be visualized. Furthermore, our suggested applications can be appropriated to visualize how an amputee might perceive and represent a phantom limb, as well as how phantom limb pain could be traced.

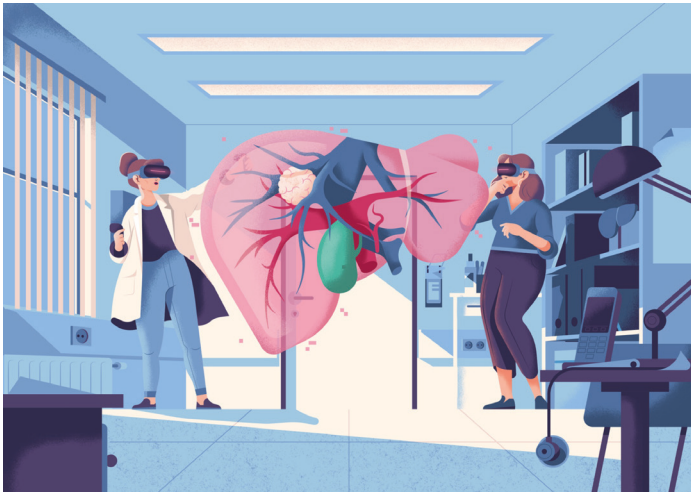
Surgical Use Cases of 4D Imaging

The integration of 4D imaging into surgical environments signals a shift from diagnostic to situative forms of medical imaging. 4D images operate not merely as representations of the body but as active, generative media that shape clinical situations through embodied and spatial interaction. This situative understanding emphasizes the performative role of images in shaping how surgical practice unfolds temporally, spatially, and cognitively. In the future, 4D images may organize perception, guide action, and mediate collaboration among clinicians in new ways. Grasping these transformations requires an interdisciplinary dialogue between medicine, design, technology and media studies to account for the complex entanglement of visualization, interaction, and decision-making in hybrid image spaces. To translate these conceptual insights into practice, concrete use cases are needed that embed 4D imaging within distinct clinical settings, thereby making its situative potential accessible alongside established healthcare workflows.

Patient Education

Medical images are often challenging for patients to interpret. Although most medical imaging modalities, such as computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI), can be rendered as three-dimensional volumetric data, they are usually displayed as two-dimensional reformatted planes

rendered in grayscale on conventional monitors. Understanding these images requires patients to mentally relate these slices to their own bodies, a process that presents significant cognitive challenges even for trained clinicians. This format often makes it difficult for medical staff to effectively communicate patient-specific pathologies, such as tumors or vascular changes, to patients. Virtual reality (VR) offers a promising way to reduce this layer of abstraction. By generating patient-specific three-dimensional models from CT or MRI data, physicians can present a realistic and interactive visualization of the patient's own anatomy and pathologies. Using VR headsets, patients could intuitively rotate and scale the model through body movements. The stereoscopic visualization further enhances the ability to perceive spatial relationships within anatomical structures. Rather than relying solely on abstract images or verbal explanations, patients can experience their condition in an immersive, spatial manner. As a result, patients can gain a clearer understanding of their disease, the planned medical procedures, and the associated risks. This enhanced visualization fosters informed decision-making, strengthens trust in medical interventions, and can improve doctor-patient communication.



Preparing Surgical Interventions



(Anton Hallmann, Moritz Queisner, 2025. CC BY-NC-ND 4.0)

In tumor board meetings, where surgeons and radiologists collaboratively plan surgical interventions, decision-making is fundamentally grounded in the interpretation of greyscale two-dimensional tomographic images. These cross-sectional or ‘sliced’ images demand that clinicians mentally reconstruct three-dimensional anatomical relationships that they refer to during surgery. Traditionally, this practice is developed by sequentially scrolling through stacks of images and mentally reconstructing a three-dimensional representation of the patient’s anatomy. This cognitive skill relies heavily on visual-spatial reasoning and carries inherent risks, including potential misinterpretations that could impact surgical outcomes. 4D imaging offers a new approach to enhance these

clinical workflows. By rendering patient-specific anatomical structures as immersive three-dimensional models in mixed reality headsets, physicians can experience spatial relationships visually rather than reconstructing them mentally. Participants in tumor board meetings could collaboratively visualize tumors, vascular structures, and surrounding tissues in a shared augmented space, where three-dimensional models are superimposed onto the physical environment. Using hand gestures, clinicians could rotate, scale, and dissect segmented anatomical models, enhancing both collective discussion and individual spatial understanding. Unlike conventional two-dimensional displays, 4D imaging introduces stereoscopic depth perception and embodied interaction, dynamically coupling user movement with perspective shifts. This multisensory engagement strengthens spatial cognition by linking visual, vestibular, and proprioceptive cues. As a result, tumor boards using 4D imaging may be able to foster more comprehensive decision-making processes and potentially reduce the cognitive gaps that arise from the abstraction of sectional images. Beyond their technical utility, these technologies also invite broader reflection within visual and media studies on how new forms of embodied interaction are reshaping epistemic practices in medicine, altering not just how knowledge is accessed, but how it is spatially and collectively negotiated.

Simulation Training

4D imaging offers new possibilities for linking digital learning content with physical objects and spaces. This is particularly valuable in medical education, which fundamentally relies on communicating implicit knowledge (“learning by doing”). Medical students must acquire practical knowledge that



(Anton Hallmann, Moritz Queisner, 2025. CC BY-NC-ND 4.0)

requires hands-on training with real objects. Central to this process is the active, physical practice and active acquisition of procedural skills. Mixed reality can help students acquire these skills by spatially and contextually connecting digital learning content with physical objects. This enables learners to directly interact with their physical working environment without the need for digital input devices such as controllers. This approach addresses a fundamental limitation of existing digital learning applications: until now, learners have primarily engaged with digital knowledge content passively, as consumers or observers, for instance through online courses or instructional videos. The integration of physical and digital components in 4D imaging facilitates a more immersive and engaging learning experience, projecting virtual information directly onto real objects. For example, the use of an ultrasound

probe can be learned in a multimodal manner, where the integration of visual, auditory, and haptic interactions enhances cognitive processing and long-term knowledge retention. In addition to offering risk-free and repeatable training scenarios, as is already possible with analogue simulations, 4D imaging further enables learners to practice independently in environments that more closely resemble real-world clinical settings.

Biomedical Data Analysis



(Anton Hallmann, Moritz Queisner, 2025. CC BY-NC-ND 4.0)

Biomedical research traditionally relies on data acquisition techniques optimized for two-dimensional visualization, such as histological slides and conventional microscopy. These slices, while rich in detail, require cognitive reconstruction by researchers to identify three-dimensional relationships among

anatomical structures or pathological findings. This process of mental interpolation introduces epistemic limitations, particularly when addressing complex spatial phenomena such as tumor infiltration, vascular networks, or microstructural tissue changes. In contrast, three-dimensional imaging techniques, such as light-sheet fluorescence microscopy and volumetric electron microscopy, generate volumetric datasets that render spatial relationships perceptible, revealing patterns and correlations that may remain obscured in two-dimensional images. The affordance of virtual reality further extends this shift by introducing an embodied exploration and stereoscopic depth perception of volumetric data. Within immersive environments, anatomical and pathological structures are no longer conceptualized solely through schematic representation but instead become navigable spaces that can be encountered and traversed from within. These modes of interaction could improve spatial analysis in both clinical and research settings. Researchers in hospitals can navigate cellular microenvironments, trace pathological growths in situ, or track molecular distributions. In this way 4D imaging may dissolve the spatial constraints that have long characterized biomedical imaging, potentially redefining diagnostic protocols and biomedical data analysis. By facilitating a more intuitive and holistic understanding of anatomical and pathological configurations, it could also enhance collaborative interpretation across disciplines such as pathology, radiology, and surgery.

Patient Empowerment before Hospital Stays



(Anton Hallmann, Moritz Queisner, 2025. CC BY-NC-ND 4.0)

An upcoming hospital stay often evokes significant emotional distress in patients, long before actual admission occurs. Studies suggest that up to 80% of patients report specific concerns related to treatment procedures or experience generalized anxieties about hospitalization.¹ Such anxieties frequently manifest as a perceived loss of control or a sense of discomfort.² Particularly invasive interventions, such as surgical operations, anesthesia, or intensive care stays, are frequently perceived as exceptional and threatening situations, often accompanied by a profound fear of the unknown. Standard medical consultations cannot always address the full range of patients' questions and emotional needs. Patients

114

- 1 Paraskevi Mavrogiorgou, Hannah Zogas, Georgios Zogas, Georg Juckel, Jan-Florian Heuer: Perioperative Ängste und die Angst vor dem Tod [Perioperative anxiety and fear of death]. In: Anaesthesiologie, Vol. 72, 2023, No. 4 (April), pp. 266-272, German, <https://doi.org/10.1007/s00101-023-01267-3>.
- 2 See Holger Sauer: Der angstfreie Operationssaal, Berlin, Heidelberg 2015, p. 3.

often remain with unresolved questions: What awaits me in the hospital? What will the environment be like? What procedures will occur immediately before surgery? What happens during anesthesia? What will happen in the intensive care unit? Emotional strain of this kind during the treatment process has been associated with poorer postoperative outcomes and higher mortality rates.³ In this context, VR could help strengthen patients' psychological and emotional preparedness through strategies of empowerment. Unlike conventional two-dimensional images, VR environments offer an immersive and embodied experience of clinical settings. 360° or volumetric video recording techniques enable a stereoscopic view of clinical situations which can create an emotionally powerful sense of spatial realism. While traditional 2D media, such as smartphones or televisions, can only display fragmented excerpts of a larger scene, VR environments immerse the viewer entirely, integrating them into the scene. Through dynamic adaptation to the viewer's perspective and bodily movements, VR creates a sense of embodied presence within the simulated environment. Situated within a broader rethinking of the "patient journey," the integration of 4D imaging and immersive technologies holds considerable promise for the long-term reduction of preoperative anxiety. Beyond individual psychological benefits, VR-based preparatory experiences not only equip patients more effectively for upcoming clinical encounters but also help reduce the informational and emotional workload of clinical staff. In this sense, VR does not merely function as a technological supplement to patient education, but rather as a medium through which patients' experiences of vulnerability, anticipation, and resilience might be ethically and emotionally reconfigured.

3 Woubet Tefera Kassahun, Matthias Mehdorn, Tristan Cedric Wagner, Jonas Babel, Helge Danker, Ines Gockel: The effect of preoperative patient-reported anxiety on morbidity and mortality outcomes in patients undergoing major general surgery. In: Scientific Report, Vol. 12, 2022 April 15, Article number 6312, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10302-z>.

Herausgegeben von
Kathrin Friedrich
Moritz Queisner
Karl Eisenträger
Carolin Schabbing

DFG-Schwerpunktprogramm ‚Das digitale Bild‘



Erstveröffentlichung: 2026
Gestaltung: Lydia Kähny, Satz: Isabella Grill, UB der LMU
Creative Commons Lizenz:
Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen (CC BY-SA)
Diese Publikation wurde finanziert durch die Deutsche
Forschungsgemeinschaft.
München, Open Publishing LMU

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

UB | Universitätsbibliothek
Ludwig-Maximilians-Universität München

Druck und Vertrieb im Auftrag der Autorin/des Autors:
Buchschniede von Dataform Media GmbH
Julius-Raab-Straße 8, 2203 Großebersdorf, Österreich

Kontaktadresse nach EU-Produktsicherheitsverordnung:
info@buchschniede.at



DOI <https://doi.org/10.5282/ubm/epub.130130>
ISBN 978-3-99192-175-2

Reihe: Begriffe des digitalen Bildes
Reihenherausgeber
Hubertus Kohle
Hubert Locher



Das DFG-Schwerpunktprogramm ‚Das digitale Bild‘ untersucht von einem multiperspektivischen Standpunkt aus die zentrale Rolle, die dem Bild im komplexen Prozess der Digitalisierung des Wissens zukommt. In einem deutschlandweiten Verbund soll dabei eine neue Theorie und Praxis computerbasierter Bildwelten erarbeitet werden.

