



# Advent City: die Rekonstruktion einer untergegangenen Siedlung in der virtuellen Realität

Matthias Lang<sup>1</sup>, Philippe Kluge<sup>1</sup>, Frigga Kruse<sup>2</sup>, and Vinzenz Rosenkranz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bonn Center for Digital Humanities, Universität Bonn, Heussallee 14–16, 53113 Bonn, Germany

<sup>2</sup>Institut für Ökosystemforschung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Olshausenstr. 75, 24118 Kiel, Germany

<sup>3</sup>eScience-Center, Universität Tübingen, Keplerstraße 2, 72074 Tübingen, Germany

**Correspondence:** Matthias Lang (matthias.lang@uni-bonn.de)

Received: 7 June 2022 – Revised: 21 September 2022 – Accepted: 30 September 2022 – Published: 18 November 2022

**Kurzfassung.** Das nur wenige Kilometer nördlich von Longyearbyen auf der anderen Seite des Adventfjords gelegene Advent City war die erste Steinkohlemine auf Spitzbergen, die ganzjährig in Betrieb war und bereits fünf Jahre nach der Aufnahme der Arbeiten aufgrund mangelnder Profitabilität wieder aufgegeben wurde. Während Teile der Siedlung seit über hundert Jahren dem Verfall überlassen werden, wurden viele der Gebäude schon kurz nach der Aufgabe der Bergbautätigkeit an anderer Stelle wiederrichtet und stehen größtenteils heute noch an ihrer neuen Position. Neben den Überresten von Gebäuden und technischen Installationen vor Ort sowie den noch erhaltenen Holzhütten, haben sich eine ganze Reihe von historischen Photographien erhalten, die uns ein sehr genaues Bild der Siedlung zeigen. Aus den unterschiedlichen Quellen wurde ein vollständiges 3D-Modell von Advent City entwickelt, das die britische Mine zum Zeitpunkt ihres Betriebs Anfang des 20. Jahrhunderts zeigt. Dieses Modell wurde anschließend in eine Virtual Reality Anwendung überführt, welche dem Nutzer das immersive Erleben der Siedlung erlaubt. Wir werden in unserem Beitrag die Genese des 3D-Modells sowie der VR-Umgebung eingehend besprechen und anschließend den Nutzen einer derartigen digitalen Welt für die Vermittlung der Ergebnisse der polararchäologischen Forschung Studierende, Lehrende, Schülerinnen und Schüler sowie die interessierte Öffentlichkeit diskutieren.

**Abstract.** Located just a few kilometers north of Longyearbyen on the other side of Adventfjord, Advent City was the first coal mine on Spitsbergen to operate year-round. It was abandoned just five years after work began due to unprofitable operations. While parts of the settlement have been left to decay for over a hundred years, many of the buildings were

rebuilt elsewhere shortly after mining operations were abandoned and largely still stand in their new positions today. In addition to the remains of buildings and technical installations on site, as well as the wooden huts that are still standing, a whole series of historical photographs have survived that show us a very accurate picture of the settlement. From the various sources, a comprehensive 3D model of Advent City was developed, showing the British mine at the time of its operation in the early 20th century. This model was then transferred into a virtual reality application that allows the user to experience the settlement immersively. In our paper we will discuss in detail the generation of the 3D model as well as the VR environment. Afterwards the benefits of such a digital world for disseminating the results of polar archaeological research to students and teachers at schools and universities and the interested public.

## 1 Einleitung

Digitale Methoden gewinnen in der Dokumentation und in der Vermittlung des kulturellen Erbes eine immer größere Bedeutung. 3D-Scanner und bildbasierte 3D-Verfahren erlauben die Erfassung komplexer archäologischer Kontexte und Artefakte in nie geahnter Effizienz, Genauigkeit und Qualität. Es entstehen digitale Kopien, die es den Forschenden erlauben, den Untersuchungsort stets aufs Neue virtuell zu besuchen und immer wieder aus anderen Blickwinkeln zu analysieren, um so bislang ungeahnte Zusammenhänge aufzudecken, die vor Ort verborgen geblieben sind. Zeitgleich konservieren die Modelle dauerhaft Gestalt und Aussehen eines Befundes oder Artefakts zum Zeitpunkt der Aufnahme in digitaler Form, während die physischen Instanzen einer steti-

gen Veränderung durch natürlichen Verfall, Zerstörung aber auch durch Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen unterliegen. Gerade in den Polargebieten mit ihren harschen Umweltbedingungen verbunden mit der oftmals schwierigen Erreichbarkeit der Fundstellen wiegt dieser Punkt besonders schwer, da die dortigen archäologischen Zeugnisse kaum vor dem Verfall zu schützen sind, der sich in durch den klimatischen Wandel und den zunehmend auftauenden Permafrostboden zusätzlich beschleunigt (Barr, 2008; Roura, 2010)

Neben ihrem Nutzen für die Forschung, sind die virtuellen Zwillinge der Fundstellen und der Objekte dazu geeignet, sie mit Wissen anzureichern und unterschiedlichen Zielgruppen zugänglich zu machen. Auf diese Weise erlauben sie eine direkte und ungefilterte Kommunikation der Wissenschaft mit der Öffentlichkeit und leisten so einen Beitrag zur Demokratisierung des Wissens. Während der Zugang zu Fachzeitschriften, zu Museen oder gar zu den Fundstellen selbst, auf wenige Privilegierte beschränkt ist, lassen sich digitale Inhalte nahezu weltweit abrufen. Nicht zuletzt können sie dabei helfen, die archäologischen Zeugnisse vor Zerstörung durch übermäßigen Tourismus zu beschützen, indem sie virtuell erlebt und verstanden werden können (Cassidy et al., 2019). Grundvoraussetzung hierfür ist der freie und uneingeschränkte Zugang zu den virtuellen Umgebungen.

Als Werkzeug der Präsentation und Vermittlung des kulturellen Erbes haben sich in den vergangenen Jahren die Methoden der Virtual Reality (VR) immer mehr etabliert (Bekele et al., 2018; Zhao, 2009). Sie erlauben neben der Visualisierung des archäologischen Befundes selbst, die Anreicherung der virtuellen Umgebung mit vielfältigsten audiovisuellen Inhalten und digitalen Rekonstruktionen, die es dem Nutzer erlauben, in längst untergegangene Welten einzutauchen und mit ihnen zu interagieren. Gerade in den entlegenen polaren Regionen der Erde erscheint dies ein geeignetes Werkzeug zu sein, um möglichst vielen Menschen den virtuellen Besuch zu ermöglichen, um so zu einem besseren Verstehen des Überlebens in der lebensfeindlichen, aber doch äußerst fragilen Umwelt der Polregionen beizutragen (Levy und Dawson, 2014; Dawson und Levy, 2016).

In unserem Beitrag werden wir die Anwendung digitaler Dokumentationsmethoden sowie die Entwicklung einer Virtual-Reality-Umgebung anhand der britischen Bergwerkssiedlung Advent City im Adventfjord auf Spitzbergen präsentieren und diskutieren.

## 2 Advent City

Advent City nur wenige Kilometer nördlich von Longyearbyen auf der anderen Seite des Adventfjords war die erste ganzjährig betriebene Steinkohlemine auf Spitzbergen (Abb. 1). Sie erwies sich als unprofitabel und wurde bereits im fünften Sommer nach ihrer Gründung, im Jahr 1908, endgültig aufgegeben. Während das Kraftwerk sowie viele der Betonfundamente heute noch im Gelände zu sehen sind, wur-

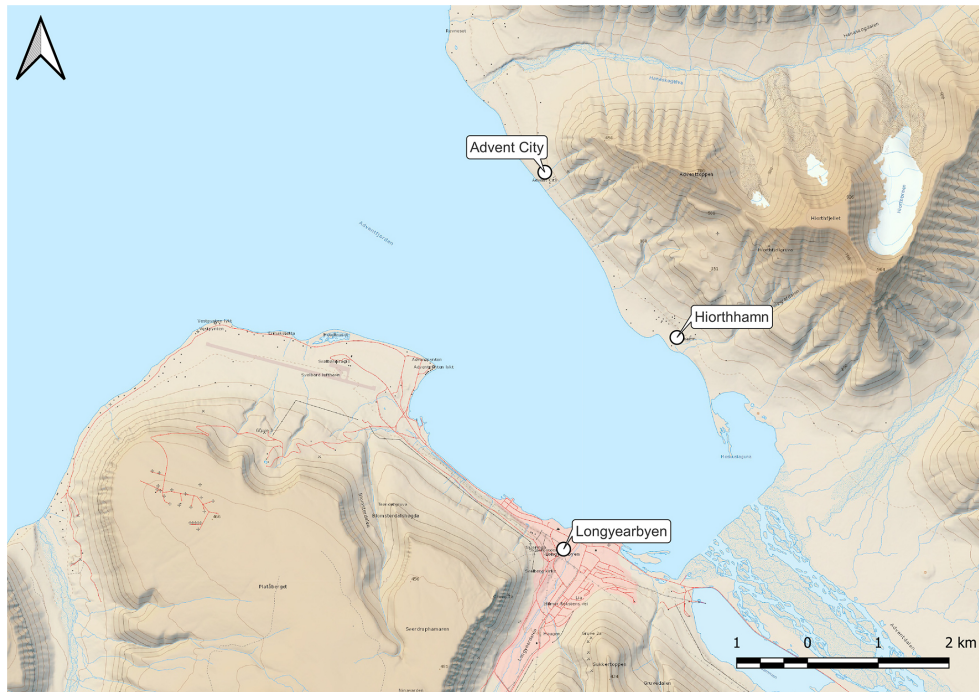
den die hölzernen Gebäude abgebaut und in anderen Siedlungen wie Longyearbyen und Hiorthhamn wiederaufgebaut, wo sie teilweise heute noch genutzt und bewohnt werden. In Hiorthhamn bilden die fast 120 Jahre alten, denkmalgeschützten Holzbauten die größte zusammengehörige Häusergruppe Spitzbergens. Sie befinden sich lediglich nicht mehr an ihrem Ursprungsort. Der Grund für Wiederverwendung der Gebäude dürfte im Mangel an Bauholz zu suchen sein, das aufwendig aus Großbritannien oder dem europäischen Festland importiert werden musste.

Bisheriges Forschungsinteresse drehte sich um die Fragen, warum die Spitzbergen Coal & Trading Company, der ehemalige Eigentümer von Advent City, gegründet wurde, welche Entscheidungen das englische Unternehmen für seine Bergbauaktivitäten in Spitzbergen traf und warum die Mine wieder aufgegeben wurde. Einerseits waren kommerzielle Ziele und finanzieller Gewinn die Hauptantriebskräfte, die sich nicht materialisierten; andererseits spielte Advent City eine unbestreitbare Vorreiterrolle in der frühen Industrialisierung eines bis dahin verschont gebliebenen Teils der Arktis (Kruse, 2014, 2016). Inzwischen wird auf Spitzbergen seit über 100 Jahren Steinkohle gefördert. Advent City brachte somit deutlich zum Ausdruck, wie zumindest die Briten sich die Erschließung der unwirtlichen Arktis vorstellten und welche Herausforderungen sie auf die harte Probe stellten. Für die Besucher vor Ort ging dieser aufschlussreiche frühindustrielle Ausdruck in dem Moment unwiderruflich verloren, in dem die verbliebenen Gebäude abtransportiert wurden oder verfielen (Abb. 2).

Der neuste Forschungsansatz behandelt die bleibenden ökologischen Folgen des Bergbaus, insbesondere die Reaktion der Tundravegetation nach der Stilllegung (Kruse et al., 2021). Schon in der Vorbereitungsphase für neue Feldarbeiten wurde während einer Ortsbegehung in Advent City festgestellt, dass sich die Fundamente und Hausplattformen deutlich vom Untergrund abhoben (Abb. 2). Parallel dazu ergab eine visuelle Bestandsaufnahme in Hiorthhamn, dass nicht nur das Baumaterial aus Advent City wiederverwertet wurde: Markierungen an den Außenwänden bezeugten, dass die Häuser originalgetreu mit geringsten Veränderungen ihre derzeitigen Plätze einnahmen (Abb. 3). Das Forscherteam erkannte schnell, dass man mit den richtigen Methoden dazu im Stande sein würde, Advent City zum Zeitpunkt der Stilllegung im Spätsommer 1908 zu rekonstruieren.

## 3 Rekonstruktion von Advent City

Um die gesamte Siedlung in einem immersiven und authentischen Modell erfahrbar zu machen, musste diese aus einer ganzen Reihe unterschiedlicher Quellen rekonstruiert werden. Grundlage des räumlichen Layouts der virtuellen Umgebung ist ein mittleres hochgenauem differentiellem GPS im Jahr 2016 eingemessener Plan, der die genaue Lage der noch heute sehr gut sichtbaren Fundamente der Gebäude und In-



**Abb. 1.** Lage von Advent City und Hiorthhamn nördlich von Longyearbyen auf der anderen Seite des Adventfjords (Npolar.No, 1990).



**Abb. 2.** Heute zeugen nur noch wenige Überreste von der Siedlung des frühen 20. Jahrhunderts.

stallationen beinhaltet. Zunächst diente diese Karte dazu, das Projekt zu planen und festzulegen, welche Modelle erstellt und wo sie platziert werden müssen. Ein derartiger Plan kann zwar die Lage der Befunde darstellen, ist jedoch kaum dazu geeignet, auch ihre genaue dreidimensionale Gestalt wieder-

zugeben. Aus diesem Grund wurden die noch existierenden Befunde in Advent City und im nahegelegenen Hiorthhamn mit bildbasierten 3D-Verfahren dokumentiert, um so digitale Zwillinge zu produzieren, die einerseits den Ist-Zustand





**Abb. 3.** In Hiorthhamn wiedererrichtete Hütte aus Advent City im heutigen Zustand.

hochauflösend erfassen und andererseits eine hochgenaue Grundlage für die virtuelle Rekonstruktion bilden (Abb. 4).

### 3.1 Rekonstruktion der Gebäude und Installationen

Zur Erstellung solcher 3D-Modelle bieten sich unterschiedliche Methoden an, von denen sich das 3D-Laserscanning bereits in anderen polararchäologischen Vorhaben als hervorragend geeignetes Werkzeug zur Dokumentation von architektonischen Ensembles erwiesen hat (Lewińska und Zagórski, 2018; Dawson et al., 2013). Zur Aufnahme der Befunde in Advent City haben wir uns jedoch dazu entschieden, ausschließlich das Image-Based-Modelling (IBM) einzusetzen, dass die Generierung von 3D-Modellen aus einem Verband digitaler Bilder erlaubt. Hauptgrund für die Wahl der bildbasierten Methode waren in erster Linie deren größere Flexibilität und Effizienz gegenüber dem Laserscanning. Dies bezieht sich sowohl auf die Datenaufnahme als auch auf deren Prozessierung.<sup>1</sup>

Während ein 3D-Scanner für jeden Scanvorgang auf einem stabilen Stativ positioniert werden muss, wird für das IBM eine handelsübliche Kamera verwendet, die bei ausreichender Belichtung in der Regel aus der Hand ausgelöst werden kann und somit eine deutlich leichtere Aufnahme schwer zu erreichender Bereiche erlaubt als mit dem Scanner. Als weiterer Nachteil des Scanners ist seine auf den maximalen Auszug des Stativs eingeschränkte Arbeitshöhe anzufüh-

ren, die eine Erfassung des oberen Abschlusses von Mauern oder Dächern oftmals unmöglich macht. Für das IBM hingegen können die Aufnahmen vom Boden mit Luftbildern ergänzt werden, die sich heute problemlos mit UAV-Systemen (*unmanned aerial vehicle*) aus dem Consumer-Bereich aufnehmen lassen. Diese erlauben zudem einen automatischen Bildflug, der die effiziente Erfassung auch größerer archäologischer Fundstellen mit hoher Genauigkeit erlaubt (Lang et al., 2016; Heeb, 2019; Lang und Kluge, 2021). Der für unser Vorhaben jedoch entscheidende Vorteil des IBM gegenüber dem Scanning ist die direkte Generierung eines geschlossenen und photorealistisch texturierten Modells in einer Software, das ohne Umwege als Grundlage der Rekonstruktion dienen kann. Der Laserscanner generiert hingegen zunächst nur eine Punktwolke ohne Farbinformationen. Diese muss in einem zweiten Schritt mit einer internen oder externen Kamera aufgenommen und mit der Punktwolke verknüpft werden. Eine weitere Prozessierung ist notwendig, um aus der nun kolorierten Punktwolke eine geschlossene 3D-Oberfläche abzuleiten (Lang et al., 2020).

Es kann als unzweifelhaft angesehen werden, dass ein geschlossenes und photorealistisch texturiertes Modell am ehesten geeignet erscheint, die äußere Gestalt des Ist-Zustandes eines archäologischen Befundes virtuell zu kopieren und zu konservieren. Zur Erstellung der Modelle wurde 2016 vor Ort ein Bildverband mit einer handelsüblichen digitalen Spiegelreflexkamera aufgenommen, der 2019 mit Luftbildern ergänzt wurde, um auch die Dachflächen der Gebäude sowie die teilweise noch hoch aufragenden Mauern und technischen Installationen des ehemaligen Kraftwerks von

<sup>1</sup>Ein ausführlicher Vergleich der beiden Methoden wurde kürzlich durch die Autoren an anderer Stelle veröffentlicht. Siehe: Lang et al. (2020).





**Abb. 4.** 3D-Modell der Ruinen des Kraftwerks von Advent City.

Advent City vollständig zu erfassen. Hierzu kam ein DJI Mavic Pro UAV der Marke DJI<sup>2</sup> zum Einsatz. Um die beiden Datensätze miteinander zu verbinden und gleichzeitig die Modelle zu georeferenzieren und auf ihre tatsächliche Größe zu skalieren, wurden Kontrollpunkte ausgelegt, deren genaue Lage mit einem differentiellen GPS-Gerät hochgenau eingemessen wurde. Diese Kontrollpunkte lassen sich im Anschluss in den Bildern erkennen und werden anschließend mit den GPS-Koordinaten verknüpft. Bevor die 3D-Rekonstruktion durchgeführt werden kann, müssen für sämtliche Bilder die Farbkalibration und der Weißabgleich erfolgen, um eine möglichst genaue farbliche Abbildung der Realität zu erreichen. Im Folgeschritt werden die Bilder in das Softwarepaket Agisoft Metashape Pro in der Version 1.7.2 geladen, das den Prozess der 3D-Rekonstruktion vollständig abdeckt. Dieser semiautomatische Prozess besteht aus fünf konsekutiven Schritten, der Bildorientierung (1), der Erzeugung einer dünnen Punktwolke (2), der Erzeugung einer dichten Punktwolke (3), der Vermaschung der Punkte (4) sowie der Texturierung (5).<sup>3</sup> Neben den Bildern können auch die Koordinaten der Kontrollpunkte zur Skalierung und Georeferenzierung in die Software importiert werden, um sie in einem ebenfalls halbautomatischen Prozess mit den auf den Bildern sichtbaren Markern zu kombinieren. Die fertigen Modelle lassen sich anschließend zur Weiterverarbeitung in standardisierte Datenformaten exportieren, die in nahezu

allen gängigen 3D-Umgebungen ohne weitere Konvertierungen importiert und bearbeitet werden können.

Es wäre zwar möglich, die auf diese Weise generierten Modelle direkt in eine virtuelle Umgebung zu überführen, was jedoch dazu führen würde, dass der heutige Ist-Zustand der einzelnen Installationen und Bauwerke zu sehen wäre und nicht der Zustand der Anlage zurzeit ihres Betriebs. Zudem existieren von den einst 18 Gebäuden lediglich noch 11 und das Ensemble wäre somit unvollständig. Darüber hinaus haben die an anderer Stelle wiedererrichteten Gebäude ihr Aussehen nach über hundert Jahren der Nutzung durch Um- und Anbauten, andere Farbgebung und den natürlichen Alterungsprozess der verwendeten Baumaterialien zum Teil stark verändert (Roura, 2010). Daher haben wir uns dazu entschieden, die zur Verfügung stehenden Modelle lediglich als akkurate und maßstabsgerechte Grundlage zu verwenden, auf deren Basis wir den ursprünglichen Zustand der einzelnen Gebäude modellieren und rekonstruieren konnten. Hierzu wurden die einzelnen Modelle in die 3D-Software Blender überführt und dort mit sämtlichen Einzelteilen wie Fenster, Türen und Schornsteine manuell nachmodelliert und in eine Bibliothek überführt, aus der sich im nächsten Schritt die einzelnen Gebäude wiederzusammenführen ließen. Ebenfalls in Blender wurden die einzelnen Komponenten auf Basis der für das IBM angefertigten Bildverbände photorealistisch texturiert (Abb. 5). Um den Grad des Realismus zu vergrößern, wurden sowohl die einzelnen geometrischen Komponenten als auch die Texturen leicht variiert, um den natürlichen Baumaterialien und den leichten Unterschieden in der handwerklichen Ausführung gerecht zu werden. Diese Varianten lassen sich nur in wenigen Fällen aus den tatsächlich vorhandenen Strukturen herleiten, erscheinen jedoch als unverzichtbares

<sup>2</sup>Da-Jiang Innovations Science and Technology Co.

<sup>3</sup>Der Prozess sowie dessen Grundlagen wurden in den vergangenen Jahren vielfach diskutiert und es soll daher an dieser Stelle nur auf die weiterführende Literatur verwiesen werden: Reu et al. (2013); Verhoeven et al. (2013); Kersten et al. (2015); Douglass et al. (2015); Zachar et al. (2018); Lang et al. (2020).

Stilmittel, um eine möglichst naturalistische Welt ohne repetitive Elemente zu erschaffen.

Um sich dem historischen Zustand möglichst weit anzunähern, standen einige wenige historische Photographien aus dem beginnenden 20. Jahrhundert zur Verfügung, die eine authentische Anpassung der Modelle an ihr ursprüngliches Aussehen erlaubten. Da die Aufnahmen die Siedlung nur aus einigen wenigen Perspektiven zeigen, sind die Gebäude oftmals nicht von allen Seiten klar sichtbar und es wurde versucht, die nicht sichtbaren Teile der einzelnen Befunde behutsam anzupassen, um ein einheitliches Gesamtbild zu erzielen. Andere Bestandteile der Anlage waren ausschließlich auf den historischen Aufnahmen zu identifizieren und mussten vollständig aus diesen sowie aus vergleichbaren Strukturen rekonstruiert werden. Insbesondere trifft dies auf die hölzerne Seilbahn zu, die für den Transport der Kohle vom Eingang der Mine zur Verladung auf Schiffe angelegt wurde und von der heute lediglich noch die Fundamente erhalten ist. Die Anlage ist jedoch auf den historischen Bildern gut zu erkennen und im nahe gelegenen Hiorthhamn hat sich eine vergleichbare Anlage deutlich besser erhalten. Die vollständige Rekonstruktion eines Objekts anhand von zweidimensionalen Vorlagen ist komplex, stellt hohe Anforderungen an die Modellierung und setzt eine grundsätzliche Kenntnis der zu generierenden Objektgattung voraus (Levy und Dawson, 2014). Zusätzlich erschwerte wurde der Abgleich von historischen Bildern und erhaltenen Befunden durch die zeitliche Qualität der Bilder sowie durch die geringe Auflösung der Digitalisate. Sämtliche Aufnahmen wurden auf monochromem Filmmaterial angefertigt und lassen somit keine Rückschlüsse auf die einstige Farbgebung der Gebäude und Installationen mehr zu und diese musste aus den heute noch erhaltenen Befunden rekonstruiert werden (Abb. 6).

Hierbei war zu beachten, dass die Siedlung lediglich für vier Jahre Bestand hatte und die meist hölzernen Bauten trotz der harschen Umweltbedingungen noch keinem fortgeschrittenen Alterungsprozess unterlegen haben konnten, während die heute noch erhaltenen Strukturen bereits seit mehr als einem Jahrhundert den Einflüssen der Umwelt ausgesetzt sind. Nicht rekonstruiert werden konnte der Innenraum der einzelnen Gebäude, da dieser bei allen von uns 2019 besuchten Hütten in Hiorthhamn im Laufe der Zeit meist mehrfach verändert wurde und die ursprüngliche Aufteilung und Verwendung der Räume nicht mehr rekonstruierbar ist. Auch die zeitgenössischen Photographien oder andere Quellen beinhalten keinerlei Informationen zum Inneren der Gebäude. Daher sind die Hütten in der VR-Umgebung nicht begehbar und können nur von außen betrachtet werden. Die Modelle sind jedoch so gestaltet, dass sie problemlos um einen Innenraum ergänzt werden können, sollten neue Informationen eine belastbare Rekonstruktion erlauben.

Mit unserer Vorgehensweise erhalten sämtliche Elemente der virtuellen Welt ein einheitliches Erscheinungsbild. Zwar wäre es problemlos möglich gewesen, diese in der virtuellen Landschaft farblich oder durch unterschiedliche Abstrakti-

onsgrade voneinander zu unterscheiden, um so dem Besucher die Genese des Gesamtmodells zu verdeutlichen (Heeb, 2019); mit dieser Vorgehensweise wäre jedoch der angestrebte immersive und naturalistische Charakter der VR weitestgehend verlorengegangen.

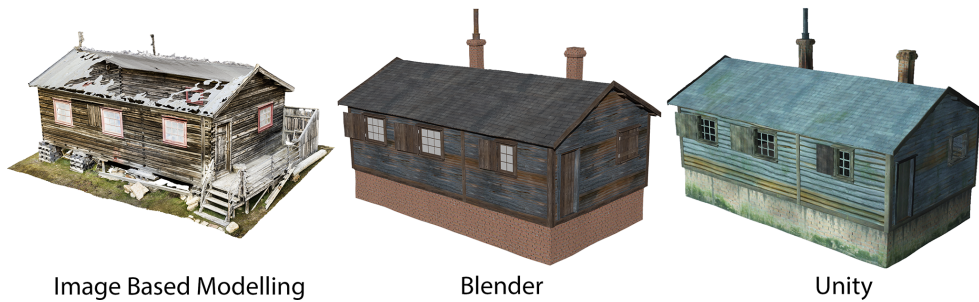
### 3.2 Rekonstruktion der Landschaft und des räumlichen Layouts von Advent City

Für die Rekonstruktion der genauen Lage der einzelnen Modelle steht zwar der 2016 erstellte Plan zur Verfügung, der jedoch lediglich die zweidimensionale Verortung der einzelnen Objekte erlaubt und zudem auf ein recht kleines, über die Siedlung kaum hinausgehendes Areal beschränkt ist. Um eine immersive Umgebung zu gestalten, war es jedoch unabdingbar, das weitere Areal von Advent City miteinzubeziehen, um dem Betrachter einen möglichst realistischen Eindruck der landschaftlichen Einbettung der Siedlung zu vermitteln (Cassidy et al., 2019). Hierzu wurde aus dem durch das Norwegian Polar Institute veröffentlichte und frei verfügbare digitale Geländemodell (Npolar.No, 2014) ein 3D-Modell der näheren Umgebung von Advent City abgeleitet. Die Auflösung der zur Verfügung stehenden Daten stellt die Erdoberfläche in Quadraten mit zwanzig Metern Kantenlänge dar, so dass Details des Reliefs oder gar der archäologischen Befunde nicht sichtbar sind. Um die Informationen innerhalb der Siedlungsstelle zu verdichten, wurde im Sommer 2019 das direkte Umfeld von Advent City mit einem UAV befliegen, um hieraus ein Modell mit einer Auflösung von fünf Zentimetern abzuleiten, das die topographischen Gegebenheiten detailliert darstellen. Auch hier ist jedoch zu beachten, dass dies den heutigen Zustand der Fundstelle zeigt und nur bedingt auf das Areal Anfang des 20. Jahrhunderts übertragen werden kann. Neben erosiven Prozessen ist in diesem Rahmen vor allen Dingen die zum Teil äußerst dichte Streuung von Fragmenten der verfallenen baulichen Strukturen anzuführen, die sich über das ganze Areal verteilen. Wir haben uns aus diesem Grund dazu entschieden, das hochauflösende Geländemodell – wie schon die Modelle der Gebäude und Installationen – lediglich als Grundlage für eine weitgehend händische Modellierung zu nutzen.

### 3.3 Gestaltung der Virtuellen Realität

Im nächsten Schritt wurden nun erstmals sämtliche Komponenten als sogenannte Assets in die Gaming-Engine Unity3D (Version 2019.4.37f1) überführt und dort anhand des Plans auf dem 3D-Modell der Landschaft platziert. Unity3D stellt neben der Unreal-Engine eine der beiden verbreiteten und für nicht-kommerzielle Anwendungen frei verfügbaren Frameworks dar, das die Entwicklung und die visuelle Darstellung einer VR-Umgebung erlaubt (Mack und Ruud, 2019; Linowes, 2020). Die Aufgabe der Game-Engine besteht darin, reale Objekte basierend auf den physikalischen Gesetzmäßigkeiten, denen sie unterliegen in einer virtuellen Um-





**Abb. 5.** Modellierung und Texturierung eines Modells auf Basis einer der Hütten aus Hiorthhamn.

gebung zu simulieren (Zhao, 2009). Dies betrifft beispielsweise die Schwerkraft, das Reflektieren und Absorbieren von Licht oder die Ausbreitung des Schalls. In unserem Projekt haben wir uns aufgrund von weitreichenden Vorerfahrungen zur Verwendung von Unity3D entschieden, um die Einarbeitungszeit in die komplexen Softwarekomponenten zu minimieren.

Als erstes Element wurde Landschaft in Unity3D importiert, welche dann um die in Blender modellierten Gebäude und Strukturen ergänzt wurde. Um eine möglichst genaue und realistische Verortung der einzelnen Modelle zu erzielen, wurde immer wieder virtuell die gleiche Perspektive wie auf den historischen Photographien eingenommen und die Objekte behutsam so an die richtige Stelle bewegt. Im nächsten Schritt wurde das Unity3D-Plugin Gaia genutzt, das eine prozedurale Gestaltung der Landschaft mit unterschiedlichen Böden, geologischen Elementen und der Vegetation erlaubt. Als Grundlage dieser Landschaftsmodellierung dienten eine Vielzahl von Photographien der Autoren, um den Charakter der polaren Landschaft möglichst exakt nachzuempfinden. Als problematisch erwies sich in diesem Zusammenhang das Fehlen eines Großteils der polaren Flora im verwendeten Plugin. Da ein händisches Modellieren der Pflanzen in der Projektlaufzeit kaum zu realisieren gewesen wäre, wurde auf möglichst neutrale Elemente zurückgegriffen, die der äußeren Erscheinung der tatsächlichen Vegetation möglichst nahekommen, diese jedoch nicht exakt wiederholen.

Um die Performanz der Anwendung auch auf weniger leistungsfähigen Computern zu gewährleisten, wurde die Siedlung mit umgebendem Gelände auf eine Größe von  $600 \times 600$  m reduziert. Bei dieser Ausdehnung kann der Nutzer von keinem Standpunkt innerhalb der Siedlung den Rand des Geländes sehen und gibt ihm so niemals das Gefühl, sich in einem limitierten Raum zu bewegen. Ergänzt wurde das Gelände um eine sogenannte Skybox, die den Horizont und den Himmel als Panoramaphotographie in die Szene einbindet. Um dem Nutzer neben der Siedlung selbst einen gewissen Orientierungsrahmen zu geben und das Verlassen des Geländes zu verhindern, haben wir ein Wegesystem aus Trampelpfaden erstellt, die sich durch das vollständige Fehlen von Vegetation von der sie umgebenden Umwelt abheben. Diese Pfade sind zusätzlich durch niedrige Zäune eingefasst, die es

in der Realität nie gegeben hat, die Orientierung des Besuchers im Gelände jedoch enorm erleichtern.

Um den Besuch der virtuellen Umgebung interessanter und lebendiger zu gestalten, haben wir die Siedlung um zeit-typische Gegenstände des alltäglichen Gebrauchs wie Fässer oder Holzstapel angereichert, die sich aus den historischen Photographien als auch im heutigen Befund nachweisen lassen.

Um den Realismus der Umgebung zu vergrößern, wurde eine Soundlandschaft gestaltet, die einerseits aus natürlichen Geräuschen wie dem Wind, dem Rauschen des Meeres und den Stimmen der allgegenwärtigen Seevögel besteht und andererseits die Geräuschkulisse der Bewohner von Advent City wie die Gespräche und das Gläserklirren aus dem Clubhaus, das beständige Tuckern des Generators aus dem Kraftwerk oder dem Husten aus dem Krankenquartier simuliert (Goodwin, 2018; Manghisi et al., 2017; Garner, 2017; Primeau und Witt, 2018). Die Sounds sind mit den einzelnen Objekten verbunden und werden je nach Entfernung leiser oder lauter und sind für den Nutzer eindeutig lokalisierbar. Diese Einbindung akustischer Information trägt maßgeblich zur Immersion des Nutzers bei, deckt sich doch auf diese Weise der Besuch der virtuellen Welt mit der Perzeption der Realität. Zwar ließe sich der Grad der Immersion durch die Simulation weiterer sensorischer Eindrücke wie dem Geruchs- oder dem Temperaturempfinden noch weiter steigern, dies kann jedoch mit den zurzeit zu Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten kaum realisiert werden.

Auf die Integration von humanen Charakteren, welche die Siedlung bevölkern und mit dem Nutzer interagieren, wurde aus Gründen der limitierten Ressourcen, die dem Projekt zur Verfügung standen, verzichtet. Die Modellierung von Menschen mit deren Bewegungsabläufen, ihrer Bekleidung und ihrer Mimik ist äußerst komplex und nur mit großem Aufwand in einer Qualität zu erreichen, die dem Erscheinungsbild der übrigen Komponenten entspricht. Es steht jedoch unzweifelhaft fest, dass interaktive menschliche Charaktere die statische Umgebung lebendiger und damit immersiver erscheinen lassen. Sie eröffnen vollkommen neue Möglichkeiten in der geführten Navigation und in der Präsentation von Informationen durch gesprochene Sprache, Mimik und Gestik (Machidon et al., 2018; Camporesi und Kallmann, 2013).



**Abb. 6.** Historische Photographien die als Grundlage für die Modellierung und genau Platzierung der einzelnen Gebäude und Strukturen dienen.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit beschränkten Ressourcen erschien dies jedoch mit den aktuell zur Verfügung stehenden Techniken nicht in angemessener technischer Qualität durchführbar.

### 3.4 Anreicherung mit Informationen

Als komplex erwies sich die Anreicherung der virtuellen Welt mit zusätzlichen Informationen zur Funktion und Bedeutung der einzelnen Gebäude und Strukturen. Das Lesen der zunächst freischwebend platzierten Texte über den Ob-

jekten empfanden die Testnutzer als äußerst anstrengend und unangenehm; zudem störten die stets sichtbaren Textblöcke die Immersion der Besucher. Wir haben uns daher entschieden, vor den Objekten kleine leuchtende Zylinder zu platzieren, hinter denen sich kleine Tafeln mit kurzen, gut lesbaren Texten verbergen, die erst bei der Annäherung an den Zylinder erscheinen (Abb. 8).

Hinter den Zylindern können sich jedoch auch die historischen Bilder verbergen, die es den Nutzern erlauben, exakt die Perspektive des Photographen einzunehmen und diese





**Abb. 7.** Ansichten von Advent City in der Game Engine Unity3D.

mit der virtuellen Umgebung zu vergleichen. Zur Unterscheidung der beiden unterschiedlichen Zylinder sind die entweder mit *Info-Hotspot* oder *Historic Picture Hotspot* gekennzeichnet.

### 3.5 Navigation

Im Idealfall könnte der Besucher der virtuellen Umgebung diese frei erkunden und der Standpunkt im Raum würde durch die Bewegung der Person im physischen Raum definiert. Diese ideale Vorgehensweise lässt sich jedoch kaum realisieren, da eine Fläche zur Verfügung stehen müsste, welche maßstabsgerecht die Größe der Siedlung einnimmt. Da ein derartig großes Areal kaum zur Verfügung stehen dürfte, muss auf eine andere Navigation zurückgegriffen werden, die nicht der realen Bewegung im Raum entspricht. Wir haben uns hierbei für eine Teleporter-Funktion entschieden, die es erlaubt, mit dem Controller Ziele in der Umgebung anzuzielen und dann an diesen neuen Standpunkt teleportiert zu werden. Um den Zielort zu markieren, wird ein Strahl vom aktuellen Standpunkt ausgesendet und kann dann durch Bewegung des handgeführten Controllers im Raum platziert werden. Im Falle eines gültigen Standpunktes erscheint der Strahl grün; zielt man auf ein Areal außerhalb des modellier-

ten Areales oder auf Flächen innerhalb der gebauten Strukturen, ist dieser rot und die Funktion kann nicht ausgelöst werden. Es steht außer Frage, dass diese Art der Fortbewegung nicht der natürlichen menschlichen Bewegung im Raum entspricht und die Immersion des Nutzers stört. Zurzeit erscheint uns jedoch diese Art der Fortbewegung die einzige Möglichkeit zu sein, die virtuelle Umgebung in einem eingeschränkten Raum zu nutzen und zu verhindern, dass die Nutzer in der physischen Welt mit Wänden oder Einrichtungsgegenständen kollidieren und sich womöglich verletzen. Zudem muss die stationäre Navigation als inklusiver angesehen werden, da sie auch in ihrer Mobilität eingeschränkten Personen offensteht.

### 3.6 Ausgabe der Umgebung

Aus Unity3D lassen sich lauffähige Umgebungen exportieren, die sämtliche notwendigen Daten in einer Datei beinhalten, die vom Nutzer per Mausclick geöffnet werden kann. In unserem Falle wurde dies für das Betriebssystem Windows 10 und für das VR-Headset HTC Vive realisiert. Während noch vor wenigen Jahren äußerst leistungsfähige Computer notwendig waren, um VR-Umgebungen in Echtzeit zu nutzen, kann dies heute mit den meisten aktuellen Gaming-



**Abb. 8.** Erklärungen zu den Gebäuden und Strukturen werden durch sogenannte Info-Hotspot realisiert, die mit kurzen Texten verbunden sind.

Notebooks realisiert werden, die über eine dezidierte Graffikarte verfügen. Auf älteren Geräten ist oftmals die Aufrechterhaltung einer Bildwiederholrate von über 90 Frames per Second (FPS) nicht möglich und führt unweigerlich zu einem Ruckeln der Darstellung, was bei den meisten Nutzern zu einem gestörten Gleichgewichtssinn und einem damit verbundenen Unwohlsein führt (Saredakis et al., 2020; Caserman et al., 2021).

#### 4 Präsentation und Evaluation der Ergebnisse

Im Sommer 2019 wurde die Software immer wieder mit Studierenden an der Universität Tübingen getestet und konstant an deren Vorschläge angepasst, sowie auftauchende Fehler in der Darstellung oder der Navigation behoben. Zeitgleich wurde die Umgebung in einem iterativen Prozess auf inhaltliche Fehler hin untersucht, um historische Ungenauigkeiten oder Fehler in der Darstellung der Umwelt zu vermeiden.

Im August 2019 wurde das fertige Projekt an zwei verschiedenen Standorten auf Spitzbergen der lokalen Bevölkerung und den Touristen präsentiert. Hierzu konnten wir dankenswerterweise die Räumlichkeiten der Stadtbibliothek in Longyearbyen sowie des Red Bear Pubs in Barentsburg nutzen. Um das Vorhaben zu evaluieren, haben wir die Besucher an beiden Orten gebeten, ein kurzes Feedback zu verfassen. Von dieser Möglichkeit haben 94 Personen Gebrauch gemacht, von denen 25 Einwohner von Longyearbyen oder Barentsburg waren und 69 Touristen. Das Ergebnis der Eva-

luation ist überaus positiv. Ein Großteil der Besucher hebt den immersiven Charakter der Umgebung hervor und lobt die Möglichkeit, auf diese Weise in die Vergangenheit zu reisen. Neben den positiven Kommentaren gab es jedoch auch einige Kritikpunkte sowie interessante Anregungen. Einige Personen kritisierten, dass die Umgebung durch das Fehlen von Personen und Tieren steril und leblos wirkt. Auch wurde das Fehlen von interaktiven Elementen kritisiert, welche den Besuch der Umgebung gerade für Kinder interessanter machen würde. Einige der älteren lokalen Besucher merkten an, dass eine Übersetzung ins Norwegische wünschenswert sei, um so für einen breiteren Nutzerkreis zugänglich zu sein. Erfreulich war, dass sich fast sämtliche Nutzer in allen Altersklassen nach einer kurzen Einweisung intuitiv in der virtuellen Umgebung zurechtfinden. Weitere Präsentationen der virtuellen Rekonstruktion an Schulen und innerhalb von universitären Lehrveranstaltungen konnten aufgrund der Coronapandemie in den Jahren 2020 und 2021 nicht realisiert werden.

#### 5 Nachhaltige Bereitstellung der Daten

Um eine langfristige Nutzung der 3D-Daten zu garantieren, ist eine sorgfältige Beschreibung mit Metadaten sowie die Auswahl offener und standardisierter Datenformaten unerlässlich. Wir haben uns entschieden, den vom englischen Archaeology Data Service (ADS) veröffentlichten Richtlinien der guten Praxis zu folgen, die unsere Anforderungen voll-



ständig abdecken (Archaeology Data Service, 2016; Niven und Richards, 2017). Dies gilt insbesondere für das äußerst detaillierte Metadatenschema, das eine sinnvolle Beschreibung der Daten in technischer und in domänenspezifischer Hinsicht ermöglicht. Die mittels proprietärer Software generierten Modelle werden in standardisierte OBJ- und PNG-Dateien gespeichert, um die langfristige Nutzbarkeit in den gängigen 3D-Softwareumgebungen zu garantieren. Auf diese Weise entstand ein vollständiges 3D-Inventar von Advent City, das sowohl die vor Ort dokumentierten Befunde als auch die auf Basis dieser modellierten Rekonstruktionen enthält.

Als deutlich problematischer erweist sich die nachhaltige Bereitstellung der VR-Umgebung, die aufgrund der Verwendung des proprietären Unity3D nicht in ein standardisiertes Format überführt werden kann, welches dauerhaft und nachhaltig nutzbar ist. Aus diesem Grund kommt der sorgfältigen Speicherung und Bereitstellung der grundlegenden 3D-Daten sowie der grundlegenden Informationen eine besondere Bedeutung zu, da sich diese problemlos in vergleichbare Projekte einbinden lassen, die auf neuen technischen Möglichkeiten beruht.

## 6 Ausblick

Im Rahmen eines Vorhabens an der Universität Bonn werden 3D-Umgebungen entwickelt, die Studierenden die Möglichkeit geben soll, schwer erreichbare Orte virtuell zu besuchen, um so ein Grundverständnis für den Raum und das Verhältnis von Raum und Objekt zu entwickeln. Die Erfahrungen des Advent-City-Projekts fließen in das Vorhaben ein und haben grundsätzliche technische und gestalterische Entscheidungen maßgeblich beeinflusst. Es ist geplant, die 3D-Modelle aus Advent-City in diesem Zusammenhang noch einmal in eine neue und performantere Umgebung zu transformieren und einem vollständigen Redesign auf Basis von Unreal Engine zu unterziehen.

Zudem sollen die nun als Text präsentierten Informationen in gesprochener Sprache präsentiert werden, um das Lesen in der virtuellen Umgebung weitestgehend zu vermeiden. Dies lässt sich leicht mehrsprachig realisieren und angedacht sind neben einer deutschsprachigen Version eine Übersetzung in das Englische und Norwegische. Sämtliche Texte sollen zudem als Untertitel eingeblendet werden, um die Umgebung auch gehörlosen und gehörbeeinträchtigten Besuchern zugänglich zu machen.

In einer Expedition im August 2022 soll darüber hinaus eine möglichst umfangreiche Sammlung an Modellen von Vegetation, Böden, Felsen und orts- und zeittypischen Baumaterialien und Gerätschaften aufgenommen werden, um eine naturalistischere Gestaltung der VR-Umgebung zu ermöglichen. Diese sogenannten Assets sollen anderen vergleichbaren Vorhaben unter einer freien Lizenz zur Verfügung gestellt werden. Für die VR-Umgebung selbst werden zurzeit an der

Universität Bonn Möglichkeiten evaluiert, wie sich derartige virtuelle Welten als Open Educational Ressource für Schulen und Universitäten nachhaltig zur Verfügung stellen lassen.

**Codeverfügbarkeit.** Da sämtliche Schritte der Generierung der 3D-Welt innerhalb des graphischen Interfaces der Game Engine durchgeführt wurden, steht kein Code zur Verfügung.

**Datenverfügbarkeit.** Für die Speicherung und die Bereitstellung von 3D-Daten existieren bislang keine etablierten Standards. Die hier vorgestellten Datensätze werden zurzeit in einem Pilotprojekt an der Universität Bonn in das sich gerade in Entwicklung befindliche Forschungsdatenrepositorium eingespielt und anschließend unter einer freien Lizenz bereitgestellt.

**Autorenmitwirkung.** ML war der leitenden Wissenschaftler des Projekts und war für die Konzeption der 3D-Welt sowie die Datenaufnahme vor Ort zuständig. Die Modellierung und die Implementierung oblag PK und VR. FK war für sämtliche Schritte der historisch-archäologische Ausarbeitung des Projekts verantwortlich.

**Interessenkonflikt.** Die Autor\*innen erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht.

**Haftungsausschluss.** Anmerkung des Verlags: Copernicus Publications bleibt in Bezug auf gerichtliche Ansprüche in veröffentlichten Karten und institutionellen Zugehörigkeiten neutral.

**Finanzierung.** Die Arbeit wurde durch den Svalbard Environmental Protection Fund gefördert.

**Begutachtung.** This paper was edited by Bernhard Diekmann and reviewed by Ursula Rack and one anonymous referee.

## Literatur

- Archaeology Data Service: Guides to Good Practice, Archaeology Data Service, [http://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/3d\\_Toc](http://guides.archaeologydataservice.ac.uk/g2gp/3d_Toc) (letzter Zugriff: 19. September 2018), 2016.
- Barr, S.: The effects of climate change on cultural heritage in the polar regions, in: Heritage at Risk: ICOMOS world report 2006–2007 on monuments and sites in danger = Patrimoine en Péril = Patrimonio en Peligro, Herausgeber: Petzet, M. und Ziesemer, J., Reinhold E, Altenburg, Thür, 203–205, ISBN 9783937940472, 2008.
- Bekele, M. K., Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E. S., und Gain, J.: A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage, *J. Comput. Cult. Herit.*, 11, 7, 1–36, <https://doi.org/10.1145/3145534>, 2018.

- Camporesi, C. und Kallmann, M.: A framework for immersive VR and full-body avatar interaction, in: 2013 IEEE virtual reality (VR 2013): Lake Buena Vista, [Orlando], Florida, USA, 18 [i.e. 16], 20 March 2013, [including papers from the 2nd International Workshop on Ambient Information Technologies (AMBIT 2013)], Lake Buena Vista, FL, 18–20. März 2013, 79–80, ISBN 978-1-4673-4796-9, 2013.
- Caserman, P., Garcia-Agundez, A., Gámez Zerban, A., und Göbel, S.: Cybersickness in current-generation virtual reality head-mounted displays: systematic review and outlook, *Virtual Reality*, 25, 1153–1170, <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00513-6>, 2021.
- Cassidy, B., Sim, G., Robinson, D. W., und Gandy, D.: A Virtual Reality Platform for Analyzing Remote Archaeological Sites, *Interact. Comput.*, 31, 167–176, <https://doi.org/10.1093/iwc/iwz011>, 2019.
- Dawson, P. und Levy, R.: From Science to Survival: Using Virtual Exhibits to Communicate the Significance of Polar Heritage Sites in the Canadian Arctic, *Open Archaeology*, 2, 209–231, <https://doi.org/10.1515/opar-2016-0016>, 2016.
- Dawson, P. C., Bertulli, M. M., Levy, R., Tucker, C., Dick, L., und Cousins, P. L.: Application of 3D Laser Scanning to the Preservation of Fort Conger, a Historic Polar Research Base on Northern Ellesmere Island, Arctic Canada, *Arctic*, 66, 147–158, <https://doi.org/10.14430/arctic4286>, 2013.
- de Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., de Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., de Maeyer, W., Deconynck, J., Herremans, D., Laloo, P., van Meirvenne, M., und de Clercq, W.: Towards a Three-dimensional Cost-effective Registration of the Archaeological Heritage, *J. Archaeol. Sci.*, 40, 1108–1121, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.040>, 2013.
- Douglass, M., Lin, S., und Chodoronek, M.: The Application of 3D Photogrammetry for In-Field Documentation of Archaeological Features, *Adv. Archaeol. Pract.*, 3, 136–152, <https://doi.org/10.7183/2326-3768.3.2.136>, 2015.
- Garner, T. A.: *Echoes of Other Worlds: Sound in Virtual Reality and Video Games, Past, Present and Future*, Palgrave Studies in Sound, Palgrave Macmillan, Springer, New York, Secaucus, ISBN 9783319657073, 2017.
- Goodwin, G.: *Modeling Sound in Ancient Maya Cities: Moving Towards a Synesthetic Experience using GIS & 3D Simulation*, Master Thesis, Department of Anthropology, University of Nebraska, Lincoln, ISBN 9783319657073, 2018.
- Heeb, N.: Strategien zur Vermittlung von Fakt, Hypothese und Fiktion in der digitalen Architektur-Rekonstruktion, in: *Der Modelle Tugend 2.0*, Herausgeber: Kuroczyński, P., Pfarr-Harfst, M., und Münster, S., University Library Heidelberg, 226–254, ISBN 9783947449682, <https://doi.org/10.11588/ARTHISTORICUM.515.C7570>, 2019.
- Kersten, T., Mechelke, K., und Maziull, L.: 3D Model of Al Zubarah Fortress in Qatar – Terrestrial Laser Scanning vs. Dense Image Matching, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W4, 1–8, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-1-2015>, 2015.
- Kruse, F.: Frozen Assets: British mining, exploration, and geopolitics on Spitsbergen, 1904–53, *Circumpolar Studies*, Barkhuis, Havertown, 481 S., ISBN 9789491431333, 2014.
- Kruse, F.: Britische Bergbauambitionen und Territorialansprüche auf Spitzbergen in den Jahren 1904–1927, *Polarforschung*, 86, 111–126, <https://doi.org/10.2312/polarforschung.86.2.111>, 2016.
- Kruse, F., Nobles, G. R., Jong, M. de, van Bodegom, R. M. K., van Oortmerssen, G. J. M., Kooistra, J., van den Berg, M., Küchelmann, H. C., Schepers, M., Leusink, E. H. P., Cornelder, B. A., Kruijer, J. D., und Dee, M. W.: Human–environment interactions at a short-lived Arctic mine and the long-term response of the local tundra vegetation, *Polar Record*, 57, 1–22, <https://doi.org/10.1017/S0032247420000418>, 2021.
- Lang, M. und Kluge, P.: Die Vermessungsarbeiten und der Luftbildsurvey, in: *Die Entstehung komplexer Siedlungen im Zentraloman: Archäologische Untersuchungen zur Siedlungsgeschichte von Al-Khashbah*, Herausgeber: Schmidt, C., Döpfer, S., Kluge, J., Petrella, S., Ochs, U., Kirchhoff, N., Maier, S., und Walter, M., Archaeopress Publishing, Oxford, 16–26, ISBN 9781803271002, 2021.
- Lang, M., Behrens, T., Schmidt, K., Svoboda, D., und Schmidt, C.: A Fully Integrated UAV System for Semi-automated Archaeological Prospection, in: *Keep the Revolution Going: Proceedings of the 43rd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Siena, 30. März–3. April 2015, 989–996, ISBN 9781784913380, 2016.
- Lang, M., Hussein, R., Glissmann, B., und Kluge, P.: Digital Documentation of the Saite Tombs in Saqqara, *Studies in Digital Heritage*, 4, 16–31, <https://doi.org/10.14434/sdh.v4i1.27449>, 2020.
- Levy, R. und Dawson, P.: Interactive Worlds as Educational Tools for Understanding Arctic Life, in: *Pastplay: Teaching and Learning History with Technology*, Herausgeber: Kee, K., University of Michigan Press, Ann Arbor, 66–86, <https://doi.org/10.2307/j.ctv65swr0.7>, 2014.
- Lewińska, P. und Zagórski, P.: Creating a 3D database of Svalbard’s historical sites: 3D inventory and virtual reconstruction of a mining building at Camp Asbestos, Wedel Jarlsberg Land, Svalbard, *Polar Res.*, 37, 1485416, <https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1485416>, 2018.
- Linowes, J.: *Unity 2020 virtual reality projects: Learn VR development by building immersive applications and games with Unity 2019.4 and later versions, third edn.*, Packt Publishing, Birmingham, U.K., 577 S., ISBN 9781839217333, 2020.
- Machidon, O. M., Duguleana, M., und Carrozzino, M.: Virtual humans in cultural heritage ICT applications: A review, *J. Cult. Herit.*, 33, 249–260, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.01.007>, 2018.
- Mack, K. und Ruud, R.: *Unreal Engine 4 Virtual Reality Projects*, Packt Publishing, Birmingham, England, 622 S., ISBN 9781789132878, 2019.
- Manghisi, V. M., Fiorentino, M., Gattullo, M., Boccaccio, A., Bevilacqua, V., Cascella, G. L., Dassisti, M., und Uva, A. E.: Experiencing the Sights, Smells, Sounds, and Climate of Southern Italy in VR, *IEEE Comput. Graph.*, 37, 19–25, <https://doi.org/10.1109/MCG.2017.4031064>, 2017.
- Niven, K. und Richards, J. D.: The Storage and Long-Term Preservation of 3D Data, in: *Human Remains: Another Dimension: The Application of Imaging to the Study of Human Remains*, Herausgeber: Thompson, T. und Errickson, D., Elsevier Ltd., 175–184, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804602-9.00013-8>, 2017.
- Norwegian Polar Institute: *Terrengmodell Svalbard (S0 Terrengmodell)*, Norwegian Polar Institute [data set], <https://doi.org/10.21334/npolar.2014.dce53a47>, 2014.



- Norwegian Polar Institute: S100 Topographic Raster Data for Svalbard, Norwegian Polar Institute [data set], <https://doi.org/10.21334/npolar.1990.44ca8c2a>, 1990.
- Primeau, K. E. und Witt, D. E.: Soundscapes in the past: Investigating sound at the landscape level, *J. Archaeol. Sci.*, 19, 875–885, <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.044>, 2018.
- Roura, R.: Monitoring the transformation of historic features in Antarctica and Svalbard: local processes and regional contexts, *Polar Rec.*, 46, 289–311, <https://doi.org/10.1017/S0032247409990441>, 2010.
- Saredakis, D., Szpak, A., Birkhead, B., Keage, H. A. D., Rizzo, A., und Loetscher, T.: Factors Associated With Virtual Reality Sickness in Head-Mounted Displays: A Systematic Review and Meta-Analysis, *Front. Hum. Neurosci.*, 14, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00096>, 2020.
- Verhoeven, G., Sevara, C., Karel, W., Ressler, C., Doneus, M., und Briese, C.: Undistorting the Past: New Techniques for Orthorectification of Archaeological Aerial Frame Imagery, in: Good practice in archaeological diagnostics: Non-invasive survey of complex archaeological sites, Herausgeber: Corsi, C., Springer, Cham, Heidelberg, 31–67, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-01784-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-01784-6_3), 2013.
- Zachar, J., Horňák, M., und Novaković, P. (Hrsg.): 3d Digital Recording of Archaeological, Architectural and Artistic Heritage, Znanstvena založba Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani (Ljubljana University Press, Faculty of Arts, ISBN 9789612378981, <https://doi.org/10.4312/9789612378981>), 2018.
- Zhao, Q.: A survey on virtual reality, *Sci. China Ser. F-Inf. Sci.*, 52, 348–400, <https://doi.org/10.1007/s11432-009-0066-0>, 2009.