

# 3D-Visualisierung eines kanadischen Fjords über und unter Wasser in einer immersiven Virtual Reality Applikation

Mona Lütjens, Thomas P. Kersten, Boris Dorschel und Felix Tschirschwitz

## Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt die Entwicklung einer Virtual Reality (VR) Applikation zur Visualisierung des auf der kanadischen Baffininsel befindlichen Fjords Clyde Inlet. Dafür wurde eine Methodik entwickelt, terrestrische und bathymetrische Datensätze (Geländemodelle) zu vereinigen, um den Fjord als Ganzes über und unter Wasser in seiner Ausdehnung von 160 km × 80 km darstellen zu können. Die immersive VR-Applikation bietet die Möglichkeiten, das Gelände mit oder ohne Wasseroberfläche durch drei verschiedene Fortbewegungsarten zu erkunden und zu untersuchen. Darüber hinaus können verschiedene Distanzmessungen im Geländemodell durchgeführt werden und die Geländetexturen zur besseren Veranschaulichung des Terrains verändert werden. Durch die rasante technologische Entwicklung hat sich Virtual Reality als neue Methode für immersive 3D-Visualisierungen in vielen Anwendungen in der Wissenschaft, in der Industrie und in der Wirtschaft etabliert. Für dieses Projektbeispiel wurde im Rahmen einer Befragung von Testpersonen aus vier verschiedenen Berufsgruppen das Potenzial von VR analysiert und es wurden mögliche Anwendungen für diese VR-Applikation vorgeschlagen.

## Summary

*This paper describes the development of a Virtual Reality (VR) application to visualise the fjord Clyde Inlet on Baffin Island, Canada. For this purpose, a methodology was developed to combine terrestrial and bathymetric data sets (terrain models) to represent the fjord as an entire area in its 160 km × 80 km dimensions. The immersive VR application offers the possibility to explore the terrain with or without water surface by three different modes of locomotion. In addition, various distance measurements can be carried out in the terrain model and the terrain textures can be changed to better illustrate the terrain representation. Due to the rapid technological development Virtual Reality has established itself as a new method for immersive 3D visualisation in many applications in science, industry and economy. For this project example, the potential of VR was analysed in a survey of test persons from four different professional groups and possible applications for this VR application are suggested.*

**Schlüsselwörter:** Bathymetrie, Digitales Geländemodell (DGM), Game Engine, Virtual Reality (VR)

## 1 Einleitung

Schon in der frühen Menschheitsgeschichte wurden Informationen der Erdoberfläche in Karten dargestellt. Im Zuge des technologischen Fortschritts konnten Inhalte geografisch immer genauer abgebildet werden. Karten werden heute nicht nur für die Navigation gebraucht, sondern dienen auch als Werkzeuge, um räumliche Beziehungen besser verstehen zu können. Allerdings führen derartige Fragestellungen mit 3D-Bezug beim Nutzer zu einer kognitiven Herausforderung, wenn sie auf zweidimensionalen Karten abgebildet werden. Deshalb werden heutzutage viele Hilfsmittel angeboten, die den Verlust der dritten Dimension kompensieren sollen. Zu ihnen zählen u.a. Geländeschummerungstechniken (Imhof 1965), die das Relief besser hervortreten lassen. Eine andere Möglichkeit bietet die Visualisierung von 3D-Modellen am Computerbildschirm, die durch Drehen und Wenden einen dreidimensionalen Eindruck erwecken (Zanini 1998).

Eine andere Lösung ist die Darstellung von 3D-Objekten und Modellen in Virtual Reality (VR). Im Gegensatz zur herkömmlichen Visualisierung von virtuellen 3D-Modellen taucht der Nutzer bei einer VR-Anwendung komplett in eine computergenerierte Umgebung ein und kann Geoinformationen viel intuitiver und realitätsnaher erfassen. Kopf-, Arm- und Gehbewegungen in der realen Welt werden auf entsprechende Bewegungen im virtuellen Raum übertragen, sodass der Nutzer komplett von der eigenen Wirklichkeit entkoppelt ist, ohne seine derzeitige reale Position zu verlassen. Virtual Reality (VR) ist definiert als »eine realistische und immersive Simulation einer dreidimensionalen Umgebung, die mit interaktiver Soft- und Hardware erstellt und durch die Bewegung des Körpers erfahren oder kontrolliert wird« (Random House Unabridged Dictionary 2018). Die technische Machbarkeit wurde vom VR-Pionier Jaron Lanier schon relativ früh demonstriert. Lanier (1992) beschreibt die Ausrüstung und die technischen Anforderungen, die notwendig sind, um die Illusion zu erreichen, in einer virtuellen Welt zu sein. Der Begriff wurde allerdings vom Autor Damien Broderick in seinem 1982 erschienenen Science-Fiction-Roman »The Judas Mandala« erstmals eingeführt. Weitere neuere Definitionen sind in der Literatur von Dörner et al. (2014), Freina und Ott (2015) und Portman et al. (2015) verfügbar, die VR meist in einem weiteren Sinne beschreiben, obwohl einige explizit auch nicht-interaktive Inhalte verwenden.

Aufgrund der jüngsten Fortschritte in Hard- und Softwaretechnologie ist VR allgegenwärtig und findet nicht

nur in der Spieleindustrie, sondern auch in immer mehr professionellen Bereichen Anwendung. So wird VR bereits u. a. erfolgreich in der virtuellen Chirurgie, der virtuellen Therapie sowie in der Flug- und Fahrzeugsimulation angewandt (Gutiérrez et al. 2008). In der HafenCity Universität Hamburg wurden bereits mehrere VR-Projekte realisiert. Das Alt-Segeberger Bürgerhaus wurde als eines der ersten virtuellen Museen für einen immersiven Besuch mit der HTC Vive als Head Mounted Display (HMD) vorgestellt (Kersten et al. 2017b). Zwei historische Städte (einschließlich der Landschaft um diese Städte herum) wurden in der Vergangenheit als VR-Anwendungen für einen virtuellen Rundgang entwickelt: Duisburg im Jahr 1566 (Tschirschitz et al. 2019) und Segeberg im Jahr 1600 (Kersten et al. 2018a). Zwei religiöse Kulturdenkmäler stehen als VR-Anwendungen zur Verfügung: die Selimiye Moschee in Edirne, Türkei (Kersten et al. 2017a) und das Holzmodell des Salomonischen Tempels (Kersten et al. 2018b). Das Potenzial von VR für die Darstellung von sehr großen Geländedaten wird in diesem Beitrag anhand des kanadischen Fjords Clyde Inlet vorgestellt. Das Projekt wurde 2017/2018 in einer Zusammenarbeit zwischen dem Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und der HafenCity Universität Hamburg bearbeitet.

## 2 Untersuchungsgebiet und Datensätze

Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf der östlichen Seite der Baffininsel im arktischen Kanada und misst  $160 \times 80 \text{ km}^2$ . Mit  $-847 \text{ m}$  unter dem Meeresspiegel gehört der Bereich um die Schelfkante zu den tiefsten Stellen des Gebiets. Die höchsten Erhebungen erreichen knapp  $1900 \text{ m}$  über dem Meeresspiegel. Zu ihnen zählen die schneedeckten Berggipfel des Hochplateaus der Baffininsel. Wesentlicher Bestandteil des Untersuchungsgebiets ist das Fjordsystem Clyde Inlet, welches sich von der Baffin Bay südwestlich ca.  $120 \text{ km}$  ins Landesinnere

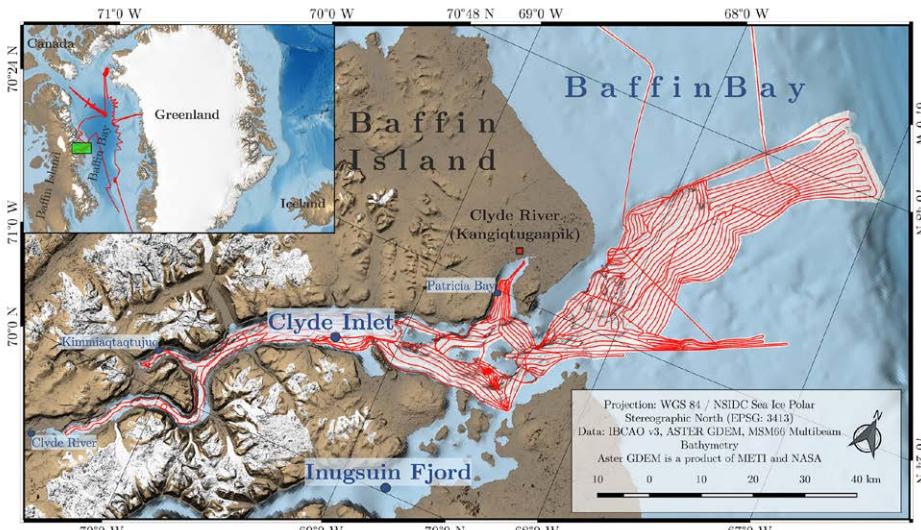


Abb. 1: Untersuchungsgebiet Clyde Inlet mit Fahrtlinien (rot) der Expedition MSM66

in Richtung Barnes Ice Cap zieht. Der Clyde Inlet liegt in den Baffin Mountains und ist somit Teil der Arktischen Kordilleren – eine Bergkette entlang der nordöstlichen Küste Nordamerikas (Abb. 1).

Für die Erzeugung eines kohärenten digitalen Gelände-modells (DGM) des gesamten Gebiets wurden folgende Datensätze implementiert:

- Bathymetrische Daten von der Expedition MSM66 mit einer Auflösung von  $5 \text{ m}$  (2017)
- Bathymetrische Daten von International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) mit einer Auflösung von  $500 \text{ m}$  (Jakobsson et al. 2012)
- Terrestrische Daten des ArcticDEM mit einer Auflösung von  $2 \text{ m}$  und  $5 \text{ m}$  (Polar Geospatial Center and Regents of the University of Minnesota 2017)
- Terrestrische Daten des CanadianDEM mit einer Auflösung von etwa  $20 \text{ m}$  (Government of Canada, Natural Resources Canada 2016)

## 3 Methodik

Die für diese Studie verwendeten bathymetrischen Daten wurden während der Forschungsreise MSM66 mit dem deutschen Forschungsschiff Maria S. Merian im Jahr 2017 gesammelt. Die Expedition fand unter der Leitung des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und des Zentrums für Marine Umweltwissenschaften (MARUM) in Bremen statt. Mit dem am Rumpf des Schiffs fest eingebauten Fächerecholot mit einer Aufnahmefrequenz von  $12 \text{ kHz}$  wurden bathymetrische Daten auf einer Streckenlänge von  $2760 \text{ km}$  in 163 Messstunden erfasst. Durch einen breiten Öffnungswinkel von  $130^\circ$  und eine hohe Pingrate konnte der gesamte Fjord bis auf die Randbereiche flächendeckend vermessen werden. Gemäß der technischen Spezifikation des Fächerecholots (Kongsberg Maritime AS 2011) beträgt die Genauigkeit in mittlerer Wassertiefe von  $280 \text{ m}$  bestenfalls  $0,6 \text{ m}$  im Nadirbereich

und  $1,7 \text{ m}$  in den äußeren Messstrahlen (Beams). Diese Genauigkeit bezieht allerdings nicht die Messgenauigkeit weiterer Sensoren wie etwa GNSS, inertiale Messeinheit (IMU) und Tachymeter zur Positionsbestimmung der Sensoren im Schiffskoordinaten-system ein. Für eine Abschätzung der absoluten Genauigkeit muss das Gesamtsystem durch Fehlerfortpflanzung betrachtet werden, welches jedoch hier nicht durchgeführt wurde. Während der Messung wurden zudem elf gut verteilte Wasserschallprofile genommen, um den Schallverlauf durch die Wassersäule korrigie-

ren zu können. Die erfassten Punktdaten wurden in der Prozessierung von größeren Ausreißern, von Navigations-, Lage- und Refraktionsfehlern entlang der Schelfkante bereinigt. Aus den nun korrigierten Daten wurde ein digitales Geländemodell für die Unterwassertopographie mit einer Rasterweite von  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  für die weitere Verarbeitung berechnet.

Im Gegensatz zu den bathymetrischen Daten kann das Terrain über Wasser sehr effizient und hochauflösend aus Luftbild- oder Satellitenbilddaten vermessen werden. Während mit digitalen Luftbildkameras eine Punktdichte von 5 cm bis 10 cm erreicht werden kann, weisen optische Sensoren kommerzieller Satelliten eine Punktdichte von maximal 0,5 m bis 1 m auf. Die während der Expedition

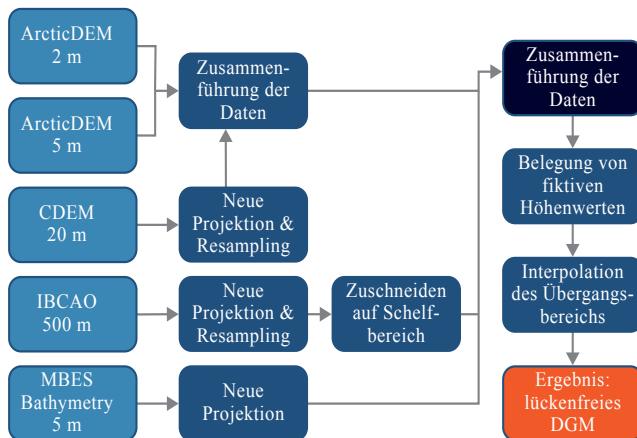


Abb. 2: Workflow zur Entwicklung des digitalen Geländemodells aus verschiedenen Datensätzen

MSM66 gemessenen bathymetrischen Daten besitzen in mittlerer Wassertiefe von 280 m eine Punktdichte von ca. 3 m. Die terrestrischen Datensätze wurden zu einem einheitlichen Geländemodell zusammengeführt. Dabei diente das ArcticDEM mit einer Auflösung von 5 m als Basismodell. Da dieses jedoch einige Lücken aufwies, wurden diese zunächst mit dem ArcticDEM (Auflösung 2 m) und zum Schluss mit dem CanadianDEM gefüllt. Damit alle Datensätze zueinander passten, wurden die Projektion und die Rasterauflösung der jeweiligen Datensätze so angepasst, dass sie den Spezifikationen des ArcticDEMs entsprachen. Eine Illustration des Workflows zur Entwicklung des digitalen Geländemodells ist in Abb. 2 gegeben.

Um die terrestrischen und bathymetrischen Geländemodelle nun vereinigen zu können, musste zunächst der Übergang zwischen Land und Wasser bearbeitet werden. Da die bathymetrischen Daten aufgrund ihrer Aufnahme vom Schiff nicht bis zur Wasseroberfläche und die aus Bilddaten generierten Geländemodelle nur bis zur Wasserkante reichen, bleibt ein kleiner Übergangsbereich ohne Geländedaten. Daher musste dieser Bereich aus den angrenzenden Daten der Geländemodelle interpoliert werden. Der Übergangsbereich (weiße Fläche in Abb. 3) repräsentiert im Fjord jeweils eine Fläche von 30 m bis 1000 m, in deren Gebiet die Daten der Geländemodelle linear interpoliert wurden. Um jedoch zu verhindern,

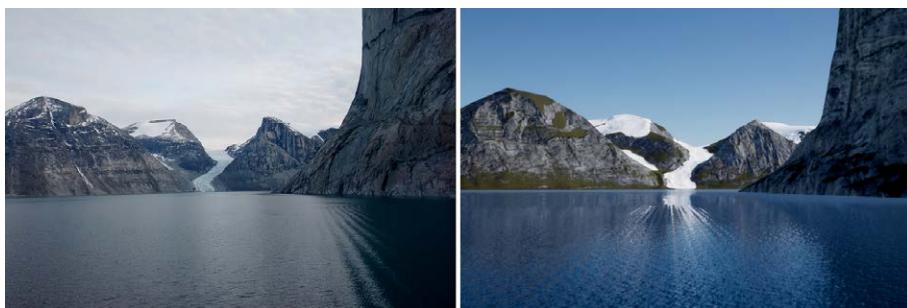


Abb. 3: Das digitale Geländemodell des Untersuchungsgebietes als Geländeschummerung mit noch nicht interpoliertem Übergangsbereich (weiß) und Geländeabschnitten, die fiktive Höhenwerte besitzen (blau).

dass sich Inseln im Fjord mit dem Festland verbinden und um zu gewährleisten, dass sich die Küstenlinie durch die Interpolation nicht zu weit in Richtung der bathymetrischen Daten verschiebt, wurden an einigen Stellen Rasterzellen mit einem negativen Höhenwert belegt (blaue Fläche in Abb. 3). Die Region von der Fjordmündung bis zur Schelfkante ist nur zu einem Viertel von den Fächerecholotdaten erfasst, sodass ergänzend Gebiete ohne Daten mit bathymetrischen IBCAO-Daten belegt wurden. Diese konnten jedoch, aufgrund ihrer geringen Auflösung von 500 m, erst ab einer Entfernung von 1000 m hinter der Küstenlinie verwendet werden. Am Ende wurden alle Datensätze zu einem gesamten digitalen Geländemodell zusammengeführt.

Das berechnete DGM konnte nun in die Game Engine Unreal Engine 4 (UE4) als gekachelter Datensatz importiert werden. Die Unreal Engine 4 wurde gegenüber anderen Game Engines (z.B. Unity) ausgewählt, weil die visuelle Programmiersprache (mit Blueprints) Anwenden mit geringen Programmierkenntnissen einen leichteren Einstieg in die Entwicklungsumgebung ermöglicht. Insgesamt bestand das Modell aus 128 Kacheln mit jeweils  $2017 \times 2017$  Pixel und 8 Millionen Dreiecken, was für eine Echtzeit-Visualisierung in VR eine Herausforderung darstellt. Da die Echtzeit-Visualisierung der gesamten 128 Kacheln (mit einem Datenvolumen von 1 GB) mit einer Auflösung von 5 m eine zu große Rechenleistung beanspruchen würde, wurde das Werkzeug Level Streaming (Epic Games Inc. 2019) eingesetzt. Dieses Tool lädt immer nur die an der Nutzerposition nächstgelegenen Kacheln in den Arbeitsspeicher. Die übrigen Kacheln werden aber dennoch mit einer sehr starken Reduktion der Dreiecksanzahl von 99,97 % angezeigt, sodass die gesamte Landschaft immer zu sehen und eine angemessene Rechenleistung zur ruckfreien Darstellung des Geländes in Echtzeit gewährleistet sind.

Um die virtuelle Umgebung realistischer aussehen zu lassen, wurden natürliche Effekte wie sich bewegendes Wasser, Sonnenstrahlen, Schatten, Blumen, Gräser, Wind und Möwen in die VR-Applikation programmiert. In Abb. 4 ist die Qualität der virtuell generierten Landschaft (rechts) im Vergleich zur echten Fjordumgebung (Foto links) dargestellt.



**Abb. 4:**  
Vergleich der echten Fjordumgebung im Foto (links) mit der virtuell generierten Umgebung (rechts)

Die Farbgebung der Landschaft wurde so erstellt, dass die verschiedenen geografischen Merkmale und Datensätze unterschiedliche Texturen besitzen. Auch kann der Nutzer zwischen verschiedenen Texturen je nach Anwendung und Fragestellung wählen (siehe Kap. 4). Um eine korrekte Platzierung der Texturen zu garantieren, wurde eine Splat Map entwickelt. Eine Splat Map enthält die Umrisse der jeweiligen Gebiete und weist durch eine entsprechende Farbkodierung jedem Bereich die da-

zugehörige Textur zu. Insgesamt gibt es für diese Anwendung fünf verschiedene Gebiete (siehe Abb. 5). Das terrestrische Gelände kann in einer natürlichen Färbung mit Gletschern (Abb. 6) oder in Grau dargestellt werden. Der mit dem Schiff vermessene bathymetrische Datensatz kann entweder in Grau (Abb. 7) nach einer Sedimentklassifizierung oder in einer auf die Wassertiefe bezogenen Regenbogenfarbskala angezeigt werden (Abb. 8). Um diesen Datensatz von den interpolierten und den



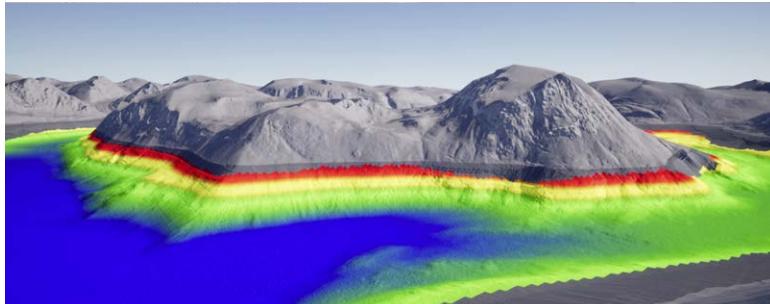
**Abb. 5:**  
Splat Map mit den fünf Bereichen: Bathymetrie des MSM66-Datensatzes (blau), Bathymetrie des IBCAO-Datensatzes (lila), interpolierter Übergangsbereich (orange), Gletscherdaten vom RGI-Datensatz (weinrot) (RGI Consortium 2017) und terrestrischer Bereich (türkis)



**Abb. 6:**  
Natürliche Texturen des Geländes mit Spiegelung auf der Wasseroberfläche in der VR-Applikation (erzeugt durch Rendering in der Game Engine)



**Abb. 7:**  
Graue Texturen der Topographie ohne Wasseroberfläche in der VR-Applikation mit Darstellung des Übergangsbereiches zwischen Bathymetrie-Daten und digitalem Gelände-modell (dunkelgrau)



**Abb. 8:**  
Graue Textur des Geländes über Wasser und Regenbogenfärbung für die Topographie unter Wasser in der VR-Applikation



Abb. 9:  
Höhendifferenz- und Neigungs-  
messungen zwischen zwei Punkten  
in VR (links) und Höhen- und  
Distanzmessungen in VR (rechts)

IBCAO-Daten zu differenzieren, wurden die letzteren in Dunkelgrau eingefärbt.

Die Navigation in der Virtual Reality Anwendung erfolgt über drei Fortbewegungsmodi: Fliegen, Springen und Teleportieren zu festen Wegpunkten. Die Anwendung enthält zudem die Möglichkeit, die Höhe über den Meeresspiegel zu erfassen und die Distanz zum Nutzer zu messen. Des Weiteren können Höhendifferenzen und Neigungswinkel zwischen zwei Punkten mit Hilfe der Controller bestimmt werden (Abb. 9). Diese Informationen sind für viele andere Fachdisziplinen (z.B. Geologen, Archäologen und Bauingenieure) sehr relevant, um Distanzen und die Räumlichkeit vorstellbar machen zu können.

#### 4 Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen

Die Benutzerfreundlichkeit und Einsatzmöglichkeit der VR-Anwendung wurde im Rahmen einer Kurzstudie mit zehn Repräsentanten aus den Berufsgruppen Hydrographie, Geologie, Archäologie und Bauingenieurswesen erfasst. Jeder Teilnehmer konnte die Applikation für etwa eine halbe Stunde nutzen. Der Fragebogen und die Auswertung sind umfassend in Lütjens (2018) dokumentiert.

Die Handhabung und Benutzerfreundlichkeit wurden von den Probanden als überaus angenehm empfunden. Alle Befragten fanden die Anwendung einfach zu nutzen und niemand fühlte sich in der virtuellen Welt unwohl. Zudem erhielten alle Nutzer einen verbesserten Eindruck der Landschaft im Gegensatz zu einer einfachen 2D-Präsentation. Welche Informationen über die Landschaft im Detail für die Nutzergruppen interessant sind, ist in Lütjens (2018) beschrieben. Die Funktionalitäten und Messwerkzeuge erwiesen sich außerdem als sehr nützlich, um notwendige Informationen, z.B. über die Geländemorphologie, aus dem Terrain abzugreifen und um die Dimensionen der Landschaft besser zu erfassen und zu begreifen.

In der Hydrographie könnte VR vor allem für die Qualitätsanalyse hilfreich sein, da fehlerhafte Ausreißer in der 3D-Darstellung deutlich sichtbar werden, aber zurzeit in der Applikation nicht eliminiert werden können. Außerdem könnte VR sehr nützlich für die Interpretation des Geländes sein, vor allem im Bezug auf Backscatteranalysen, die Hinweise zur Sedimentbeschaffenheit wiedergeben (Lütjens 2018). Diese Informationen können sehr leicht über das Gelände drapiert werden und so mit der Neigung des Geländes korreliert werden (siehe auch Abb. 8). Für Geologen bietet VR den Vorteil, Geländeneigungen und Dimensionen morphologischer Landformen intuitiver zu erfassen als auf einer zweidimensionalen Karte. Bauingenieure könnten VR für verschiedene Konstruktionsentwürfe nutzen, um sich geplante Bauvorhaben auch im realen Umfeld virtuell anzeigen zu lassen. Dies könnte den Entscheidungsprozess signifikant unterstützen. Für Archäologen bietet VR ein kostengünstiges Werkzeug, um Orte oder Gebäude, die nicht mehr existieren oder schwer zugänglich sind, zu rekonstruieren, zu visualisieren und zu analysieren. Eine virtuelle immersive Rekonstruktion hat nicht nur finanzielle Vorteile, sondern ermöglicht dem Anwender z.B. die Analyse von virtuellen Sichtachsen auch unter verschiedenen Wetterbedingungen.

Ein großer Nachteil der verwendeten Game Engine gegenüber traditioneller GIS-Software sind die sehr eingeschränkten Import- und Exportmöglichkeiten von Daten. Rasterdatensätze haben keinen räumlichen Bezug in der Game Engine, d.h. Koordinatentransformationen müssten zusätzlich programmiert werden. Die hier verwendete einfache Lösung, Datensätze korrekt zu verknüpfen, erfolgte durch eine Skalierung und Rotation nach der Messung von Strecken und Richtungen. In der Game Engine UE4 sind das Programmieren der Interaktionen, das Setzen der Teleportationspunkte und die Berechnung des Level-of-Detail für die Geländedaten sehr zeitaufwendig.

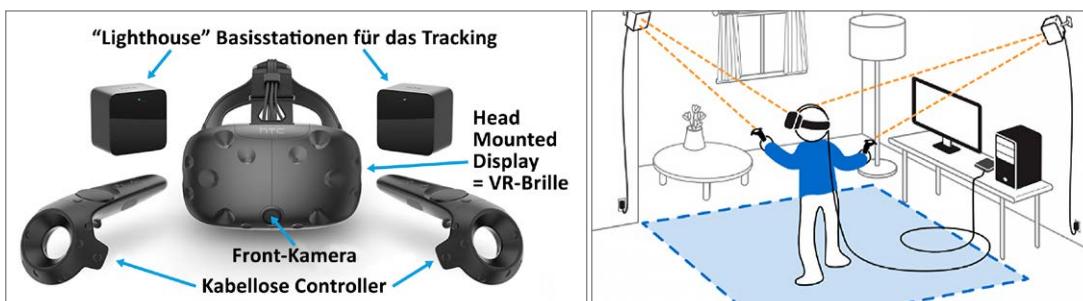


Abb. 10:  
Komponenten  
(links) und sche-  
matischer Auf-  
bau (rechts) des  
VR-Systems HTC  
Vive (HTC Corpo-  
ration 2018)

Der Arbeitsaufwand für dieses Projekt betrug ca. drei Monate. Vor dem Einsatz des VR-Systems sind der Aufbau des Trackingsystems Lighthouse mit den Basisstationen und eine Kalibrierung des Interaktionsraums mit den Controllern erforderlich (Abb. 10), was ungefähr einem geringen Zeitaufwand von 15 Minuten entspricht.

## 5 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag konnte gezeigt werden, dass große, hochauflösende und flächendeckende Geländedatensätze durch Kachelung und mit Hilfe des Level Streamings in Virtual Reality visualisiert werden können. Dafür wurde die Fusion der Geländedaten über und unter Wasser durch lineare Interpolation erreicht. Die VR-Anwendung wurde als insgesamt benutzerfreundlich wahrgenommen und alle Testpersonen attestierten eine bessere Vorstellung von der Geländetopographie gegenüber einer zweidimensionalen Darstellung. Durch die Testpersonen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen konnte die Funktionalität, das Verständnis der Interaktionen und die Einsatzmöglichkeiten der VR-Applikation überprüft und bestätigt werden. Allerdings bietet die Game Engine keine optimalen Datenimport- und -exportmöglichkeiten und es fehlt der räumliche Bezug zu den verschiedenen Datensätzen über entsprechende Koordinatensysteme. Dennoch konnte das Potenzial von VR für die verschiedenen getesteten Berufsgruppen im Rahmen dieser entwickelten Applikation demonstriert werden. Mit dieser VR-Applikation sind Anwendungen in der Hydrographie, Geologie, Geomorphologie, Landschaftsvisualisierung, Archäologie u. a. vorstellbar. Die Entwicklung von Game Engines für die Visualisierung von Geodaten wird sicherlich weiter voranschreiten, sodass VR zukünftig auch zunehmend für hydrographische und weitere Anwendungen mit eindeutig räumlichem Bezug eingesetzt wird.

## Literatur

- Epic Games Inc. (2019): Level Streaming. <https://docs.unrealengine.com/en-us/Engine/LevelStreaming>, letzter Zugriff 26.01.2019.
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P., Jung, B. (2014): Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität. Springer-Verlag.
- Freina, L., Ott, M. (2015): A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives. *eLearning and Software for Education*, (1), S. 133–141.
- Government of Canada, Natural Resources Canada (2016): Canadian Digital Elevation Model Product Specifications. [http://ftp.geografis.gc.ca/pub/nrcan\\_rncan/elevation/cdem\\_mnec/doc/CDEM\\_product\\_specs.pdf](http://ftp.geografis.gc.ca/pub/nrcan_rncan/elevation/cdem_mnec/doc/CDEM_product_specs.pdf), letzter Zugriff 05.12.2018.
- Gutiérrez, M. A., Vexo, F., Thalmann, D. (2008): Stepping into Virtual Reality. London: Springer-Verlag.
- HTC Corporation (2018): Vive PRE User Guide. [www.htc.com/managed-assets/shared/desktop/vive/Vive\\_PRE\\_User\\_Guide.pdf](http://www.htc.com/managed-assets/shared/desktop/vive/Vive_PRE_User_Guide.pdf), letzter Zugriff 06.12.2018.
- Imhof, E. (1965): Kartographische Geländedarstellung. Reprint 2010, Walter de Gruyter, S. 425.
- Jakobsson, M., Mayer, L., Coakley, B., Dowdeswell, J.A., Forbes, S., Fridman, B., Hodnesdal, H., Noormets, R., Pedersen, R., Rebesco, M., Schenke, H. W., Zarayskaya, Y., Accettella, D., Armstrong, A., Anderson, R. M., Bienhoff, P., Camerlenghi, A., Church, I., Edwards, M., Gardner, J. V., Hall, J. K., Hell, B., Hestvik, O., Kristoffersen, Y., Marcussen, C., Mohammad, R., Mosher, D., Nghiem, S. V., Pedrosa, M. T., Travaglini, P. G., Weatherall, P. (2012): International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0; Geophysical Research Letters, Vol. 39, L12609. DOI: 10.1029/2012GL052219.
- Kersten, T., Büyüksalih, G., Tschirschitz, F., Kan, T., Deggim, S., Kaya, Y., Baskaraca, A. P. (2017a): The Selimiye Mosque of Edirne, Turkey – An Immersive and Interactive Virtual Reality Experience using HTC Vive. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(5/W1), S. 403–409.
- Kersten, T., Tschirschitz, F., Deggim, S. (2017b): Development of a Virtual Museum including a 4D Presentation of Building History in Virtual Reality. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W3), S. 361–367.
- Kersten, T., Deggim, S., Tschirschitz, F., Lindstaedt, M., Hinrichsen, N. (2018a): Segeberg 1600 – Eine Stadtrekonstruktion in Virtual Reality. *Kartographische Nachrichten*, 68(4), S. 183–191.
- Kersten, Th., Tschirschitz, F., Lindstaedt, M., Deggim, S. (2018b): The historic wooden model of Solomon's Temple: 3D recording, modelling and immersive virtual reality visualisation. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, Special Issue: Digital workflows for the conservation and sustainability of historic places*, 8(4), S. 448–464.
- Kongsberg Maritime AS (2011): Product description EM 122 Multibeam Echo Sounder. [http://epic.awi.de/45364/1/Kongsberg\\_302440ae\\_em122\\_product\\_description.pdf](http://epic.awi.de/45364/1/Kongsberg_302440ae_em122_product_description.pdf), letzter Zugriff 26.01.2019.
- Lanier, J. (1992): Virtual reality: The promise of the future. *Interactive Learning International*, 8(4), S. 275–79.
- Lütjens, M. (2018): Immersive Virtual Reality Visualisation of the Arctic Clyde Inlet on Baffin Island (Canada) by Combining Bathymetric and Terrestrial Terrain Data. <http://edoc.sub.uni-hamburg.de/hcu/volltexte/2018/436>, letzter Zugriff 26.01.2019.
- Polar Geospatial Center and Regents of the University of Minnesota (2017): Introduction to ArcticDEM. [www.pgc.umn.edu/guides/arcticdem/introduction-to-arcticdem](http://www.pgc.umn.edu/guides/arcticdem/introduction-to-arcticdem), letzter Zugriff 05.12.2018.
- Portman, M. E., Natapov, A., Fisher-Gewirtzman, D. (2015): To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, S. 376–384.
- Random House Unabridged Dictionary (2018): Virtual Reality. [www.dictionary.com/browse/virtual-reality](http://www.dictionary.com/browse/virtual-reality), letzter Zugriff 05.12.2018.
- RGI Consortium (2017): Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space; Digital Media, Colorado, USA. DOI: 10.7265/N5-RGI-60.
- Tschirschitz, F., Richerzhagen, C., Przybilla, H.-J., Kersten, T. (2019): Duisburg: Transferring a Historic 3D City Model from Google Earth into a Virtual Reality Application. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG) – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 87(1), S. 1–10.
- Zanini, M. (1998): Dreidimensionale synthetische Landschaften: wissensbasierte dreidimensionale Rekonstruktion und Visualisierung raumbezogener Informationen. Diss. Techn. Wiss. ETH Zürich, Nr. 12893. DOI: 10.3929/ethz-a-001997933.

## Kontakt

Mona Lütjens | Thomas P. Kersten | Felix Tschirschitz  
HafenCity Universität Hamburg, Überseeallee 16, 20457 Hamburg  
mona.luetjens@hcu-hamburg.de | thomas.kersten@hcu-hamburg.de  
felix.tschirschitz@hcu-hamburg.de

Dr. Boris Dorschel

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Van-Ronzen-Straße 2, 27568 Bremerhaven  
boris.dorschel@awi.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter [www.geodaeis.info](http://www.geodaeis.info).