

Das NVIDIA Metaverse

B.inf.1207 Proseminar I (TI)

-Eingereicht bei-
Professur für High-Performance Computing
Prof. Dr. Julian Kunkel
Georg-August-Universität Göttingen

31. März 2022

-Von-
Johann Eilts

-Matrikelnummer-
11780368

-Studiengang-
B.Sc. Wirtschaftsinformatik

-Betreuer-
Prof. Dr. Julian Kunkel

Abstract

Das Metaverse kann als seine Verschmelzung von der physischen mit einer virtuellen Welt verstanden werden. Innerhalb virtueller Welten können lebensnahe Repräsentationen der Umwelt oder von Nutzern vorhanden sein. Dank verfügbarer Technologien, wie Augmented und Virtual Reality, lässt sich ein möglichst immersives Erlebnis für den Nutzer schaffen. Personen können innerhalb eines MV miteinander interagieren oder Unternehmen können ihre Produktionsstätten virtuell nachbauen oder digitale Mitarbeiterschulungen durchführen. NVIDIA bietet mit seinem Omniverse die Möglichkeit virtuelle Welten miteinander zu verbinden. Diese Schnittstellen dienen vor allem der digitalen Kollaboration an 3D Designprojekten. Zurzeit gibt es keine vergleichbare Softwarelösung zum Omniverse, da dieses auch eine Anwendungsübergreifende Echtzeit Synchronisation bietet. Durch eine hohe mediale Aufmerksamkeit wird das generelle Konzept des Metaverses auch in Zukunft weiterhin relevant bleiben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Digitale Kollaboration.....	1
2	Metaverse Technologien	2
2.1	Augmented Reality	2
2.2	Virtual Reality	3
2.2.1	Virtual Reality Hardware	3
2.2.2	Virtual Reality Software.....	5
3	NVIDIA Metaverse / Omniverse	5
3.1	Omniverse als Plattform	6
3.2	Omniverse Bestandteile.....	6
3.2.1	Nucleus	6
3.2.2	Connectors	8
3.2.3	Kit.....	8
3.2.4	RTX Renderer	8
3.2.5	Simulation.....	9
3.3	Omniverse Anwendungsbeispiele.....	9
4	Diskussion	10
4.1	Omniverse Alternativen	11
4.2	Zukunftsblick Metaverse	12
5	Zusammenfassung	13
	Literaturverzeichnis	14

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: Inside-out, Outside-in Tracking im Vergleich (eigene Darstellung) .	3
ABBILDUNG 2: CPU, GPU Architektur im Vergleich, in Anlehnung an Gupta [30]	4
ABBILDUNG 3: Nucleus Architektur vereinfacht in Anlehnung an NVIDIA [48].....	7
ABBILDUNG 4: Beispiele Materialien MDL [59].....	9

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: Mindestanforderungen Hardware Nucleus Installation [50], [51]	7
--	---

Abkürzungsverzeichnis

ALU	Arithmetic Logic Unit
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
CAD	Computer Aided Design
CPU	Central Processing Unit
GPU	Graphics Processing Unit
IT	Informationstechnologie
MDL	Material Definition Language
MV	Metaverse
OV	Omniverse
SDK	Software Development Kit
VR	Virtual Reality
X3D	Extensible 3D
XML	Extensible Markup Language

1 Einführung

Trotzdem der Begriff *Metaverse* (MV) in jüngster Vergangenheit zunehmend mediale Aufmerksamkeit erhalten hat, gibt es diesen Ausdruck bereits seit 1992. Neal Stephenson nannte, mit seiner Zusammensetzung der Wörter *Meta* und *Universe* in seinem Roman *Snow Crash*, eine virtuelle, dreidimensionale Welt das MV. Innerhalb dieser virtuellen Welt ist es Nutzern möglich, im geschäftlichen Sinne oder zur Vergnügung zu kooperieren und interagieren. Durch einen Avatar können sich Personen im MV darstellen lassen [1]. So gibt es bereits seit einigen Jahren verschiedenste virtuelle Welten im Unterhaltungssektor. Bereits 1995 gab es erste Projekte, wie *Cybertown* oder *Active Worlds* [2]. Diese konnten jedoch keinen langfristigen Erfolg verbuchen, wohingegen virtuelle Welten, wie *Second Life* [3], *Minecraft* [4] oder *Roblox* [5] bereits seit einigen Jahren relevant sind. Diese Welten sind auch als Massively Multiuser Online Umgebungen bekannt [6], jedoch ist die wirtschaftliche Wertschöpfung hierbei nicht im Fokus. Letztendlich gibt es kein einheitliches „Gebilde MV“, sondern eher eine Menge an Virtualisierungen, welche verschiedene Anwendungen und Umgebungen in einem 3D Umfeld darstellen können. Langfristig soll es das Ziel des MV sein, 2D und 3D Kontexte bestmöglich zu vermischen, um für Nutzer die Vorteile von beiden Darstellungen zu generieren. Nach Smart et al. kann das MV demnach nicht nur als virtueller Raum betrachtet werden, sondern eher als die Schnittstelle unserer physischen Welt zu einer virtuellen [7]. Die nachfolgende Ausarbeitung gibt einen Überblick über die Relevanz des MV im heutigen Kontext und welche Technologien dafür wesentlich sind. Im gleichen Zuge wird NVIDIAs Ansatz zum MV und deren eigene technologische Lösung in diesem Kontext präsentiert. Abschließend findet sich eine kritische Würdigung des Themas mit Zukunftsausblick.

1.1 Digitale Kollaboration

Für das Verständnis der Ausarbeitung bedarf es der Erklärung bestimmter Begrifflichkeiten. Darunter fällt auch die digitale Kollaboration. Unter digitaler Kollaboration ist die Zusammenarbeit und Interaktion von Personen bei gemeinsamen Aufgaben zu verstehen. Dies wird gestützt durch Computer und Informationstechnologie (IT) [8], [9]. Aufgrund der steigenden Digitalisierung, wie auch der Covid-19 Pandemie sind verschiedenste Arbeitsbranchen mehr und mehr auf Remote-Arbeit angewiesen. Weiterhin ist auch die Akzeptanz für das Arbeiten von zu Hause bei Arbeitnehmern gestiegen [10]. Dementsprechend ist nun ein Wandel zu erleben, bei welchem das traditionelle Arbeiten, lokal und analog beim Arbeitgeber, dem virtuellen Arbeitsplatz weichen könnte [11]. So können auch mit Hilfe von Software zur Modellierung virtueller Umgebungen, ehemals kostspielige und zeitaufwändige Projekte, wie beispielsweise die Optimierung einer Produktionsstätte, digital nachgebildet werden.

2 Metaverse Technologien

Um die Teilnahme am MV für die Nutzer möglichst immersiv (= fesselnd/eindringlich) zu gestalten, wurde in den vergangenen Jahren verschiedenste Technologien entwickelt. Darunter fallen beispielsweise die Augmented Reality (AR) und die Virtual Reality (VR). Unter AR versteht man die Projektion von computer-generierten Inhalten auf die reale Welt [12]. VR hingegen ist die Simulation einer lebensechten Umgebung, in welche der Nutzer sich selbst hineinprojiziert [13], [14]. Diese beiden Technologien, wie auch weitere Hardware- und Softwarekomponenten, welche das MV möglich und zugänglich machen, werden in den folgenden Abschnitten beleuchtet.

2.1 Augmented Reality

Durch die Aufnahme der persönlichen Umgebung mit einer Kamera können computer-generierte Inhalte in die reale Welt abgebildet werden. Dies können 2D oder 3D Darstellungen sein, mit welchen der Nutzer interagieren kann [12]. Dementsprechend wird die reale Welt durch virtuelle Objekte erweitert (eng: *augmented*) [15]. Beispiele für Konsumenten-orientierte AR Anwendungen sind die IKEA Place und Pokemon GO Applikationen. Mit IKEA Place kann ein Benutzer seine Wohnumgebung mit einem mobilen Endgerät aufnehmen und beispielsweise Möbelstücke in die Umgebung hineinprojizieren [16]. Bei Pokemon GO wird hingegen die gesamte geographische Umgebung außerhalb des Wohnraums weitreichend durch Computerprojektionen zur Unterhaltung ergänzt [17].

Augmented Reality Technologien

Für eine erfolgreiche Umsetzung von AR bedarf es nicht nur der entsprechenden Software, sondern auch der Hardware. Ursprünglich waren AR Displays für Helme konzipiert wurden, welche unter anderem auch im militärischen Bereich eingesetzt werden können [18], [19]. Mobile Endgeräte, wie Smartphones sind heutzutage jedoch weit verbreitet und eignen sich für AR Anwendungen. Dies bestätigt auch ein weltweiter Absatz von über 1,5 Milliarden Smartphones in 2021 [20]. Zweckmäßig sind sie unter anderem dadurch, dass sie mit einem Touchdisplay dem Nutzer eine Interaktion mit computergenerierten Inhalten bieten und dazu noch leicht, portabel und mit einem Akku ausgestattet sind. Zusätzlich sind Smartphones mit Kameras ausgestattet, welche die Aufnahme der Umgebung ermöglichen und mithilfe von Fokuspunkten und Umgebungsmarkern die virtuellen Objekte in die reale Welt projizieren. Dank intelligenter Interaktion kann nicht nur ein Nutzer, sondern auch die jeweilige aufgenommene Umwelt das Objekt beeinflussen. Der Vibrationsmotor innerhalb des Smartphones kann so auch zusätzliches haptischen Feedback an den Nutzer zurückgeben [18].

2.2 Virtual Reality

Im Gegensatz zu AR wird bei VR die Umgebung simuliert und der Nutzer in diese hineinversetzt. Diese Umgebung soll möglichst lebensecht sein und eine physikalisch-vertraute Interaktion durch einen Nutzer erlauben [14]. Da der Nutzer die virtuelle Welt modifizieren kann, wird eine möglichst interaktive und immersive Erfahrung geschaffen [13]. Durch geeignete Software und Hardware lassen sich verschiedene Einsatzbereiche identifizieren: Zum einen kann VR im Unterhaltungsbereich bei Videospiele, bei der Ausbildung von Polizei und Piloten, aber auch im geschäftlichen Rahmen bei virtuellen Konferenzen verwendet werden [21], [22], [23]. Wie bereits erläutert behandelt der Begriff des MV hauptsächlich virtuelle Welten und die Interaktion innerhalb dieser. Aus diesem Grund wird VR nachfolgend weiter vertieft.

2.2.1 Virtual Reality Hardware

Hauptsächlich zeichnet sich VR durch zusätzliche Hardwarekomponenten aus. Dies sind beispielsweise Headsets mit Bildschirmen, handschuhähnliche Steuergeräte und weiterer Sensoren [14]. Viele der verwendeten Technologien sind bereits bei Smartphones im Gebrauch: Es sind unter Anderem Sensoren, wie Gyroskope und Bewegungssensoren verbaut, welche die Bewegung von Körper, Kopf und Hände wahrnehmen können. Außerdem sind durch zwei hochauflösende Displays eine Stereoprojektion für den Nutzer möglich. Leistungsstarke und energieeffiziente Prozessoren können, je nach Headset-Art, die Rechenleistung eines Computers unterstützen oder übernehmen. Dementsprechend kann hier die Eigenständigkeit eines Headsets oder Abhängigkeit von einem Computer als erstes Differenzierungsmerkmal festgelegt werden [24]. Zusätzlich kann auch bei der Zielgruppe der Hardware unterschieden werden: So stehen diese entweder für Konsumenten [25], [26] oder zur professionellen Anwendung [27] zur Verfügung. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Position der Tracking-Sensoren. Ziel dieser Sensoren ist es ein sich bewegendes Objekt, hier der Nutzer mit einem VR-Headset, im Raum zu lokalisieren [28]. Bei Inside-out Tracking befinden sich die Sensoren am Gerät [29], wohingegen bei Outside-in Tracking Sensoren in externer Hardware außerhalb eines VR-Headsets vorhanden sind [28]. ABBILDUNG 1 gibt hierzu einen Überblick.

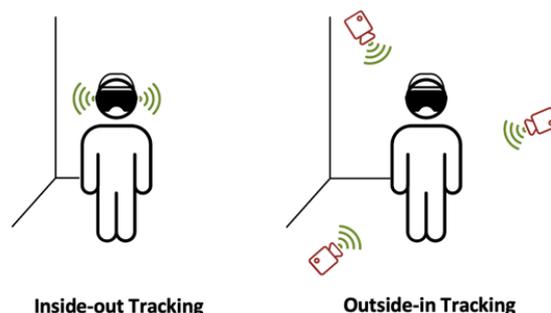


ABBILDUNG 1: Inside-out, Outside-in Tracking im Vergleich (eigene Darstellung)

Um die Anforderungen von Stereoprojektion durch zwei Bildschirme am VR-Headset zu erfüllen, bedarf es vor allem bei Computer-angebundenen Headsets spezieller Hardware. Hier kommt nun die Rechenleistung von Graphics Processing Units (GPU) zum Tragen. Die Central Processing Unit (CPU) ist für eine Vielzahl an verschiedenen Anwendungen ausgelegt ist, wohingegen die GPU vergleichsweise nur eine begrenzte Anzahl an Aufgaben lösen kann [30]. ABBILDUNG 2 stellt dies anhand einer vereinfachten Darstellung der internen Architektur der jeweiligen Einheiten dar. Die Grafik stellt die verhältnismäßige Aufteilung von Halbleiter-Bauelementen bei CPU und GPU dar. Es ist erkennbar, dass ein Großteil an Transistoren für Cache und Control Unit bei CPUs reserviert sind. Diese ermöglichen einen schnellen Wechsel zwischen den zu bearbeitenden Prozessen. Im Gegensatz dazu befinden sich in der GPU eine höhere Anzahl an Arithmetic Logic Units (ALU), welche es GPUs ermöglichen eine hohe Parallelisierung von Prozessen zu erreichen. Dies liegt daran, dass Prozesse auf verschiedene ALUs aufgeteilt werden können. Da die GPU primär für Grafikberechnungen zuständig ist (Rendering, Shading, ...), reicht eine geringere Anzahl von Anwendungszwecken für jede ALU aus. Das bedeutet, dass letztendlich immer ähnliche Berechnungen stattfinden (im Gegensatz zu den diversen Aufgaben der CPU), nur mit unterschiedlichen Daten als Input [30], [31].

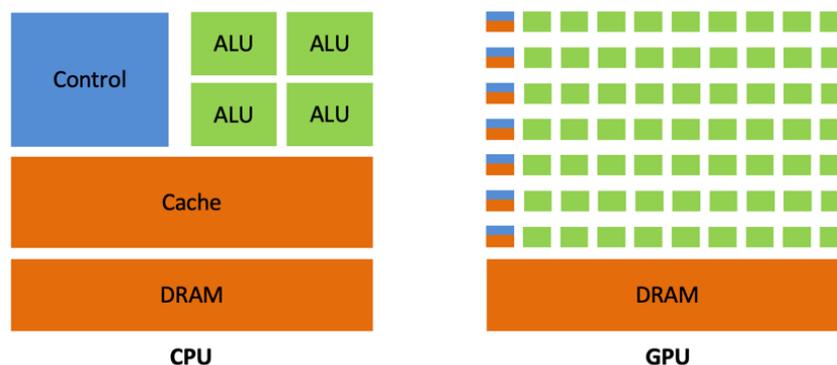


ABBILDUNG 2: CPU, GPU Architektur im Vergleich, in Anlehnung an Gupta [30]

Zusätzlich können Hardwarehersteller den Aufgabenumfang der GPUs kontinuierlich ausbauen und spezialisieren. So wurden beispielsweise von NVIDIA 2016 mit der Pascal GPU Reihe Technologien entwickelt, die insbesondere auf die Ausführung von VR Prozessen ausgerichtet sind [32], [33]. So ermöglicht Single Pass Stereo Rendering die Halbierung der Prozessorlast, da Geometrien für beide VR Bildschirme in einem Prozess errechnet werden und nur noch angepasst für die jeweils linke und rechte Seite dargestellt werden. Ursprünglich wurden Grafiken für die Bildschirme jeweils einzeln errechnet und dargestellt [33].

Durch die Linse vor den Bildschirmen eines VR Headsets kommt es zu einer Verzerrung des Bildes. Dadurch kommt es vor, dass Pixel am Rande der Darstellung nicht vom menschlichen Auge wahrgenommen werden. Mit Lens Matched Shading bietet NVIDIA eine weitere Technologie, die speziell im VR Bereich Ressourcen einspart. Hierdurch wird das gesamte Bild angepasst an die Verzerrung gerendert, so dass wegfallende Pixel von Beginn an nicht berechnet werden müssen [33].

2.2.2 Virtual Reality Software

Wie auch bei der Hardware gibt es im diverse Softwarelösungen, welche sich speziell für die Entwicklung oder Ausführung von VR Anwendungen eignen. Da in diesem Bereich zurzeit keine konkrete Taxonomie zur Entwicklung von VR Software im wissenschaftlichen Kontext existiert, wird zunächst beispielhaft auf VR Software Development Kits (SDK) eingegangen. Bei einem SDK handelt es sich meist um eine Sammlung von Werkzeugen, welche der Entwicklung von Software dienen. Diese ist meist abhängig von einer bestimmten Umgebung, wie der Hardware oder einer Programmiersprache [34]. OpenVR SDK bietet beispielsweise die Möglichkeit Software für SteamVR Hardware zu entwickeln [35], [32]. Abgesehen von der Entwicklung kann bestehende VR Software in verschiedene Kategorien unterteilt werden. Nachfolgend wird VR Training und VR Social Software näher erläutert. Bei VR Training Software handelt es sich um Anwendungen, welche hauptsächlich im professionellen Bereich durch Simulationen Mitarbeiter schulen soll [36]. Das Unternehmen *Immerse Learning Limited* bietet in diesem Bereich eine eigene Plattform zur Entwicklung von Trainingssoftware, wie auch individuell erstellte Programme zur Schulung von Mitarbeitern. Schulungen können so beispielsweise für Mitarbeiter im Produktions- oder Logistikbereich stattfinden [37]. VR Social Software hat im Gegensatz dazu die soziale Interaktion zwischen Benutzern im Fokus [38]. Dementsprechend lässt sich dies auch im Konsumentenbereich finden. Mit *Horizon Worlds* von *Meta* können Nutzer miteinander interagieren und gemeinsam virtuelle Welten erschaffen [39].

Neben traditionellen Entwicklungspattformen und Formaten gibt es auch proprietäre Dateiformate für VR Anwendungen. Extensible 3D (X3D) ist beispielsweise ein Open Standard Dateiformat für webbasierte VR Programme. X3D ist eine Extensible Markup Language (XML) basierte Weiterentwicklung der Virtual Reality Modeling Language vom Web3D Consortium. 3D VR Modelle von verschiedenen Anwendungen können hiermit über Netzwerkkommunikation ausgetauscht werden. Dank XML können X3D Grafiken direkt in Webseiten integriert werden und sind somit zusätzlich noch plattformunabhängig [40].

3 NVIDIA Metaverse / Omniverse

Da eine fachliche Basis bezüglich des allgemeinen Verständnisses zum MV und seiner wichtigsten Technologien geschaffen wurde, gilt die Aufmerksamkeit nun NVIDIA und deren Interpretation und Einflussnahme auf das MV. Wie bereits anfangs definiert kann das MV als eine virtuelle 3D Welt verstanden werden, in welcher Nutzer miteinander interagieren und kooperieren können. NVIDIA fügt nun eine weitere Ebene zu dieser Definition hinzu und stellt fest, dass es sich nicht nur um eine virtuelle Welt handeln kann, sondern das MV auch aus mehreren verschiedenen Welten besteht [41]. Nach dieser Auffassung lässt sich interpretieren, dass beispielsweise Welten aus *Minecraft* und *Roblox* Teil eines gemeinsamen MVs sind. NVIDIAS Umsatz wird jedoch primär durch den Verkauf von GPU Hardware im professionellen, wie auch Konsumentenbereich oder dem Verkauf von Lösungen im Bereich von Networking oder künstlicher Intelligenz generiert [42].

Dies weist auf einen Fokus im Absatz von Hardware hin, sodass mit dem MV ein neues Segment erschlossen werden kann. In diesem Kontext stellt NVIDIA nun deren eigene Software Plattform *Omniverse* (OV) vor, welche in der Lage ist „3D Welten zu einem geteilten Universum zusammenzufügen“ [41].

Mit dem OV im Mittelpunkt von NVIDIAs MV wird nachfolgend näher auf die Ziele, technische Basis und Bestandteile und die Einsatzgebiete eingegangen.

3.1 Omniverse als Plattform

Mit dem OV bietet NVIDIA eine Möglichkeit virtuelle Welten miteinander zu verbinden. Dies dient vor allem dem Zweck der digitalen Kollaboration. Primär ist es mit dem OV möglich über verschiedene Anwendungen hinweg an Graphik und Design Projekten zu kollaborieren (Bsp.: *Unreal Engine*, *Blender*, *Autodesk Maya*,...). Die Zusammenarbeit wird vor allem dadurch ausgezeichnet, dass sie trotz dieser Schnittstellen in Echtzeit ablaufen kann [41], [43]. Das OV schafft somit eine Aufmerksamkeit bei Mitarbeitern bezüglich der Tätigkeiten ihrer Kollegen. Dies entspricht auch den Awareness Typen für kollaborative Software nach Omoronyia et al. [44]. Da eine Vielzahl an Anwendung dank des OV miteinander kommunizieren können, ist also eine Erstellung von AR und VR Software im Sinne des MV nicht ausgeschlossen.

3.2 Omniverse Bestandteile

Das OV setzt sich hauptsächlich aus fünf unterschiedlichen Softwarekomponenten zusammen mit verschiedenen jeweiligen Funktionen und Erweiterungsmöglichkeiten. Diese sind der OV *Nucleus*, *Connectors*, *Kit*, *RTX Renderer* und *Simulation* [45]. Nachfolgend wird die Funktionsweise und Zusammensetzung der Komponenten näher erläutert.

3.2.1 Nucleus

Der Nucleus ist ein Hauptbestandteil des OV. Dieser bietet eine Datenbank zum Austausch digitaler Assets (Geometrien, Lichteffekte, Texturen, ...). Außerdem ist er verantwortlich für die Kollaboration zwischen verschiedenen Drittanbieter-Anwendungen und schafft dafür die Basis für die Echtzeitsynchronisation von Dateien [46]. Nutzer können neue Veröffentlichungen in die Datenbank hochladen und Anpassungen von anderen Nutzern herunterladen. Dies funktioniert ebenso in Echtzeit, wenn ein Nutzer ein digitales Asset „abonniert“, sodass dieser direkt die neueste Version synchronisiert bekommt. Vorteil der Synchronisation ist hier, dass Sie für verschiedene Nutzer auch Anwendungsübergreifend in Echtzeit stattfindet, solange die Anwendung über eine Schnittstelle mit der Datenbank verbunden ist [47]. AB-BILDUNG 3 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Nucleus Architektur. Über den webbasierten Navigator können Nutzer auf die Datenbank, beispielsweise als Dateibrowser für die digitalen Assets, zugreifen. Weiterhin dient dies auch als Managementtool für Projekte: Es können Nutzer angelegt werden und entsprechend mit Berechtigungen versehen werden. Die Kommunikation innerhalb des Nucleus findet mit Hilfe des Nucleus Application Programming Interfaces (API) über den Nucleus Core statt. Zusätzlich sind über diese API noch weitere Services angebunden, welche

unter Anderem das Dateimanagement erweitern und somit für Nutzer erleichtern können [48]. Weiterhin ist erkennbar, dass OV auch ein Cache Service anbietet, wodurch der Datentransfer von Clients zum Nucleus optimiert werden kann. Vorteil dieses Cache ist, dass relevante Dateien zwischengespeichert werden können und nicht bei jedem Zugriff erneut runtergeladen werden müssen. Dies ist jedoch nur bei einer Server Installation des Nucleus möglich und nicht umsetzbar, wenn das OV nur eine lokale Workstation Installation ist [49]. Eine Integration ohne Server ist ohnehin nur für kleine Projektteams geeignet [50].

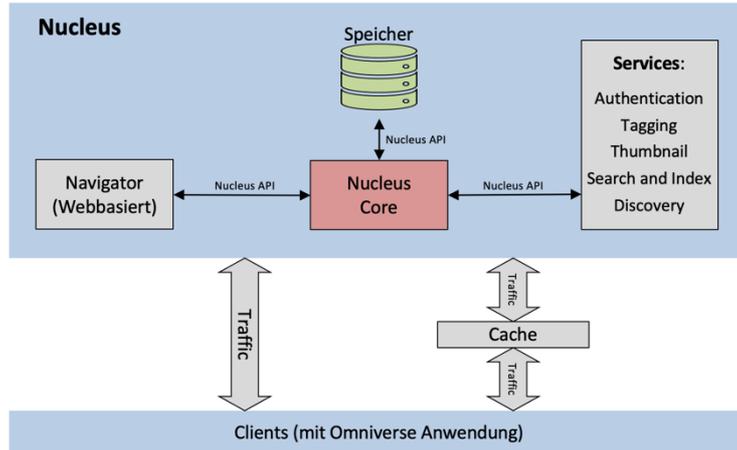


ABBILDUNG 3: Nucleus Architektur vereinfacht in Anlehnung an NVIDIA [48]

Zur Installation stellt NVIDIA jeweilige Hardware-Mindestanforderungen für Workstation oder Server Installation zur Verfügung. Informationen dazu sind in TABELLE 1 zu finden.

TABELLE 1: Mindestanforderungen Hardware Nucleus Installation [50], [51]

	Workstation	Server
CPU	6+ Kerne (mind. 3.0 GHz)	12 Kerne (mind. 3.0 GHz)
GPU	GeForce RTX 3070	-
RAM	16 GB	32 GB
Festplattenspeicher	50 GB	250 GB

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass innerhalb der Herstellerdokumentation im Hinblick auf die Servereinrichtung des Nucleus [50], der allgemeinen technischen Anforderungen zum Betrieb des OV [51] und der Server-Infrastruktur [52] unterschiedliche Angaben zu den Mindestanforderungen existieren. Die Server-Infrastruktur des Nucleus basiert plattformübergreifend auf Docker und ist in Docker Containern verfügbar. Eine Instanz eines Nucleus kann bis zu 500 Nutzer und 25 parallel laufende Echtzeit-Bearbeitungen unterstützen [52].

3.2.2 Connectors

Als Basis für das OV und somit auch die Connectors dient die Open Source Software Universal Scene Description (USD) von *Pixar* [53]. Zusammenfassend kann USD als Framework beschrieben werden, mit welchem es möglich ist, eine große Menge Graphikdaten zuverlässig auszutauschen. Auch mit USD ist es möglich verschiedene Ebenen einer graphischen Szene zwischen Drittanbieteranwendungen auszutauschen. Inbegriffen ist auch ein Open Source Format für 3D Dateien. Ebenso wie beim OV ist es bei USD das Ziel Daten mit möglichst geringer Latenz in Echtzeit an verschiedenen Endgeräten zu synchronisieren [54], [55]. Um mit der Nucleus Datenbank kommunizieren zu können, hat NVIDIA eigenen Erweiterungen für USD entwickelt. Proprietäre Dateiformate können in das USD Format exportiert werden und dann entsprechend für weitere Anwendungen wieder umgewandelt werden, da bereits eine Vielzahl an Softwareanbietern mit dem USD Format arbeitet. Dies macht also eine große Anzahl an Drittanbieter Anwendungen, wie auch Dateiformate zu, miteinander kompatibel, sodass Echtzeit Synchronisation und Nucleus Datenbankzugriff möglich sind [53].

3.2.3 Kit

Das OV Kit bietet eine Entwicklungsumgebung, mit welcher eigene Erweiterungen und Services für das OV geschaffen werden können. Erweiterungen können ohne Interface, oder mit einem Python basierten Interface erstellt werden. Auch das Kit bietet die Möglichkeit USD Dateien wiederzugeben und zu bearbeiten. Somit können Nutzer im Kit ihre eigene Rendering Software erstellen, falls erwünscht. Zusätzlich ist es auch möglich Skripts in C++ zu verfassen [56].

3.2.4 RTX Renderer

Der OV RTX Renderer bietet ein Physik-basiertes Rendering mit Hilfe der USD und NVIDIAs Material Definition Language (MDL) an. Hauptmerkmal ist die Berechnung von 3D Projekten auf Basis gegebener Lichtbedingungen [55], [57]. Zum weiteren Verständnis sollten dazu NVIDIAs RTX Technologie und MDL erläutert werden.

RTX kennzeichnet NVIDIAs Ray Tracing Technologie, für die Grafik APIs Vulkan und DirectX. Diese ermöglicht die Echtzeit Berechnung von (Licht-) Strahlen auf Oberflächen, deren Brechung und resultierende Schatten. NVIDIA machte dies erstmals mit der 2018 veröffentlichten Turing Architektur zum Alleinstellungsmerkmal derer GPUs [58].

Bei MDL handelt es sich um eine Programmiersprache, mit welcher Materialien und Lichtbedingungen möglichst realitätsnah dargestellt werden können. Sofern MDL unterstützt wird, kann diese auch anwendungsübergreifend angewandt werden. Ziel ist anwendungsübergreifend es ein vergleichbares Rendering Ergebnis von Oberflächen und Licht zu erhalten. NVIDIA stellt bereits eine umfangreiche Bibliothek an Materialien zur Verfügung, es können jedoch auch eigene entworfen werden [59]. ABBILDUNG 4 zeigt Beispiele von vorhandenen Materialien der MDL.

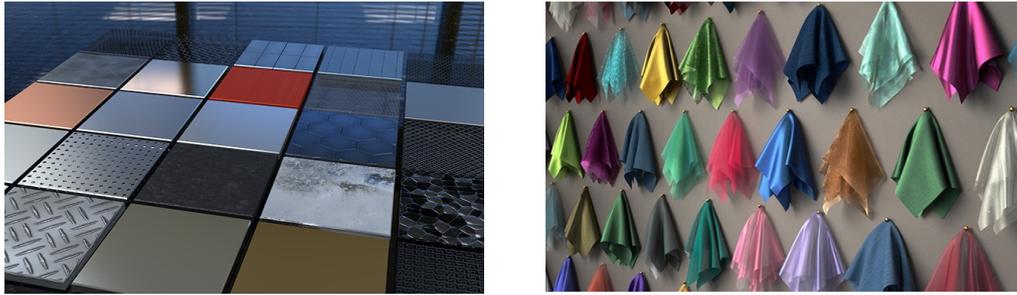


ABBILDUNG 4: Beispiele Materialien MDL [59]

RTX Renderer bietet somit die Anbindung eines Renderers, inklusive der MDL, im OV, um anwendungsübergreifend Kontinuität und Einheitlichkeit der Materialien und Lichtberechnungen zu garantieren. Zusätzlich wird von der Leistungsfähigkeit der NVIDIA eigenen RTX GPUs Gebrauch gemacht.

3.2.5 Simulation

Bei Computer Simulation handelt es sich um eine realistische Nachbildung wissenschaftlicher Szenarien mit Hilfe von entsprechender Software. Die Simulation basiert meist auf mathematischen Modellen. So sind beispielsweise Wettervorhersagen und Verkehrssimulationen errechenbar. Es ist ebenso möglich digitale Abbilder von Produktionsstätten zu erstellen, um dort, ohne Konsequenzen, Tests und Optimierungen durchzuführen [60].

So bietet auch NVIDIA mit *Simulation* eine Möglichkeit mit dem OV wissenschaftliche Simulationen zu unterstützen. Diese Komponente besteht hauptsächlich aus Plug-Ins und Microservices, welche gebündelt zur Verfügung gestellt werden. NVIDIA *Physx* bietet beispielsweise die Möglichkeit für physikalische Simulationen. So wird vom Hersteller nicht nur für die Spieleentwicklung geworben, sondern auch zur Simulation von Robotics, Verkehr oder Architektur [61].

In diesem Kontext wurde von NVIDIA das Earth-2 Projekt vorgestellt, in welchem ein Supercomputer aufgesetzt werden soll, welcher einen digitalen Zwilling der Erde berechnen soll. Ziel ist es damit eine Klimasimulation zu schaffen und Entwicklungen für mehrere Jahrhunderte in der Zukunft vorherzusagen. Das gesamte Projekt soll mit dem OV umgesetzt werden [62].

3.3 Omniverse Anwendungsbeispiele

Neben NVIDIAs eigenem Earth-2 Projekt gibt es bereits Partnerschaften mit Unternehmen aus verschiedenen Industrien, welche das OV für sich nutzen. Nachfolgend wird anhand mehrerer Praxisbeispiel erläutert, welchen Mehrwert das OV für den professionellen Betrieb bieten kann.

BMW

Dank des OV ist es BMW möglich eine digitale Abbildung ihrer Produktionsstätte zu errichten. Hierdurch wird eine Simulation erstellt, in welcher Mitarbeiter einen Einfluss auf die Produktionsplanung nehmen können, ohne direkt vor Ort sein zu müssen. Innerhalb der Simulation können auch Mitarbeiter der Produktion integriert werden, um Produktionsanpassungen zu testen. Ebenso können mit Hilfe von Robotics Simulationen Produktionsroboter digital trainiert werden. Dies bedeutet, dass durch digitales Beschleunigen der Zeit eine große Menge an Trainingsdaten erschaffen werden können, welche danach an die Roboter in der realen Welt übertragen werden können. Auch eine realistische Umgebung mit Hilfe der MDL ermöglicht es beispielsweise Transportrobotern reale Umwelteinflüsse in Trainingsdaten einzuberechnen. Ziel ist es somit beispielsweise den Materialfluss zu den einzelnen Arbeitsplätzen zu optimieren. Ein weiterer Vorteil ist die Kompatibilität des OV, welches durch seine Connectors auch die Anbindung an bereits vorhandene ERP Systeme erlaubt [41], [63]

Foster + Partners

Als globales Architektur und Design Unternehmen bietet sich für Foster + Partners eine Kollaborationssoftware an, mit welcher Mitarbeiter aus verschiedenen Ländern gemeinsam an Architekturprojekten wirken können. So nutzt das Unternehmen die Echtzeit Synchronisation des OV, um seine Ziele zu erreichen. Zusätzlich kann von dem Rendering und der Simulation realistischer Materialien Gebrauch gemacht werden, so wie von der Erstellung von Custom Software [41], [64].

Ericsson

Das schwedische Telekommunikationsunternehmen Ericsson nutzt das OV, um digitale Nachbildung von Städten zu errichten. Dank digitaler Kollaboration und Simulation des OV können Einflussfaktoren auf das 5G Netzwerk innerhalb von Städten präzise berechnet werden. Einflüsse, welche ursprünglich simplifiziert wurden, können nur realitätsnah einberechnet werden, um den 5G Netzausbau zu optimieren [41], [65].

4 Diskussion

Vergleicht man die ursprüngliche Definition eines MV mit der entsprechenden von NVIDIA, und deren Umsetzung mit Hilfe des OV, können gewisse Unterschiede aufgedeckt werden. Traditionell handelt es sich bei dem MV um eine Art virtuellen 3D Raum oder eine Schnittstelle zwischen der physischen und der virtuellen Welt [7]. NVIDIA bezeichnet das MV als geteilte virtuelle 3D Welten, welche unter anderem kollaborativ sind. Umgesetzt wird dies durch das OV [41]. Nachdem nun die Funktionsweise und Bestandteile des OV offengelegt wurden, wird jedoch deutlich, dass NVIDIA hier möglicherweise von der medialen Aufmerksamkeit rund um das MV profitieren möchte. Gewissermaßen profitiert das Unternehmen hier auch durch die derzeitig noch ungenaue Definition des MV.

So wird auf der Website des OV Enterprise beispielsweise primär der Fokus auf die Funktion als Kollaborationstool mit der Möglichkeit zur Anbindung an vorhandene Software gelegt [66] und nicht auf virtuelle Welten. Es ist anzunehmen, dass das OV bei der Erstellung von Software für MV Technologien, wie AR und VR zum Einsatz kommen kann, dennoch ist dies nicht direkt ersichtlich oder ohne zusätzlicher Modellierungssoftware zu bewerkstelligen. Ericsson verwendet das OV beispielsweise primär zur Kollaboration und modelliert weiterhin mit der *esri CityEngine* [41]. Ebenso ist der RTX Renderer nicht mit einer eigenständigen Modellierungssoftware zu verwechseln, da dieser hauptsächlich ein, auf die RTX Hardware angewiesenes, Plug-In für ausgewählte Software ist. Nur durch die Erstellung von eigenen Interfaces mit Hilfe des OV Kits kann der Renderer eigenständig verwendet werden [67], [68].

Da das OV hauptsächlich auf NVIDIA-exklusiven Technologien, wie PhysX, MDL oder RTX zugreift, ist aktuell keine Hardware von anderen GPU Herstellern kompatibel [51], [68]. Somit wird hier ein Lock-in Effekt geschaffen, von welchem NVIDIA zusätzlich profitiert, da deren Kerngeschäft immer noch der Absatz von GPU Hardware ist [42].

Die Kollaboration ist einer der wichtigsten Aspekte des OV. Diese basiert auf der USD von *Pixar*. Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 erläutert, bietet USD einen Open Source Echtzeit-Austausch von 3D Dateien zwischen Drittanbieteranwendungen mit Hilfe eines entsprechenden Dateiformats [54], [55]. Es lässt sich daher also kritisch hinterfragen, welchen Mehrwert NVIDIA (abgesehen vom Bekanntheitsgrad und bereits existierenden proprietären Technologien, wie RTX, MDL oder PhysX) hier durch die Einbindung einer Open Source Software für die Hauptaufgabe des OV geschaffen hat. Dies gilt ebenso für die Anbindung an Drittanbieter Software. Wie sind die Schnittstellen hier langfristig gesichert? Wie schnell sind Updates einer Vielzahl externer Anwendungen mit dem OV und USD kompatibel?

4.1 Omniverse Alternativen

Nachfolgend werden Alternativen zum OV vorgestellt mit einem Fokus auf digitaler Kollaboration.

Modelo

Bei Modelo handelt es sich um eine Kollaborationssoftware der Modelo Group. Im Gegensatz zum breiten Angebot des OV ist Modelo auf die Kollaboration von 3D Modellen im Bereich der Architektur spezialisiert. Ähnlich wie der OV Nucleus wird eine webbasierte Plattform angeboten, auf welcher Nutzer sich registrieren können und auf eine gegebene Cloud zugreifen können. Hier können Dateien hochladen, wiedergeben, mit anderen 3D Objekten in Verbindung bringen und unter anderem auch mit Klienten teilen. Zusätzlich kann auch durch mobile Betriebssysteme, wie Android und iOS, auf Dateien zugegriffen werden. Ein weiteres Feature ist bei Modelo, dass auf der Plattform auch mit Hilfe von Kommentaren an Objekten kommuniziert werden. Im Vergleich zum OV scheint Modelo zwar einfach in der Handhabung, jedoch limitiert im Umfang. So sind Bearbeitungen an 3D Modellen nur über die ursprünglich verwendete Software möglich und die Synchronisation mit der Plattform muss manuell vom Nutzer durch einen Upload initiiert werden [69], [70].

Autodesk Software

Autodesk ist ein Anbieter von Modellierungssoftware für verschiedene Branchen, wie der Konstruktion, Architektur oder Unterhaltung [71]. Autodesk Maya und 3ds Max unterstützen bereits das USD Format [72], jedoch bietet das Unternehmen auch eigene Plattformen zur digitalen Kollaboration an.

Vergleichbar mit Modelo bietet Fusion 360 eine webbasierte Kollaborationsplattform für das Teilen und Kommentieren von Modellierungen aus dem Ingenieur- und Konstruktionsbereich. Auch hier liegt der Fokus auf Kompatibilität, sodass durch einen Zugriff über den Browser eine Vielzahl an Geräten integriert werden kann. Eine gleichzeitige, kooperative Modellierung ist im Vergleich zur OV Anbindung jedoch nicht möglich [73].

Tinkercad ist ein kostenloses Modellierungstool mit Echtzeit Kollaboration. Die Software zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass sie vergleichbar simplifiziert wurde und über einen Webbrowser bedient werden kann [74]. Einen vergleichbaren Ersatz zum OV kann durch den geringen Umfang jedoch nicht geboten werden.

Zukünftige Alternativen

Zum jetzigen Zeitpunkt lassen sich keine Softwarealternativen finden, welche es erlauben eine eigens gewählte Modellierungssoftware zu verwenden und in Echtzeit mit verschiedenen Drittanbieteranwendungen zu kollaborieren. Es lässt sich also nur spekulieren, dass in Zukunft ein Markt, mit Hilfe des USD oder eines neuen Formates, geschaffen werden kann.

4.2 Zukunftsblick Metaverse

Das Konzept eines MVs erhält zurzeit viel mediale Aufmerksamkeit. Dementsprechend wird bereits spekuliert, ob dies ein Trend sein kann, der sich längerfristig in unseren Leben manifestiert, oder eher nur ein Hype für Konsum darstellt [75]. Das Mittelamerikanische Land Barbados plant bereits eine digitale Botschaft im MV *Decentraland* zu eröffnen. Jedoch muss auch dieser Schritt mit Vorsicht genossen werden, da das Unternehmen hinter der virtuellen Welt die Kosten für den digitalen Bauplatz übernimmt [76]. Sogar für NVIDIA selbst wird, trotz wirtschaftlicher Rückschläge, eine positive Zukunft dank des MV vorausgesagt [77]. Auch Goldman Sachs prognostiziert Wachstum im Tech-Bereich dank des MV [78]. Facebook unternahm Ende 2021 einen großen Schritt und richtete sich mit der Umbenennung des Konzerns in *Meta* neu aus, für den Aufbau eines umfangreichen und zugänglichen MV [79]. Auch Unternehmen aus dem Produktionssektor, wie Boeing nehmen das Potenzial einer virtuellen Welt wahr und wenden sich an digitale Lösungen, um die Produktion zu optimieren. Ein digitaler Zwilling einer Produktionsstätte soll somit erstmals ein Boeing Flugzeug digital herstellen [80].

Letztendlich wird der Verlauf der Zeit und die Verfügbarkeit technischer Möglichkeiten die Weiterentwicklung des MV beeinflussen. Dennoch ist bereits ein großer Markt mit technischen Innovationen geschaffen, der das Wachstum des MV unterstützt. Trotzdem sollte für die Zukunft eine einheitliche Definition des MV gefunden werden. Aktuell wird der Begriff in vielerlei Kontext verwendet, sei es allgemein als Synonym für eine virtuelle Welt oder für den Zusammenschluss von Softwaretools.

Es bleibt auch die Frage offen, welche MVs sich im Kontext von sozialer Interaktion etablieren werden, oder ob es eine Vielzahl von Welten geben wird. Dank der steigenden Anzahl an bezahlbarer Hardware für den Endbenutzer, wie VR Headsets, und eine resultierende höhere Verfügbarkeit, gewinnt das MV weiter an Relevanz und Platz in den Köpfen der Konsumenten. Schließlich profitiert auch die Wirtschaft von zeiteffizienten Optimierungsmöglichkeiten virtueller Produktionshallen.

5 Zusammenfassung

Das MV bietet eine Vielzahl an vielversprechender Einsatzmöglichkeiten. Sei es die virtuelle Schulung von Mitarbeitern, das Aufbauen eines digitalen Zwillings einer Produktion oder die soziale Interaktion zwischen Nutzern. NVIDIA stellt mit dem OV eine Softwarelösung zur Verfügung, um virtuelle Arbeitswelten, beispielsweise globale 3D Modellierungsprojekte, miteinander zu vereinen. Verschiedene Komponenten der OV Plattform nutzen eigens entwickelte Technologien, wie PhysX, MDL oder RTX, um möglichst realitätsnahe Simulationen zu erschaffen. Dennoch bedarf es zur Entwicklung von 3D Modellen eigene Software, wie die Unreal Engine oder Autodesk Maya. Mit dem USD basierten OV wird nun die Möglichkeit geboten über verschiedene Anwendungen hinweg in Echtzeit gemeinsam an Projekten zu wirken. Zurzeit hat NVIDIA mit den technischen Möglichkeiten zur Echtzeit Synchronisation mit dem OV ein Alleinstellungsmerkmal. Trotzdem ist es fraglich, wie der Begriff des MV hier für die Beschreibung des OV gedehnt wird.

Es wurde dargestellt, welche Funktionalität NVIDIA mit dem OV bietet und aus welchen Bestandteilen es besteht. Zusätzlich sind mögliche Anwendungsfälle aus der Praxis und Alternativen von anderen Softwareanbietern betrachtet wurden. Es hat sich gezeigt, dass zurzeit keine vergleichbare Kollaborationssoftware zum OV existiert.

Dank großer Aufmerksamkeit und reichhaltiger Investitionen steht dem Konzept des MV in naher Zukunft großes Potenzial zu. Trotzdem sollte man dem MV auch kritisch gegenüberstehen, falls es sich schlussendlich als Marketing-Hype herausstellt.

Literaturverzeichnis

- [1] N. Stephenson, *Snow crash*. New York: Bantam Books, 1992. Accessed: Dec. 06, 2021. [Online]. Available: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=736395>
- [2] J. Lombardi and M. Lombardi, ‘Opening the Metaverse’, in *Online Worlds: Convergence of the Real and the Virtual*, W. S. Bainbridge, Ed. London: Springer London, 2010, pp. 111–122. doi: 10.1007/978-1-84882-825-4_9.
- [3] Linden Lab, ‘Second Life’, *secondlife.com*, 2022. <https://secondlife.com> (accessed Jan. 10, 2022).
- [4] Mojang, ‘Minecraft’, 2022. <https://www.minecraft.net/en-us> (accessed Jan. 10, 2022).
- [5] Roblox Corporation, ‘Roblox’, 2022. <https://www.roblox.com> (accessed Jan. 10, 2022).
- [6] G. Prisco, ‘Future Evolution of Virtual Worlds as Communication Environments’, in *Online Worlds: Convergence of the Real and the Virtual*, W. S. Bainbridge, Ed. London: Springer London, 2010, pp. 279–288. doi: 10.1007/978-1-84882-825-4_22.
- [7] J. Smart, J. Paffendorf, and J. Cascio, ‘Metaverse Roadmap Overview’, *Metaverse Roadmap*, 2007. <https://www.metaverseroadmap.org/overview/> (accessed Dec. 06, 2021).
- [8] E. Darics and M. C. Gatti, ‘Talking a team into being in online workplace collaborations: The discourse of virtual work’, *Discourse Studies*, vol. 21, no. 3, pp. 237–257, Jun. 2019, doi: 10.1177/1461445619829240.
- [9] A. Pinsonneault and K. L. Kraemer, ‘The impact of technological support on groups: An assessment of the empirical research’, *Decision Support Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 197–216, Jun. 1989, doi: 10.1016/0167-9236(89)90007-9.
- [10] D. Mercer, ‘Strategy Analytics: Employment Landscape Transformed as Millions of Employees Want to Work from Home Forever’, *businesswire.com*, Jul. 22, 2020. <https://www.businesswire.com/news/home/20200722005691/en/> (accessed Jan. 09, 2022).
- [11] M. M. Robinson, ‘The metaverse will shape the future of work.’, *workplaceinsight.net*, Dec. 17, 2021. <https://workplaceinsight.net/the-metaverse-will-shape-the-future-of-work-heres-how/> (accessed Jan. 09, 2022).
- [12] A. Gladston and A. Duraisamy, ‘Augmented Reality Indoor Navigation Using Handheld Devices’, *International Journal of Virtual and Augmented Reality*, vol. 3, no. 1, pp. 1–17, Jan. 2019, doi: 10.4018/IJVAR.2019010101.
- [13] XinReality, ‘Virtual Reality’, *Virtual Reality and Augmented Reality Wiki*, Sep. 02, 2021. https://xinreality.com/wiki/Virtual_Reality (accessed Jan. 23, 2022).
- [14] OED, ‘virtual reality’, *Oxford English Dictionary*. Dec. 01, 2021. Accessed: Jan. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.oed.com/view/Entry/328583?redirectedFrom=virtual+reality#eid>

-
- [15] P. Milgram and F. Kishino, ‘A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays’, *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E77-D, no. 12, pp. 1321–1329, 1994.
- [16] K. Steuerwald, ‘Mit der IKEA App per Augmented Reality einrichten’, *IKEA.com*, 2019. <https://www.ikea.com/de/de/this-is-ikea/corporate-blog/ikea-place-app-augmented-reality-puba55c67c0> (accessed Jan. 10, 2022).
- [17] Niantic Inc., ‘Pokemon GO’, *pokemongolive.com*, 2022. <https://pokemongolive.com/en/> (accessed Jan. 10, 2022).
- [18] Y. Chen, Q. Wang, H. Chen, X. Song, H. Tang, and M. Tian, ‘An overview of augmented reality technology’, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1237, no. 2, p. 022082, Jun. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1237/2/022082.
- [19] J. Novet, ‘Microsoft wins U.S. Army contract for augmented reality headsets, worth up to \$21.9 billion over 10 years’, *CNBC*, Apr. 2021. Accessed: Mar. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.cnbc.com/2021/03/31/microsoft-wins-contract-to-make-modified-hololens-for-us-army.html>
- [20] Gartner, ‘Worldwide Smartphone Sales’, 2021. Accessed: Mar. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-02-03-gartner-says-worldwide-smartphone-sales-to-grow-11-percent-in-2021>
- [21] K. Berntsen, R. C. Palacios, and E. Herranz, ‘Virtual reality and its uses: a systematic literature review’, in *Proceedings of the Fourth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*, Salamanca Spain, Nov. 2016, pp. 435–439. doi: 10.1145/3012430.3012553.
- [22] S. Thompson, ‘VR Applications: 21 Industries already using Virtual Reality’, *Virtualspeech*, Dec. 11, 2020. <https://virtualspeech.com/blog/vr-applications> (accessed Jan. 10, 2022).
- [23] XinReality, ‘Virtual Reality Use Cases’, *Virtual Reality and Augmented Reality Wiki*, Oct. 18, 2017. https://xinreality.com/wiki/Virtual_Real-ity_Use_Cases (accessed Jan. 23, 2022).
- [24] K. Kelly, ‘HYPER VISION’, *Wired*, Apr. 2016. <https://www.wired.com/2016/04/magic-leap-vr/> (accessed Jan. 10, 2022).
- [25] Meta, ‘Oculus Quest 2’, *oculus.com*, 2020. <https://www.oculus.com/quest-2/> (accessed Jan. 23, 2022).
- [26] Valve Corporation, ‘Valve Index VR Kit’, *store.steampowered.com*, 2022. <https://store.steampowered.com/sub/354231/> (accessed Jan. 23, 2022).
- [27] Varjo, ‘Varjo Aero’, *varjo.com*, 2021. <https://varjo.com/products/aero/> (accessed Jan. 23, 2022).
- [28] XinReality, ‘Outside-in tracking’, *Virtual Reality and Augmented Reality Wiki*, Feb. 20, 2018. https://xinreality.com/wiki/Outside-in_tracking (accessed Jan. 23, 2022).
- [29] XinReality, ‘Inside-out tracking’, *Virtual Reality and Augmented Reality Wiki*, Jul. 06, 2020. https://xinreality.com/wiki/Inside-out_tracking (accessed Jan. 23, 2022).
- [30] P. Gupta, ‘CUDA Refresher: Reviewing the Origins of GPU Computing’, *NVIDIA Developer Blog*, Apr. 23, 2020. <https://developer.nvidia.com/blog/cuda-refresher-reviewing-the-origins-of-gpu-computing/> (accessed Jan. 10, 2022).
- [31] Intel, ‘CPU vs GPU: What’s the Difference’, *Intel.com*, 2022. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/processors/cpu-vs-gpu.html> (accessed Mar. 14, 2022).

- [32] Z.-N. Li, M. S. Drew, and J. Liu, *Fundamentals of Multimedia*. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-62124-7.
- [33] NVIDIA, ‘Pascal VR Tech’, *developer.nvidia.com*, Jun. 23, 2016. <https://developer.nvidia.com/pascal-vr-tech> (accessed Jan. 10, 2022).
- [34] Gartner, ‘SDK (Software Development Kit)’, *Gartner Glossary*. 2022. Accessed: Mar. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/sdk-software-development-kit>
- [35] Valve Corporation, ‘OpenVR SDK Now Available’, Apr. 30, 2015. <https://steamcommunity.com/games/250820/announcements/detail/155715702499750866> (accessed Mar. 15, 2022).
- [36] SOURCEFORGE, ‘VR Training Software’, 2022. <https://sourceforge.net/software/vr-training/> (accessed Mar. 20, 2022).
- [37] Immerse Learning Limited, ‘About us’, 2022. <https://immerse.io/company/> (accessed Mar. 17, 2022).
- [38] T. Watson, ‘VR Social Media: Is it the future of social interaction?’, *Skywell Software*, Dec. 11, 2019. <https://skywell.software/blog/vr-social-media-future/> (accessed Mar. 15, 2022).
- [39] Meta, ‘Horizon Worlds’, 2022. <https://www.oculus.com/horizon-worlds/> (accessed Mar. 15, 2022).
- [40] D. Brutzman, ‘X3D Graphics and VR’, presented at the W3C Workshop, San Jose, Oct. 19, 2016. Accessed: Jan. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.web3d.org/sites/default/files/presentations/X3D%20Graphics%20and%20VR/X3dGraphicsVirtualRealityW3cWorkshop2016October18.pdf>
- [41] B. Caulfield, ‘What Is the Metaverse?’, *NVIDIA Blog*, Aug. 10, 2021. <https://blogs.nvidia.com/blog/2021/08/10/what-is-the-metaverse/> (accessed Nov. 04, 2021).
- [42] N. Reiff, ‘How Nvidia Makes Money’, *investopedia.com*, Feb. 10, 2022. <https://www.investopedia.com/how-nvidia-makes-money-4799532>
- [43] NVIDIA, ‘NVIDIA Omniverse’, *NVIDIA.com*, 2022. <https://www.nvidia.com/en-us/omniverse/> (accessed Jan. 11, 2022).
- [44] I. Omoronyia, J. Ferguson, M. Roper, and M. Wood, ‘A review of awareness in distributed collaborative software engineering’, *Softw: Pract. Exper.*, vol. 40, no. 12, pp. 1107–1133, Nov. 2010, doi: 10.1002/spe.1005.
- [45] NVIDIA, ‘Omniverse Platform Overview’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, Jan. 11, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/plat_omniverse/plat_omniverse/overview.html (accessed Jan. 11, 2022).
- [46] NVIDIA, ‘Nucleus’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/plat_omniverse/prod_nucleus/overview_external.html (accessed Jan. 10, 2022).
- [47] NVIDIA, ‘Nucleus Features and Benefits’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/plat_omniverse/prod_nucleus/features.html (accessed Mar. 12, 2022).
- [48] NVIDIA, ‘Nucleus Data Model’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/prod_nucleus/prod_nucleus/arch_overview.html
- [49] NVIDIA, ‘Cache Overview’, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/prod_nucleus/prod_utilities/cache/overview.html (accessed Mar. 13, 2022).

-
- [50] NVIDIA, ‘Nucleus Server Sizing Guide’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/prod_install-guide/prod_nucleus/sizing.html (accessed Mar. 16, 2022).
- [51] NVIDIA, ‘Omniverse Technical Requirements’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/plat_omniverse/plat_omniverse/technical.html# (accessed Mar. 16, 2022).
- [52] NVIDIA, ‘Packages, Requirements, Planning, and Preparation’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/prod_nucleus/prod_nucleus/enterprise/installation/planning.html (accessed Jan. 23, 2022).
- [53] NVIDIA, ‘Connect Overview’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/plat_omniverse/con_connect/overview_external.html (accessed Jan. 10, 2022).
- [54] Pixar, ‘Introduction to USD’, *graphics.pixar.com*, 2021. <https://graphics.pixar.com/usd/release/intro.html> (accessed Mar. 15, 2022).
- [55] R. Merritt, ‘To 3D and Beyond: Pixar’s USD Coming to an Industry Near You’, *blogs.nvidia.com*, Oct. 05, 2020. <https://blogs.nvidia.com/blog/2020/10/05/usd-ecosystem-omniverse/> (accessed Jan. 23, 2022).
- [56] NVIDIA, ‘Kit Overview’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/plat_omniverse/prod_kit/overview_external.html (accessed Jan. 10, 2022).
- [57] I. Llamas, ‘The Omniverse RTX Renderer’, *NVIDIA Blog*, Apr. 2021. <https://www.nvidia.com/en-us/on-demand/session/gtcspring21-s31837/> (accessed Jan. 10, 2022).
- [58] B. Сањжаров *et al.*, ‘Examination of the Nvidia RTX’, in *GraphiCon’2019 Proceedings*, 2019, vol. 2.
- [59] NVIDIA, ‘NVIDIA Material Definition Language’, *NVIDIA Blog*, 2022. <https://www.nvidia.com/en-us/design-visualization/technologies/material-definition-language/> (accessed Jan. 23, 2022).
- [60] H. Gould, J. Tobochnik, and W. Christian, *An introduction to computer simulation methods: applications to physical systems*, 3rd ed. San Francisco: Pearson Addison Wesley, 2007.
- [61] NVIDIA, ‘Simulation’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/plat_omniverse/plat_omniverse/simulation.html (accessed Jan. 10, 2022).
- [62] J. Huang, ‘NVIDIA to Build Earth-2 Supercomputer to See Our Future’, *NVIDIA Blog*, Nov. 12, 2021. <https://blogs.nvidia.com/blog/2021/11/12/earth-2-supercomputer/> (accessed Jan. 10, 2022).
- [63] NVIDIA, ‘BMW Group and NVIDIA Robotics’, 2022. <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/car-manufacturing-robotics/> (accessed Mar. 20, 2022).
- [64] Foster + Partners, *Exploring the future of collaboration*, (2022). Accessed: Mar. 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.fosterandpartners.com/news/archive/2021/04/foster-partners-collaborates-with-nvidia-omniverse-enterprise-for-the-aec-industry/exploring-the-future-of-collaboration/>
- [65] R. Kerris, ‘Ericsson Builds Digital Twins for 5G Networks in NVIDIA Omniverse’, *NVIDIA Blog*, Nov. 09, 2021.

- <https://blogs.nvidia.com/blog/2021/11/09/ericsson-digital-twins-omniverse/> (accessed Mar. 24, 2022).
- [66] NVIDIA, ‘NVIDIA Omniverse Enterprise’, 2022. <https://www.nvidia.com/en-us/omniverse/enterprise/> (accessed Mar. 28, 2022).
- [67] NVIDIA, ‘RTX-enabled Applications’, 2022. <https://www.nvidia.com/en-us/design-visualization/rtx-enabled-applications/> (accessed Mar. 28, 2022).
- [68] NVIDIA, ‘RTX Renderer Rendering Basics’, *NVIDIA Omniverse Documentation*, 2022. https://docs.omniverse.nvidia.com/prod_materials-and-rendering/prod_materials-and-rendering/manual.html (accessed Mar. 28, 2022).
- [69] Modelo, ‘Modelo.io’, 2022. <https://modelo.io> (accessed Mar. 28, 2022).
- [70] Modelo, ‘Collaborate on 3D Files in the Cloud’, *Modelo Blog*, 2022. <https://modelo.io/blog/index.php/collaborate-3d-files-in-the-cloud/> (accessed Mar. 28, 2022).
- [71] Autodesk, ‘Company Profile’, 2022. <https://www.autodesk.com/company> (accessed Mar. 28, 2022).
- [72] Autodesk, ‘Universal Scene Description - Open Source at Autodesk’, 2022. <https://makeanything.autodesk.com/usd> (accessed Mar. 28, 2022).
- [73] Autodesk, ‘Autodesk Fusion 360’, 2022. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (accessed Mar. 28, 2022).
- [74] Team Tinkercad, ‘How to Collaborate in Tinkercad’, *Tinkercad Blog*, Feb. 28, 2021. <https://blog.tinkercad.com/how-to-collaborate-in-tinkercad> (accessed Mar. 28, 2022).
- [75] T. Jahn, S. Scheuer, and L. Holzki, ‘Milliardenmarkt oder Milliardengrab? Was das Metaverse wirklich kann’, *Handelsblatt*, Feb. 11, 2022. Accessed: Mar. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/virtuelle-welt-milliardenmarkt-oder-milliardengrab-was-das-metaverse-wirklich-kann/28056280.html>
- [76] J. Wyss, ‘Barbados Is Opening a Diplomatic Embassy in the Metaverse’, *Bloomberg*, Dec. 14, 2021. Accessed: Mar. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-12-14/barbados-tries-digital-diplomacy-with-planned-metaverse-embassy>
- [77] N. Balu, ‘Nvidia metaverse future bright even as Arm may slip from grasp’, *Reuters*, Dec. 03, 2021. Accessed: Mar. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/markets/deals/nvidia-metaverse-future-bright-even-arm-may-slip-grasp-2021-12-03/>
- [78] F. Wiebe, ‘Welche Aktien Goldman Sachs für Profiteure des Metaverse hält’, *Handelsblatt*, Dec. 14, 2021. Accessed: Mar. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.handelsblatt.com/finanzen/anlagestrategie/trends/tech-titel-welche-aktien-goldman-sachs-fuer-profiteure-des-metaverse-haelt/27889376.html>
- [79] Facebook/Meta, ‘Introducing Meta: A Social Technology Company’, *Facebook Newsroom*, Oct. 28, 2021. <https://about.fb.com/news/2021/10/facebook-company-is-now-meta/> (accessed Mar. 28, 2022).
- [80] E. Johnson and T. Hephher, ‘Boeing wants to build its next airplane in the “metaverse”’, *Reuters*, Dec. 17, 2021. Accessed: Mar. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/technology/boeing-wants-build-its-next-airplane-metaverse-2021-12-17/>

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Ebenso versichere ich, dass diese Arbeit oder Teile daraus weder von mir selbst noch von anderen als Leistungsnachweise andernorts eingereicht wurden. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Sämtliche Sekundärliteratur und sonstige Quellen sind nachgewiesen und in der Bibliographie aufgeführt. Das Gleiche gilt für graphische Darstellungen und Bilder sowie für alle Internet-Quellen. Ich versichere, dass die schriftliche und elektronische Form der Arbeit übereinstimmen.

Ich bin ferner damit einverstanden, dass meine Arbeit zum Zwecke eines Plagiatsabgleichs in elektronischer Form anonymisiert versendet und gespeichert werden kann. Mir ist bekannt, dass von der Korrektur der Arbeit abgesehen werden kann, wenn diese Erklärung nicht erteilt wird.

Ich bin ebenso damit einverstanden, dass meine Arbeit in den Bestand der Bibliothek des Fachbereichs Informatik eingestellt wird.

Göttingen, 31. März 2022

Ort, Datum



Johann Eilts, 11780368