

Technische Universität München

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

Möglichkeiten der Visualisierung von Modellen im Infrastrukturbereich

Bachelorthesis

für den Bachelor of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autor: Michael Thusbaß

Matrikelnummer:



1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

2. Betreuer: Dipl. Ing. Markus Hochmuth & Maximilian Bade, M.Sc.
(OBERMEYER Planen + Beraten GmbH)

Ausgabedatum: 01. Mai 2020

Abgabedatum: 30. September 2020

Abstract

Visualizations have become an indispensable part of our everyday life, because they enable the illustration of things that do not yet exist. Especially in the construction industry, renderings of projects are becoming more and more important. They go beyond the two-dimensional level of the plans and often represent a photo-realistic perspective of the planning. With the help of the pictorial representation of visions, emotions can be conveyed, which brings with it both opportunities and risks.

In addition to the essential theoretical foundations, the bachelor's thesis shows possibilities for efficiently implementing this technique in practice within the framework of a *proof of concept* for infrastructure models. The results of the work are visualizations of a planned infrastructure project in Nordrhein-Westfalen, presented in different quality levels for different target groups. This project was made possible through the cooperation with the company *OBERMEYER Planen + Beraten GmbH*.

Zusammenfassung

Visualisierungen sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken, denn sie ermöglichen die Illustration von Dingen, die noch nicht existieren. Vor allem in der Baubranche gewinnen Renderings von Projekten immer mehr an Bedeutung. Sie gehen über die zweidimensionale Ebene der Pläne hinaus und stellen oftmals eine fotorealistische Perspektive der Planung dar. Mit Hilfe der bildlichen Darstellung von Visionen können Emotionen vermittelt werden, das sowohl Chancen als auch Risiken mit sich bringt.

Die Bachelorthesis zeigt neben den wesentlichen theoretischen Grundlagen Möglichkeiten auf, diese Technik effizient in der Praxis im Rahmen eines *Proof of Concepts* bei Infrastrukturmodellen umzusetzen. Resultat der Arbeit sind Visualisierungen eines geplanten Infrastrukturprojektes in Nordrhein-Westfalen, dargestellt in unterschiedlichen Qualitätsstufen für verschiedene Zielgruppen. Ermöglicht wurde dieses Projekt durch die Zusammenarbeit mit dem Unternehmen *OBERMEYER Planen + Beraten GmbH*.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI	
Abkürzungsverzeichnis	VIII	
1	Einführung und Motivation	1
1.1	Ziel der Arbeit	1
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Grundlagen	3
2.1	3D-Modell.....	3
2.1.1	Drahtmodell	4
2.1.2	Flächenmodell	4
2.1.3	Volumenmodell.....	5
2.2	Low- & High-Poly-Modelle	5
2.3	Importformate	6
2.4	Renderverfahren	8
2.5	Einflüsse auf die Rechenzeit	9
2.6	Software	10
2.6.1	3ds Max.....	10
2.6.2	InfraWorks	11
2.6.3	Lumion	12
2.6.4	Twinmotion	13
3	Rendering – Bildsynthese	14
3.1	Einflüsse auf die Szene	14
3.2	Radiosity	15
3.3	Rasterization	16
3.4	Raytracing.....	17
3.5	Path Tracing.....	18
3.6	Schattierungsverfahren – Shading	19
3.6.1	Flat-Shading	19
3.6.2	Gouraud-Shading	19
3.6.3	Phong-Shading.....	20
3.6.4	Pixel-Shader	20
3.6.5	Vertex-Shader	20

3.7	Beleuchtung – Lightning	21
3.8	Anti-Aliasing	24
3.9	Texturierung – Texture Mapping.....	26
3.9.1	Projection Mapping	26
3.9.2	UV Mapping.....	27
3.9.3	Bump Maps	28
3.9.4	Normal Maps	29
3.9.5	Displacement Maps	30
3.10	Graphics Rendering Pipeline	31
3.11	Animation	33
4	OBERMEYER Demomodell – Proof of Concept	34
4.1	Import.....	35
4.2	Szenengestaltung mit Lumion	39
4.3	Nachbearbeitung	42
4.4	Modellierung von individuellen Materialien/Oberflächen	43
4.5	Darstellung realistischer Kraftfahrzeuge	44
4.6	Workflow mit Lumion	45
4.7	Ergebnisse	46
4.8	Mögliche Optimierungen der Ausgangsdatei	47
5	Zielgruppen	48
5.1	Inhalte der Visualisierungen	48
5.2	Qualitätsstufen	49
5.2.1	Out of the box Rendering.....	49
5.2.2	Quick & dirty Rendering.....	50
5.2.3	Realitätsnahes Rendering	51
5.2.4	Fotorealistisches Rendering	53
5.3	Zeitaufwand.....	55
5.4	Möglichkeiten der Darstellung von Visualisierungen.....	56
6	Fazit und Ausblick	59
	Literaturverzeichnis	61
	Anhang A	66
	Anhang B	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geometriemodelle	3
Abbildung 2: 3D-Drahtmodell.....	4
Abbildung 3: 3D-Flächenmodell.....	4
Abbildung 4: 3D-Volumenmodell	5
Abbildung 5: Autodesk 3ds Max 2021 Interface.....	10
Abbildung 6: Autodesk InfraWorks 2020 Interface	11
Abbildung 7: Lumion 10 Interface	12
Abbildung 8: Twinmotion 2020 Interface.....	13
Abbildung 9: Darstellung Rasterization	16
Abbildung 10: Darstellung Raytracing.....	17
Abbildung 11: Darstellung Path Tracing	18
Abbildung 12: Flat-Shading	19
Abbildung 13: Gouraud-Shading	19
Abbildung 14: Beleuchtung mit Ambient Light	21
Abbildung 15: Beleuchtung mit Directional Light.....	21
Abbildung 16: Verschiedene Positionen eines Punktlichts und deren Auswirkungen.....	22
Abbildung 17: Beleuchtung mit Spotlight	22
Abbildung 18: Szene links mit Flächenlicht, rechts mit Global Illumination.....	23
Abbildung 19: Einsatz von Area Lights	23
Abbildung 20: Darstellung eines Kreises mit Pixeln	24
Abbildung 21: Anwendung von Anti-Aliasing	24
Abbildung 22: Projection Mapping	26
Abbildung 23: 3D Netz mit zugehöriger UV Map.....	27
Abbildung 24: Effekt einer Bump Map	28
Abbildung 25: Effekt einer Normal Map	29
Abbildung 26: Effekt einer Displacement Map	30
Abbildung 27: Grundlegender Aufbau einer Rendering Pipeline	31
Abbildung 28: Keyframes und Interpolation	33
Abbildung 29: Animation von Fahrzeugen und Menschen in Lumion 10 Pro Student	33

Abbildung 30: Rohdaten in Autodesk Navisworks Simulate	34
Abbildung 31: Fehlerhafte Platzierung der Objekte in InfraWorks	35
Abbildung 32: Darstellungsprobleme beim Volumenmodellimport mit InfraWorks.....	36
Abbildung 33: Darstellungsprobleme beim (.dwg) Import mit InfraWorks	36
Abbildung 34: Probleme beim (.dwg) Import mit 3ds Max.....	37
Abbildung 35: Import der (.dwg) mit Lumion LiveSync for Autodesk Revit	38
Abbildung 36: Probleme mit Volumen- (oben) und Netzmodell (unten) in Twinmotion	38
Abbildung 37: Darstellungsfehler in InfraWorks (oben) und Twinmotion (unten).....	39
Abbildung 38: Zuweisung von Materialien in Lumion	40
Abbildung 39: Platzierung von Personen.....	41
Abbildung 40: Einsatz eines Low-Poly-Modells	41
Abbildung 41: Korrekturen des Modells	42
Abbildung 42: Texturierung	43
Abbildung 43: Resultat der Texturierung	43
Abbildung 44: Platzierung von Lichtquellen	44
Abbildung 45: Möglichkeiten durch den Einsatz individueller Beleuchtung	44
Abbildung 46: Vorschau und Einstellungen in Lumion	45
Abbildung 47: Auswahl eines vordefinierten Styles.....	45
Abbildung 48: Rendering Blick von der Brücke in Lumion.....	46
Abbildung 49: Rendering Landstraße in Lumion	46
Abbildung 50: Darstellung der Optimierungsmöglichkeiten.....	47
Abbildung 51: Visualisierung mit Autodesk Navisworks Simulate 2020	49
Abbildung 52: Rendering Landstraße in Infracore	50
Abbildung 53: Rendering Bahnhof in Lumion.....	51
Abbildung 54: Rendering Bahnhof in Twinmotion	52
Abbildung 55: Fotorealistisches Rendern mit Autodesk 3ds Max.....	53
Abbildung 56: Magisches Netzdiagramm.....	55
Abbildung 57: Visualisierungen mit virtueller Realität interaktiv erleben.....	56
Abbildung 58: 360° Rundgang.....	58
Abbildung 59: Visualisierung der Winterlandschaft in Lumion.....	60

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AA	Anti-Aliasing
AR	Augmented Reality
BIM	Building Information Modelling
CAD	Computer Aided Design
CGI	Computer Generated Image
CPU	Central Processing Unit
GI	Global Illumination
GPU	Graphics Processing Unit
HMD	Head-Mounted Display
LOD	Level Of Detail
MR	Mixed Reality
RAM	Random-Access Memory
VRAM	Video Random-Access Memory
VR	Virtual Reality

1 Einführung und Motivation

„Ein Bild sagt mehr als 1000 Worte“, eine der bekanntesten Metaphern, beschreibt die große Ausdrucksfähigkeit von Bildern besonders gut. Bilder können in Sekundenschnelle aussagekräftige Eindrücke vermitteln. Vor allem im digitalen Zeitalter sind von Computern generierte Bilder kaum mehr wegzudenken. Diese werden mittlerweile von etlichen Branchen genutzt, von der Filmindustrie über die Spieleentwicklung bis hin zur Darstellung von Architektur. Dabei werden Dinge inszeniert, die in der Realität nicht umsetzbar oder nur mit großem Aufwand verbunden wären. In der Baubranche haben sich deshalb die Visualisierungen von Projekten sehr stark etabliert, weil sie die virtuelle, teils fotorealistische Betrachtung eines noch nicht umgesetzten Projektes ermöglichen.

Besonders im Neubauvertrieb ist in nahezu jeder Verkaufsanzeige eine anschauliche Visualisierung zu finden. Diese richten sich in erster Linie an die potenziellen Käufer zur Unterstützung des räumlichen Vorstellungsvermögens. Damit bleibt den Kaufinteressenten, zumindest für einen ersten Eindruck, die zeitintensive Arbeit mit den Architektenplänen erspart. Zumal wollen die wenigsten Kunden die Baubeschreibung durcharbeiten, um einen Eindruck über die verwendeten Materialien, etc. zu gewinnen. Visualisierungen erweisen sich nicht nur beim Vertrieb als vorteilhaft, sondern auch bei Finanzierungsgesprächen mit Fremdfinanzierern. Der Investor kann sich damit vom geplanten Projekt schnell einen Eindruck verschaffen. Ferner erweisen sie sich auch bei Verhandlungen mit Bauämtern als nützlich, insbesondere wenn um die Thematik des sogenannten Einfügegebots in die umliegende Bebauung debattiert wird. Diese Vorteile finden sich auch in der Visualisierung von Infrastrukturprojekten wieder. Als Beispiel lässt sich aktuell die Errichtung der 2. Stammstrecke in München nennen. Von diesem Projekt sind mittlerweile verschiedenste Animationen abrufbar.

1.1 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit war die Erarbeitung von unterschiedlichen Herangehensweisen der Visualisierung komplexerer Infrastrukturmodelle sowie Evaluierung dieser als Zuarbeit zu einem Proof of Concept für das Ingenieurbüro OBERMEYER Planen + Beraten GmbH. OBERMEYER stellte dafür ein Infrastrukturmodell, bestehend aus Teilmodellen der Gewerke Schiene, Straße, Brücke, Erdbau, etc. zur Verfügung. Hieraus wurden durch unterschiedliche Herangehensweisen Visualisierungen erstellt, die unterschiedliche Qualitätsansprüche verfolgen. Es wird analysiert, für welche Nutzungen welche Qualitäten erforderlich sind. Zudem werden formale Qualitätsstufen definiert. Darauf aufbauend wird untersucht, mit welchen Aufwänden Infrastrukturmodelle in diesen unterschiedlichen Qualitätsstufen visualisiert werden können. Der

Aufwand wird gemessen und miteinander verglichen. Parallel zur praktischen Untersuchung wurde eine theoretische Betrachtung des Themas Visualisierung erarbeitet. Diese fokussiert zum einen die technischen Aspekte des Prozesses und analysiert zum anderen unterschiedliche Zielgruppen und leitet hieraus die Qualität eingesetzter Visualisierungsmethoden, von der technischen Aufbereitung bis hin zur High-End fotorealistischen Visualisierung, ab. Die Arbeit geht zudem auf die grundlegende Technologie des Renderings ein und stellt verschiedene Verfahren einschließlich Vor- und Nachteilen dar. Dabei wird auch auf Rechenzeiten eingegangen. Ferner werden Hinweise zur Modellierung von Materialien / Oberflächen erarbeitet.

Die Arbeit zeigt final Wege auf, wie OBERMEYER als Ingenieurbüro zukünftig Visualisierungen teilweise Inhouse umsetzen kann und dient somit als Grundlage für ein Proof of Concept.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit setzt sich aus insgesamt sechs Kapiteln zusammen. Nach einer Einführung in die Thematik werden die Grundlagen bezüglich des 3D-Modells erläutert und ein Überblick hinsichtlich der eingesetzten Programme gegeben. Zudem wird auf verschiedene Verfahren des Renderings eingegangen.

Im Anschluss daran folgt der wesentliche Theorieteil, der die verschiedenen Technologien der Bildsynthese erläutert. Hierbei wurde der Fokus auf die elementarsten Prozesse gesetzt, um den vorgegebenen Umfang der Arbeit einhalten zu können. Nach den theoretischen Grundlagen folgt das Praxisprojekt, welches durch die Zusammenarbeit mit dem Unternehmen OBERMEYER ermöglicht wurde. In diesem Rahmen wird das Vorgehen bis zur finalen Visualisierung geschildert, einschließlich aufgetretener Probleme und Optimierungsmöglichkeiten.

Zuletzt werden verschiedene Zielgruppen definiert und den entsprechenden Qualitätsstufen zugeordnet. Der zeitliche Bedarf wird bei den unterschiedlichen Qualitätsstufen jeweils analysiert und den eingesetzten Programmen zugerechnet. Ferner wird ein kritischer Blick auf die Inhalte von Visualisierungen geworfen. Auch Trends hinsichtlich der Darstellung von Visualisierungen, die über das klassische Bild und Video hinausgehen, werden erläutert.

Den Abschluss der Arbeit bildet das Fazit mit einem Ausblick in die Zukunft.

2 Grundlagen

In den folgenden Kapiteln wird ein Überblick über verschiedene 3D-Modelle und deren Importformate geschaffen. Außerdem werden verschiedene Renderverfahren erläutert und Einflüsse auf die Rechenzeit dargelegt. Den Abschluss bildet die Vorstellung verschiedener Programme, die im Rahmen der Bachelorarbeit näher betrachtet wurden.

2.1 3D-Modell

Als Grundlage für eine Visualisierung dient ein 3D-Modell. Im Zuge der zunehmenden Umstellung auf BIM wird heutzutage während des Planungsprozesses größtenteils automatisch ein für die Visualisierung brauchbares 3D-Modell generiert. Dieses Modell kann nach der Erstellung in einem CAD-Programm (Computer Aided Design), z.B. PurVI, SIEMENS NX, Autodesk Revit, Graphisoft Archicad, in der Regel in den gängigen Dateiformaten exportiert werden und anschließend in eine Rendering-Software, beispielweise Lumion, 3ds Max oder Twinmotion, eingelesen werden.

In Abbildung 1 wird die Einteilung der Geometriemodell in zwei- und dreidimensionale Modelle ersichtlich. Wohingegen zweidimensionale Modelle als Flächen- oder Drahtmodelle dargestellt werden, so können dreidimensionale auch als Volumenmodelle repräsentiert werden. (Lobeck, 2014)

	2D		3D			
	Linien-Modell	Linien-Modell	Linien-(Draht-)Modell	Flächen-Modell	Volumen-Modell	
					flächenorientiert	körperorientiert
Informationsmodell						
Rechnerinternes Modell (RM)						
Informationsmittel	Punkt Linie	Punkt Linie	Punkt Linie	Punkt Linie Fläche	Punkt, Linie Fläche, Volumen	Volumen
Allgemeine Bezeichnung	2D-Zeichnungssystem	Aus 3D-Modell abgeleitetes 2D-System	Drahtmodell	Flächenmodell	BRep (Boundary Representation)	CSG Constructive Solid Geometry

Abbildung 1: Geometriemodelle (Quelle: Universität Duisburg-Essen, 2014)

2.1.1 Drahtmodell

Drahtmodelle, im Englischen als „Wireframes“ bezeichnet, bestehen aus einzelnen Linien, die erst in der Vorstellung des Betrachters mit Flächen bzw. einem Volumen verbunden werden. Dieses Modell (vgl. Abb. 2) enthält keine Flächeninformationen und somit auch keinerlei Informationen über das umschriebene Volumen. Daher ist es nicht möglich, Massen- und Flächeninformationen aus einem Drahtmodell zu gewinnen. Das Fehlen von Volumeninformation verhindert eine automatische Kollisionsprüfung durch das CAD-System. Bei einer derartigen Prüfung wertet das CAD-System aus, ob sich die verschiedenen Geometrien berühren oder durchdringen. (Lobeck, 2014)

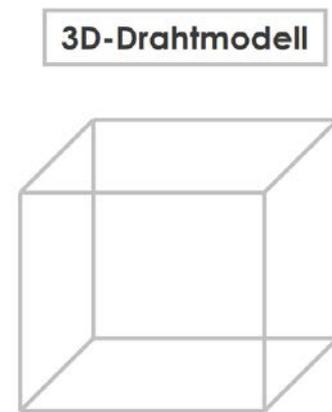


Abbildung 2: 3D-Drahtmodell
(Quelle: Universität Duisburg-Essen, 2014)

Als vorteilhaft erweist sich die geringe Datenmenge im Vergleich zu den nachfolgenden Modellen. Nachteile ergeben sich bei der Interpretation der Geometrie (Modellbildung), hierbei treten leicht Fehler auf. Ferner reichen die Informationen für komplexere Geometrien nicht aus. (Teprode, 2013)

2.1.2 Flächenmodell

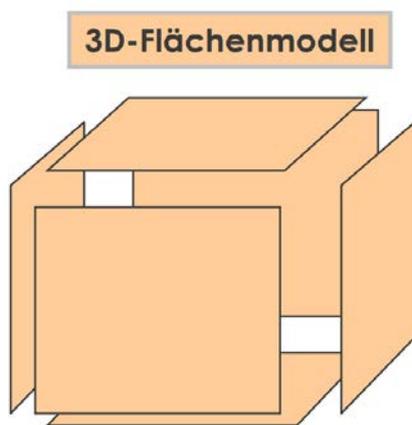


Abbildung 3: 3D-Flächenmodell (Quelle: Universität Duisburg-Essen, 2014)

Flächenmodelle (vgl. Abb. 3) verfügen über alle Flächeninformationen. Aus diesen kann beispielsweise die Oberfläche eines Bauteils berechnet werden. Aufgrund von fehlender Information über die Massenverteilung im Modell ist es dem CAD-System im dreidimensionalen Bereich nicht möglich, das umschlossene Volumen von der Umgebung zu unterscheiden, um die Masse des Bauteils berechnen zu können. Ferner können Flächenmodelle Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit (z.B. eine Farbe) besitzen. (Lobeck, 2014)

Im Rahmen des Flächenmodells können auch komplexe Formen und mehrfach gekrümmte Oberflächen beschrieben werden. Desweiteren können einzelne Bereiche der Geometrie exportiert werden, das eine Verringerung der Datenmenge nach sich zieht, und in andere Modelle eingebaut werden (z.B. als Zuliefererdaten in ein geplantes Gesamt-CAD-Modell). Bei diesem Modell fehlen jedoch Informationen über den logischen Zusammenhang der Flächen (Topologie). Ferner ergeben sich teilweise Interpretationsfehler durch die numerische Rundung. (Teprode, 2013)

2.1.3 Volumenmodell

Volumenmodelle (vgl. Abb. 4) verfügen über vollständige Informationen zur jeweiligen Beschreibung des Bauteils. Daher können vom Datensatz ausgehend, neben Berechnungen der entsprechenden Körperoberfläche auch Aussagen zur genauen Masse des Bauteils getroffen werden, da der Datensatz auch über Informationen verfügt, welche die Dichte betreffen. Informationen über die Oberflächenfarbe und die Oberflächenbeschaffenheit können ebenfalls im Volumenmodell gespeichert werden. (Lobeck, 2014)

Der Informationsgehalt ist somit deutlich höher als bei den zuvor genannten Modellen. Zudem ermöglicht zum Beispiel die Parametrik eine direkte Änderung. Jedoch sind die Formate komplex und zum Teil auch nicht offen dokumentiert. Zuletzt sind die notwendigen Schnittstellen nicht immer vorhanden, was eine eingeschränkte Austauschbarkeit zur Folge hat. (Tepode, 2013)

3D-Volumenmodell

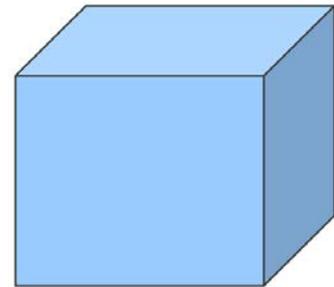


Abbildung 4: 3D-Volumenmodell
(Quelle: Universität Duisburg-Essen, 2014)

2.2 Low- & High-Poly-Modelle

Der Hauptunterschied zwischen High- und Low-Polygon-Modellierung ist genau das – was der Name impliziert – der Einsatz einer hohen oder eher niedrigen Anzahl von Polygonen im Modell. Welche Modellierung nun verwendet wird, hängt in aller Regel vom gewünschten finalen Verwendungszweck ab. (Denham, 2020)

Wenn beispielsweise ein Modell angefertigt werden soll, das abschließend in einem Spiel oder einer virtuellen (VR) Realität Verwendung findet, wird aufgrund der Echtzeitanforderung rechenzeitbedingt in hohem Maße Low-Poly-Modellierung verwendet. Daher benötigen Low-Poly-Modelle grundsätzlich weniger Rechenleistung zum Rendern. Die Hauptstärke der Low-Poly-Modellierung stellt die Benutzerfreundlichkeit dar. Die geringe Größe dieser Modelle kann die Arbeit mit ihnen wesentlich erleichtern, denn Low-Poly-Modelle lassen sich auf dem Rechner viel einfacher laden, anzeigen und bearbeiten. Dies führt im Allgemeinen auch zu kürzeren Renderzeiten. Diese Modelle können auch aus der Modellierungsperspektive einfacher bearbeitet werden. Generell gestaltet es sich einfacher, Bearbeitungen an einem weniger komplizierten Netz vorzunehmen als an einem Netz mit Millionen von Polygonen. Jedoch bringt der Einsatz von Low-Poly-Modellen auch Nachteile mit sich. Es ist aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Polygonanzahl oft schwierig, einen hohen Detailgrad im Endprodukt zu erreichen. Aufgrund einer zu niedrigeren Polygonanzahl erscheint beispielsweise eine Rundung schnell kantig. (Denham, 2020)

Falls das Ziel ein qualitativ hochwertiges Rendering ist, vielleicht aus Marketinggründen, dann wird häufig auf High-Poly-Modellierung gesetzt. Denn bei der Produktion von Standbildern oder Videos ist die Zeit, die zum Rendern eines Frames benötigt wird, mehr oder weniger irrelevant. Die High-Poly-Modellierung bringt neben Vorteilen in der Darstellung auch Nachteile mit sich. Aufgrund der hohen Anzahl an Polygonen sind grundsätzlich viel mehr Details darstellbar, wodurch hochwertigere Modelle im endgültigen Rendering resultieren, jedoch auf Kosten der Rechenzeit, insbesondere bei Filmen, welche etliche Stunden bzw. Tage benötigen können. Ferner kann der Workflow mit den hochaufgelösten Modellen wesentlich erschwert werden. Vor allem beim Einsatz älterer Hardware, kann die Arbeit am Modell zu einer lästigen Pflicht werden. Auch das Bewegen im Ansichtsfenster wird oftmals zu einem verzögerten Prozess und die Bearbeitung kann aufgrund der Dichte des Netzes sehr lange dauern. Grundsätzlich bietet es sich an, sich mit beiden Modellierungsstilen vertraut zu machen, da sie beide ihren Nutzen haben. Hinsichtlich der Low-Poly-Modellierung wird es immer beliebter, das Low-Poly-Basisnetz zu modellieren und dann einen Klon zu erstellen, dem anschließend bei Bedarf High-Poly-Details hinzugefügt werden. (Denham, 2020)

2.3 Importformate

Es existieren mittlerweile unzählige Dateiformate. Dabei ist anzumerken, dass viele Softwarepakete nur bestimmte Importformate unterstützen. Die gängigsten Formate werden nachfolgend aufgeführt:

- .dwg
- .dxf
- .dae
- .max
- .fbx

Die Endung (**.dwg**) steht für ein Konstruktionsdatenformat. Die Endung des Dateiformats leitet sich vom englischen Wort „drawing“ ab. Der Ursprung des Dateiformats lässt sich auf 1982 datieren, wobei es zusammen mit dem ersten AutoCAD erstmalig veröffentlicht wurde. Anwendung findet dieses Format beim Zeichnen, Formen, Rendern, Messen oder Kommentieren. Ferner kann es auch, aufgrund der Implementierung in die Autodesk Programme, als natives Dateiformat der Software AutoCAD betrachtet werden. Eine (.dwg) kann sowohl zwei- als auch dreidimensionale Daten umfassen. Außerdem können Metadaten für die Beschreibung gespeichert werden. Das Format wird im Zuge von neuen Softwareversionen ständig erweitert und angepasst. Die stetige Änderung des Formats hat jedoch zur Folge, dass vorherige Versionen lediglich eingeschränkt mit diesen Dateien umgehen können. (MB CAD, 2020)

Für **(.dxf)** sind verschiedene Erklärungen in der Literatur auffindbar. Größtenteils wird es als Abkürzung für „Drawing Interchange Format“ verstanden. Der große Vorteil des Dateiformats ist, dass der Austausch von fast jeder CAD-Software unterstützt wird. Damit ist eine problemlose Übertragung der Zeicheninhalte zwischen verschiedenen Systemen möglich. Deshalb ist (.dxf) nach wie vor eines der meistgenutzten Formate für den digitalen Austausch von Zeichnungsdaten. Anzumerken ist, dass es sich dabei um keinen digitalen Standard, sondern mehr um einen Industriestandard, handelt. Es existiert deshalb auch keine offizielle Kontrollstelle, die zulässige Änderungen erlaubt, den Standard verwaltet oder Prüfungen durchführt. Es handelt sich um ein proprietäres Dateiformat der Firma Autodesk. Das bedeutet Autodesk pflegt und definiert den (.dxf)-Standard. Jeder Versionswechsel von AutoCAD hat auch eine Neuanpassung des Standards zur Folge. (Pülz, 2002)

Die Endung **(.dae)** bezeichnet als eine Abkürzung von "Digital Asset Exchange" das Dateiformat "COLLADA Digital Asset Exchange (.dae)". Bei COLLADA (Collaborative Design Activity) handelt es sich um einen Zusammenschluss von verschiedenen Partnern, der von der Khronos Group verwaltet wird. Die Community verfolgt das Ziel, ein für 3D Grafik offenes Austauschformat zu unterstützen und zu entwickeln. Ursprünglich wurde es von Sony Computer Entertainment entwickelt und erst später an die Khronos Group freigegeben. Dabei handelt es sich um offenes XML Format für 3D Grafik, das innerhalb eines internationalen Standards (ISO/PAS 17506:2012) festgelegt wurde. Folglich stellt das Format eine Verknüpfungsmöglichkeit für ansonsten inkompatiblen und unterschiedlichen Digital Content Creation (DCC) dar. (File Type Advisor, 2020)

Bei dem **(.max)**-Format handelt es sich um eine dreidimensionale Szene, die mit Hilfe von der Software Autodesk 3ds Max erstellt wurde, eine Anwendung für Modellierung, Animation und Rendering. Dabei kann die Datei mehrere Modelle umfassen, die wiederum aus Texturen, Wireframes, Schattierungen, Lichteffekten und Animationen bestehen können. Eingesetzt wird das Format in verschiedenen Branchen, sowohl in professionellen Filmen/ Fernsehen als auch in der Entwicklung von Spielen. (FileTypes, 2020)

Die Endung **(.fbx)** steht für ein Format, das zum Austausch von 3D-Geometrie und Animationsdaten verwendet wird. Diese Dateien werden in der Film-, Spiel-, Augmented-Reality- und Virtual-Reality-Entwicklung (AR/VR) verwendet. Der kanadische Softwareentwickler Kaydera entwickelte ursprünglich das proprietäre (.fbx)-Dateiformat, bekannt als FLM, um Daten von Motion-Capture-Geräten zu speichern. Die (.fbx)-Dateien speichern sämtliche Daten von Animationsszenen. Zu diesen Daten gehören Netze, Beleuchtung, Kamera und Geometrie. Schließlich wurde FLM angepasst, um die Visualisierung von 3D-Daten, wie z. B. Charaktere in Szenen, zu unterstützen. Firmen wie Softimage3D, LightWave3D und TurboCAD übernahmen den Dateityp. Im Jahr 2006 übernahm Autodesk den Besitz des (.fbx)-Dateiformats. (Schechter, 2020)

2.4 Renderverfahren

Das Unternehmen Autodesk unterscheidet zwischen vier wesentlichen Renderverfahren:

- Software-Rendering
- Hardware-Rendering
- Vektor-Rendering
- Cloud-Rendering

Software-Rendering nutzt lediglich den Prozessor (CPU) eines Rechners für das Generieren eines Bildes. Das Resultat hierbei ist von besonders hoher Qualität. Als Nachteil lässt sich der höhere Zeitbedarf nennen.

Im Gegensatz zum Software-Rendering verwendet **Hardware-Rendering** die Grafikkarte (GPU). Diese Variante zeichnet sich als schnelleres Verfahren aus, jedoch müssen Qualitätsverluste in Kauf genommen werden.

Ferner wird für die Darstellung von stilisierten Bildern, wie z.B. Drahtgittern, Cartoons, Strichgrafiken oder auch verdeckte Linien, das sogenannte **Vektor-Rendering** eingesetzt. (Autodesk, 2020)

Die Verwendung von **Cloud-Rendering** kann bei richtiger Anwendung den Workflow bedeutend verbessern. Einerseits sind hohe Zeitersparnisse möglich, andererseits kann so die Investition in kostspielige Hardware und Wartung, welche bei einem lokalen Rendering auf dem heimischen Computer anfallen würde, vermieden werden. Besonders von Vorteil ist die ständige Verfügbarkeit des Arbeitsplatzes, auch während des Renderprozesses in der Cloud. Somit kann der Rechner zeitgleich weiterhin produktiv für andere Angelegenheiten genutzt werden. Durch die Nutzung eines Cloud-Rendering Dienstes hat der Anwender sofortigen Zugriff auf eine extern bereitgestellte Rechenleistung. Da jedes Bild parallel und nicht wie auf einer einzelnen Workstation nacheinander gerendert wird, verkürzen sich die Renderzeiten von Stunden auf wenige Minuten. Diese enorme Zeitersparnis hat zur Folge, dass jeder Frame eher auf Qualität als auf Rechenzeit optimiert werden kann. (Griggs, 2016)

Cloud-Rendering wird in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen. Vor allem durch die Auslagerung der Rechenleistung können beispielsweise Laptops und Smartphones noch schlanker konstruiert werden. Die damit einhergehende Flexibilität hinsichtlich der möglichen Mobilität ist ein wesentlicher Vorteil. Dementsprechend ist die Erstellung einer Visualisierung nicht mehr von einer privaten und kostenintensiven Renderfarm abhängig.

2.5 Einflüsse auf die Rechenzeit

Die Zeit, die für ein Rendering benötigt wird, ist von vielen verschiedenen Aspekten abhängig. Vor allem die Hardware spielt neben den Render-Einstellungen eine bedeutende Rolle.

Grundsätzlich gilt, je höher die eingesetzte CPU-Geschwindigkeit, desto besser. Ähnlich verhält es bei der Anzahl der verwendeten Kerne. Auch wenn die Übersetzungsphase kein Multithreading einschließt, profitiert sie von einer besseren CPU. Die Anzahl der Kerne gewinnen in den Phasen Berechnung und Rendern an Bedeutung, denn hier wird mit Multithreading gearbeitet. Diese beiden Phasen lassen sich demzufolge nicht nur durch eine schnellere CPU beschleunigen, sondern profitieren auch nahezu linear von der Anzahl der eingesetzten Kerne. Ein Rendering mit zwei Kernen kann damit fast doppelt so schnell erledigt werden. Praktisch ist bei vielen Programmen die Anzahl der unterstützten Kerne unbegrenzt. (Autodesk, 2018)

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Arbeitsspeicher (RAM). Die Bildsynthese fertigt eine Kopie der Szene an, die vom Rendering-System genutzt wird. In dieser sogenannten Übersetzungsphase wird für jeden Frame eine Kopie erstellt. Demzufolge definiert sich der gesamte benötigte Arbeitsspeicher durch den Speicherbedarf in der Übersetzungsphase und die Software selbst. Es ist deshalb wichtig, dass genügend RAM-Reserven zur Verfügung stehen, um einen effizienten und erfolgreichen Renderprozess zu gewährleisten. Mit Hilfe von Einstellungen der Detailgenauigkeit lässt sich die Arbeitsspeicherauslastung optimieren. (Autodesk, 2018)

Im Gegensatz zur CPU dient die Grafikkarte (GPU) für die Grafikkarte. Zudem wird der eigene Arbeitsspeicher (VRAM) der Grafikkarte als Ablage für die verarbeiteten Daten genutzt. (Stiemer, 2012)

Vor allem für das Rendering von größeren Szenen ist ein ausreichend großer Grafikkartenspeicher unabdingbar. Die Zeit, die für eine Bildsynthese beim sog. Hardware-Rendering benötigt wird, ist damit besonders von der Leistung der eingesetzten Grafikkarte abhängig. Anders verhält es sich beim Software-Rendering, hier hat die GPU keinerlei Einfluss auf die Rendering-Leistung oder -Kapazität. (Autodesk, 2018)

Ferner beeinflusst auch die Szenengestaltung den Zeitaufwand. Die Art und Anzahl der Lichter erhöhen beispielsweise die Rendering-Zeit, da für alle beleuchteten Elemente die jeweiligen Schatten berechnet werden müssen. Auch mit dem Einsatz transparenter Komponenten, z.B. Glas und Relief-Maps, welche Texturen durch die Simulation von Oberflächenunregelmäßigkeiten realistischer erscheinen lassen, werden Renderings rechenintensiver. Der Einsatz von Tiefenschärfe, Videoeffekten (z.B. Farbverläufe, Fades) und Animationen, welche im Filmbereich eingesetzt werden, haben ebenfalls eine Erhöhung der Rechenzeit zur Folge. (Autodesk, 2018)

2.6 Software

Der Softwaremarkt stellt mittlerweile unzählige Produktlösungen, angepasst an die Bedürfnisse der verschiedenen Zielgruppen, zur Verfügung. Neben den Einstellungsmöglichkeiten unterscheiden sich die Programme vor allem wesentlich in der Bedienungsfreundlichkeit. Im Rahmen der Bachelorarbeit standen die nachfolgenden vier Programme für die Visualisierungen zur näheren Auswahl.

2.6.1 3ds Max

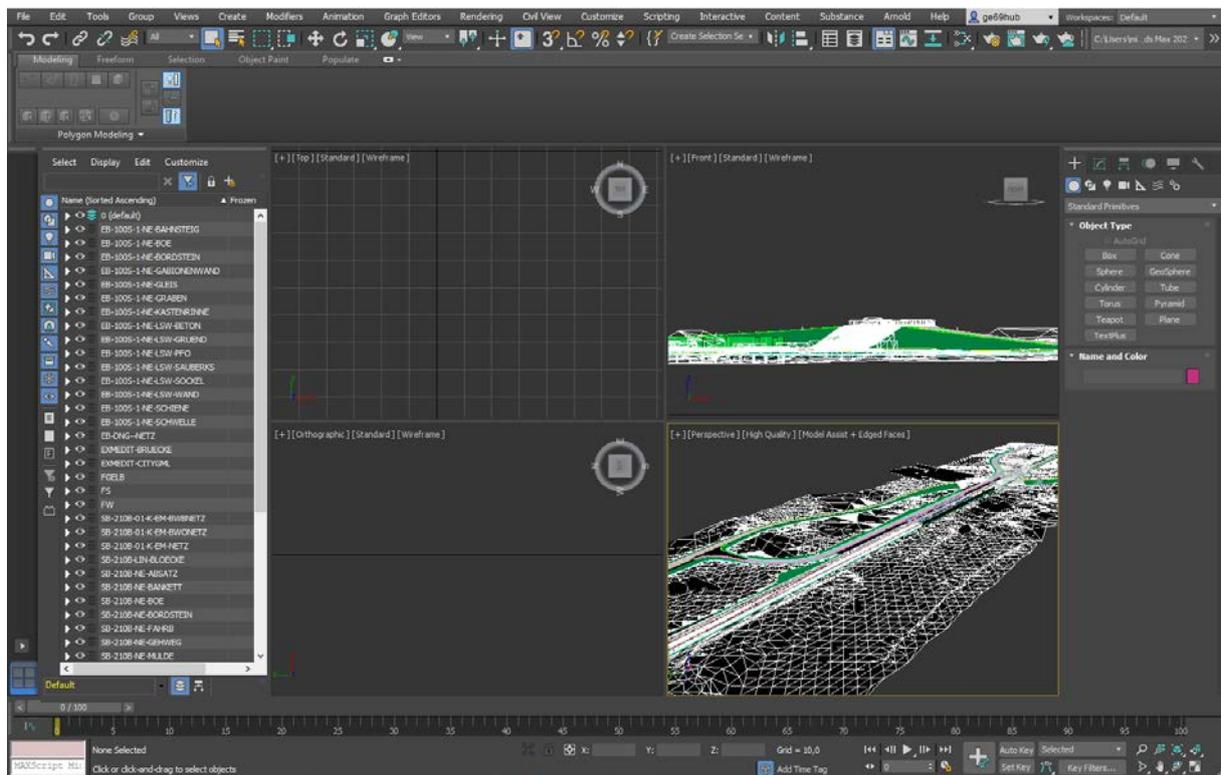


Abbildung 5: Autodesk 3ds Max 2021 Interface

Die Firma Autodesk stellt mit 3ds Max eines der bekanntesten Computergrafikprogramme für die 3D-Modellierung, Animation und Rendering. Die Software wird sowohl zur fotorealistischen Darstellung von Bauwerken als auch von Filmproduzenten und Spieleentwicklern eingesetzt. (Petty, 2020)

3ds Max basiert zum Großteil auf der Polygonmodellierung. Diese Technik bietet neben einer spezifischeren Kontrolle über die Polygone auch eine bessere Optimierung des Modells. Das Programm punktet mit einem umfangreichen Interface (vgl. Abb. 5) und der Plug-In-Funktionalität, welche die Funktionen und Möglichkeiten um ein Vielfaches erweitert. (Tutorialboneyard, 2020)

2.6.2 InfraWorks

InfraWorks wurde speziell als *Building Information Modelling (BIM)* unterstützende Software für die Planung und Konzeption von Infrastrukturbauten, ebenfalls von der Firma Autodesk, konzipiert. Auf der Basis von echten Daten können so Konzeptmodelle im Kontext der topografischen und baulichen Umgebung erstellt (vgl. Abb. 6) und anschließend visualisiert werden. Als besonders hilfreich erweist sich InfraWorks beim Entwurf neuer Trassen und der damit verbundenen verkehrswegebaulichen Beurteilungshilfen. (Autodesk, 2020)



Abbildung 6: Autodesk InfraWorks 2020 Interface

Ferner bietet Autodesk mit InfraWorks 360 Cloud-basierte Funktionen, die es multidisziplinären Projektbeteiligten in geografisch verteilten Büros ermöglichen, große Modelle zentral und sicherer in der Cloud zu veröffentlichen, zu speichern und zu verwalten. Damit können Teams, unabhängig von deren Standort, die Entwurfsabsicht besser überprüfen und Kommentare zu jeder Zeit abgeben. InfraWorks 360 unterstützt so die kollektive Entscheidungsfindung mit quantitativem Echtzeit-Feedback und der Möglichkeit, mehrere Gestaltungskonzepte gleichzeitig zu verwalten. (Imaginit, 2020)

2.6.3 Lumion



Abbildung 7: Lumion 10 Interface

Mit Lumion wurde eine Softwarelösung entwickelt, die besonders einfach zu bedienen ist. Durch das intuitive Interface (vgl. Abb. 7) hat sich Lumion zu einem der am häufigsten verwendeten Produkte von Architekturbüros auf der ganzen Welt entwickelt. Ziel der Software von Act-3D B.V. ist es, dass die Designer und Architekten ihre eigenen Arbeiten rendern können und damit sollen die Lücken, die sonst zwischen Architekten und einem externen 3D-Artist entstehen können, geschlossen werden. Das heißt, je näher der Ersteller der Visualisierung ist, desto genauer wird sie in Bezug auf die Ausrichtung hinsichtlich Designintegrität. Lumion eignet sich daher besonders für kleine und mittlere Unternehmen, die ihre Projekte Inhouse umsetzen möchten. (Easyrender, 2020)

Zu den Präsentationsmöglichkeiten zählen Bilder, Filme und 360°-Panoramen als auch die Unterstützung von virtueller Realität (VR). Ferner wird Lumion in 20 Sprachen angeboten und ist in der Lage, nahezu alle 3D-Modelle aus fast jeder 3D-Modellierungssoftware zu importieren. Im Rahmen der Szenengestaltung stehen mehr als 5.600 fertig einsetzbare 3D-Objekte für den Innen- und Außenbereich zur Auswahl, größtenteils in hochauflösender Qualität. Außerdem stehen mehr als 1.200 detaillierte Materialien zur Verfügung. Lumion eignet sich daher für Entwurfskontrollen, Kunden- und Wettbewerbspräsentationen. (Bau Messe München, 2020)

2.6.4 Twinmotion

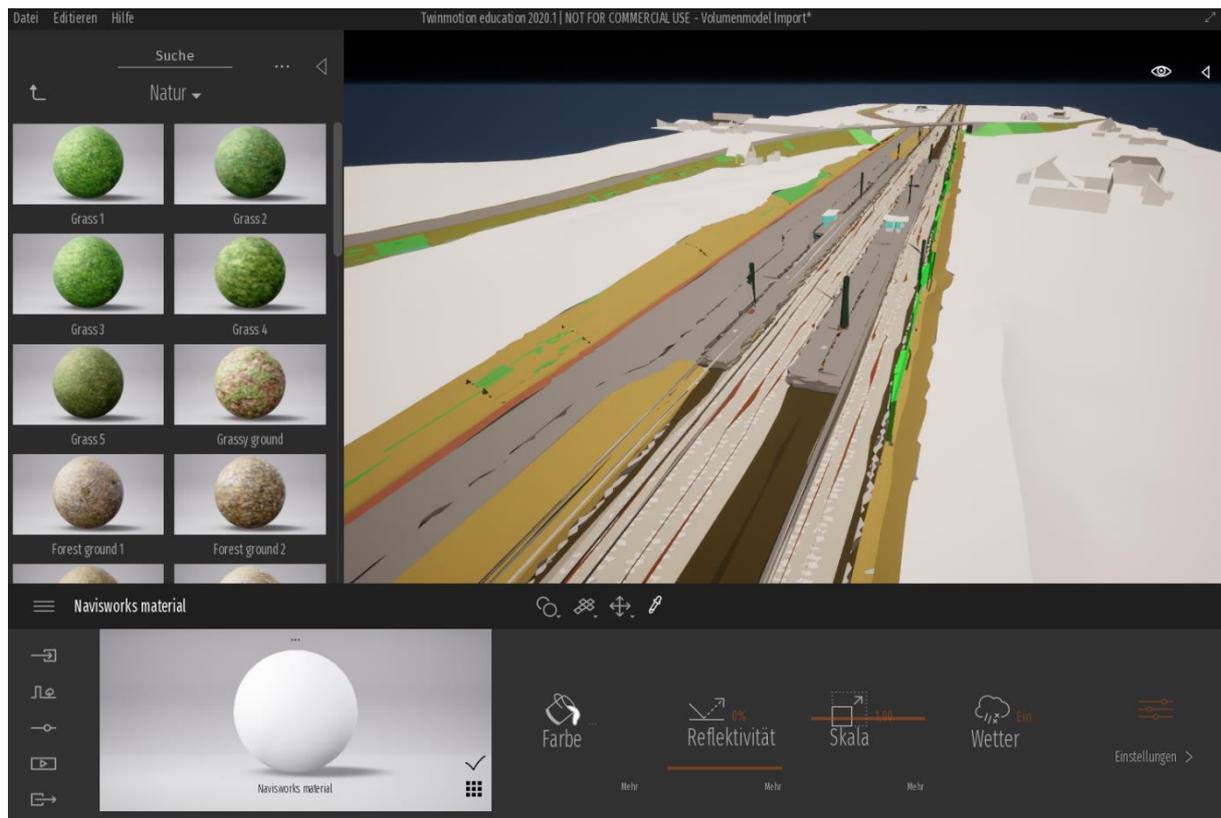


Abbildung 8: Twinmotion 2020 Interface

Das Produkt Twinmotion, entwickelt von dem Unternehmen Epic Games, steht für sehr schnelle und qualitativ hochwertige Visualisierungen. Die Software kombiniert dabei eine intuitive symbolgesteuerte Oberfläche mit der Leistung von Unreal Engine. Die Real-Time-Rendering Technik ermöglicht die Betrachtung und Bearbeitung der Szene in derselben Qualität wie sie auch das finale Rendering haben wird. Ferner wird auch die Erstellung von Panoramen, 360° Videos für VR und interaktive Präsentationen unterstützt. In Abbildung 8 wird ersichtlich, dass der Schwerpunkt, ähnlich zur Software Lumion, auf einem leicht zu erlernenden Interface liegt. (Unreal Engine, 2020)

Twinmotion unterstützt den Anwender direkt beim Entwerfen, indem verschiedene Varianten in Echtzeit ausprobiert werden können und trägt damit wesentlich zur Kommunikation ihrer Projekte bei. Mit Einsatz der Software können sowohl Objekte wie Pflanzen, Personen- und Fahrzeugströme als auch Materialien per *Drag&Drop* direkt in die virtuelle Planungsumgebung gezogen werden. Ferner kann das Einwirken von Wolken, Wind oder Regen in Echtzeit simuliert werden. Dabei erfolgt die Bearbeitung der Szene unmittelbar im dreidimensionalen Anzeigemodus. (Elecsoft, 2020)

3 Rendering – Bildsynthese

“Der Begriff Rendern, oder Rendering leitet sich von „to render“, „machen, leisten, erweisen“ ab und meint im eigentlichen Sinn die Umsetzung einer Skizze im klassischen Design. In der 3D Computergrafik wurde dieser Begriff adaptiert als Computergestützte Berechnung eines Bildes aus einer 3D Szene.“ (The Imagery, 2020)

Sehr oft überschneiden sich die Begriffe Visualisierung, Rendering, 3D-Visualisierung wie auch CGI. CGI ist eine Abkürzung für „Computer Generated Image“ und steht für die Bilder, die durch den Einsatz von speziellen Softwarepaketen digital erzeugt wurden. Ferner lässt sich festhalten, dass Rendern in Bezug auf die 3D-Visualisierungen vor allem das technische Prozedere anspricht, wohingegen CGI für den Ablauf vom Projektbeginn bis hin zum Projektende steht. 1982 kam diese Technologie erstmalig bei dem Film „Tron“ zum Einsatz. Dabei wurde ein Teil der Szenerie mit Hilfe von Computern generiert. Die Schauspieler agierten vor schwarzen und grauen Hintergründen, das Filmmaterial war schwarz-weiß und wurde hinterher per Hand eingefärbt. (The Imagery, 2020)

Heute sind Visualisierungen nicht mehr aus unseren Medien wegzudenken. Im IKEA-Katalog sind beispielsweise knapp 70 % der Bilder digital modelliert und anschließend gerendert. Visualisierungen finden sich deshalb in etlichen Film- und Fernsehproduktionen, Magazinen und besonders im Bereich der Visualisierung von Architektur wieder. (The Imagery, 2020)

In den anschließenden Kapiteln werden nun die technischen Aspekte der Renderprozesses dargestellt.

3.1 Einflüsse auf die Szene

Jede 3D-Szene, unabhängig von der verwendeten Software, besteht nach Zeman aus gewissen Elementen, um eine Visualisierung erzeugen zu können. Es ist daher wichtig ein Grundverständnis zu entwickeln, wie jedes dieser Elemente das resultierende Bild entweder in Echtzeit oder beim Rendering beeinflusst, um das finale Rendering mit den richtigen Einstellungen korrigieren zu können. Zeman nennt dabei die nachfolgenden Elemente.

1. Geometrie – Eine 3D-Szene kann nur dann gerendert werden, wenn eine 3D-Geometrie bereits existiert oder im Zuge des Projektes in einem CAD-Programm modelliert wird. Eine Geometrie besteht aus mathematischen Daten und kann erst durch den Einsatz virtueller Kameras dreidimensional betrachtet werden.

2. Kameras – Die Projektionskameras ahmen die Perspektive des menschlichen Auges oder einer Filmkamera nach. Eine Kamera ist notwendig, um den visuellen Aspekt der Geometrie

zu erzeugen, damit diese später in den einzelnen Pixeln gerendert werden kann. Sie erzeugen zudem die Parallaxe und Perspektive, die den Objekten die entsprechende Darstellung verleihen. Wichtige und einflussreiche Kameraeinstellungen sind die Brennweite, das Sichtfeld und die Tiefenschärfe.

3. Lichter – Lichter sind die Art und Weise, wie eine Szene beleuchtet wird und bestimmen daher den wesentlichen Charakter einer Szene. Ohne jegliche Lichter in einer Szene würde alles dunkel erscheinen. Bei den meisten 3D-Programmen sind die Lichter standardmäßig aktiviert, so dass bei der Interaktion mit der Software und dem Test-Rendering die betroffenen Objekte gesehen werden können. Später werden die wichtigsten Verfahren der Beleuchtung näher betrachtet.

4. Materialien – Materialien sind die Art und Weise, wie Farbe, Textur und alle anderen Informationen für die sogenannte Rendering-Pipeline vorbereitet werden. Die softwareeigenen Bibliotheken umfassen oft unzählige vordefinierte Materialien, die sofort für das Rendering verwendet werden können. Ferner können auch neue Materialien nach den eigenen Vorstellungen konfiguriert werden. (Zeman, 2014)

3.2 Radiosity

Das Radiosity-Verfahren dient der Modellierung der Lichtausbreitung in einer Umgebung, die diffus reflektiert. Da jeder Gegenstand, der direkt belichtet wird auch als Lichtquelle wirkt, besitzen Flächen, die nicht direkt beleuchtet werden, ebenfalls eine gewisse Helligkeit. Mit Hilfe dieses Verfahrens werden so die jeweiligen Helligkeiten der Oberflächen unter Beachtung der gegenseitigen Beleuchtung ermittelt. Zu Beginn der Bildsynthese wird ohne bekannter Kameraposition die räumliche Lichtausbreitung berechnet, wobei der Einfluss des Betrachters auf den Lichteinfall vernachlässigt wird. So wird eine ständige Neuberechnung der Lichtausbreitung vermieden. Radiosity kann damit als blickpunktunabhängige Variante zur Helligkeitsermittlung beschrieben werden. (Purgathafer, 2020)

Dieses physikalische Beleuchtungsverfahren, wobei die spezifische Beleuchtungsstärke in der Einheit Lux ermittelt wird, eignet sich besonders für die Lichtverteilung innerhalb von Gebäuden. (Krömker, 2001)

3.3 Rasterization

Rasterization – bzw. im Deutschen auch Rasterung – wird schon lange in der Echtzeit-Computergrafik für die Darstellung von dreidimensionalen Objekten auf einem zweidimensionalen Bildschirm verwendet. Das Verfahren ist besonders schnell, auch wenn sich die Resultate nicht immer auf dem selbem hohen Niveau bewegen wie bei dem sogenannten Raytracing. (Caulfield, 2018)

Bei der Rasterung werden Objekte auf dem Bildschirm aus einem Netz virtueller Dreiecke oder Polygone erstellt, welche für die Darstellungen von 3D-Modellen zuständig sind. In diesem virtuellen Netz schneiden sich die Ecken jedes Dreiecks – die so genannten Vertices – mit den Vertices anderer Dreiecke unterschiedlicher Größe und Form. Ferner sind jedem Scheitelpunkt zahlreiche Informationen zugeordnet, einschließlich seiner Position im Raum sowie Informationen über Farbe, Textur und seine zugehörige Normale, mit der die Ausrichtung der Oberfläche eines Objekts bestimmt wird. (Caulfield, 2018)

Rasterization und Raytracing haben gemeinsam, dass sie im Wesentlichen Techniken aus der Geometrie verwenden, um das sogenannte Sichtbarkeitsproblem zu lösen. Die Rasterung geht den dabei umgekehrten Weg. Um die Sichtbarkeit zu lösen, projiziert das Verfahren die betrachteten Dreiecke auf die Leinwand. In Abbildung 9 wird ersichtlich, dass mit Hilfe der perspektivischen Projektion aus einem dreidimensional betrachteten Dreieck eine zweidimensionale Darstellung erzeugt wird. Dies lässt sich leicht erreichen, indem die Eckpunkte, aus denen das Dreieck besteht, auf den Bildschirm projiziert werden. Der nächste Schritt im Algorithmus besteht darin, alle Pixel des Bildes, die von diesem zweidimensionalen Dreieck abgedeckt werden, aufzufüllen. Diese beiden Schritte sind in Abbildung 9 dargestellt. Technischen gesehen handelt es sich hierbei um ein sehr einfaches Verfahren. Die Projektionsschritte erfordern lediglich eine perspektivische Unterteilung und eine Neuordnung der resultierenden Koordinaten vom Bildraum zum Rasteraum. (Scratchapixel, 2020)

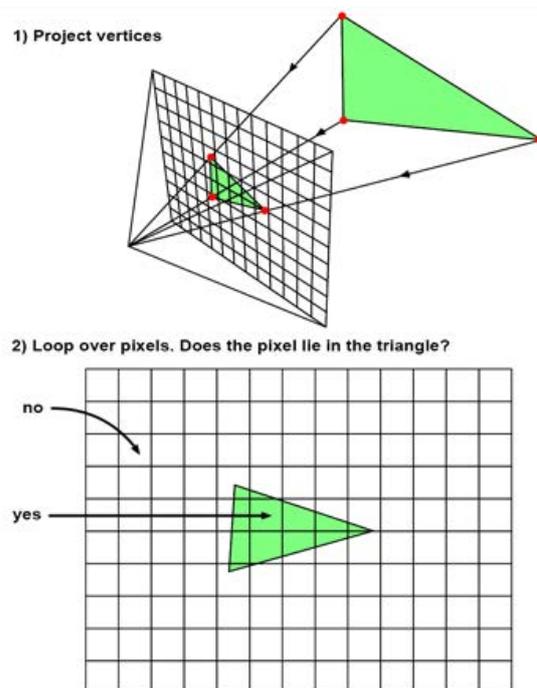


Abbildung 9: Darstellung Rasterization
(Quelle: Scratchapixel, 2020)

Computer wandeln anschließend die Dreiecke der 3D-Modelle in Pixel oder Punkte auf einem 2D-Bildschirm um. Jedem Pixel kann ein anfänglicher Farbwert aus den in den Dreieckspunkten gespeicherten Daten zugewiesen werden. Der Prozess kann jedoch sehr rechenintensiv

Computer wandeln anschließend die Dreiecke der 3D-Modelle in Pixel oder Punkte auf einem 2D-Bildschirm um. Jedem Pixel kann ein anfänglicher Farbwert aus den in den Dreieckspunkten gespeicherten Daten zugewiesen werden. Der Prozess kann jedoch sehr rechenintensiv

sein. Eine Szene kann Millionen von Polygonen umfassen, abhängig vom Detaillierungsgrad und der Anzahl der Objekte. Zudem können etwa 8 Millionen Pixel in einem 4K-Display verwendet werden. Und jedes Bild, das im Rahmen einer Videosequenz auf einem Bildschirm angezeigt wird, wird normalerweise 30- bis 90-mal pro Sekunde auf der Anzeige aktualisiert. (Caulfield, 2018)

Aus diesem Grund sind laut Caulfield vor allem moderne, grafisch anspruchsvolle Computerspiele und Real-Time-Rendering auf leistungsstarke GPUs angewiesen.

3.4 Raytracing

Während beim Raycasting ein Strahl von einem Ort ausgesandt wird um zu bestimmen, welche Objekte sich in einer bestimmten Richtung befinden, wird Raytracing für die Bestimmung des Lichttransports zwischen verschiedenen Szenenelementen verwendet. (Akenine-Möller, Haines, & Hoffman, 2018)

Grundsätzlich werden Strahlen von der Kamera durch das Pixelraster sinnbildlich in die Szene geschossen. Für jeden Strahl wird somit das nächstgelegene Objekt identifiziert. Für diesen Schnittpunkt wird anschließend überprüft, ob er im Schatten liegt. Dafür wird ein Strahl zu jedem Licht aufgenommen und untersucht, ob sich dazwischen Objekte befinden (vgl. Abbildung 10). Während undurchsichtige Objekte das Licht blockieren, schwächen es transparente Objekte ab. (Akenine-Möller et al., 2018)

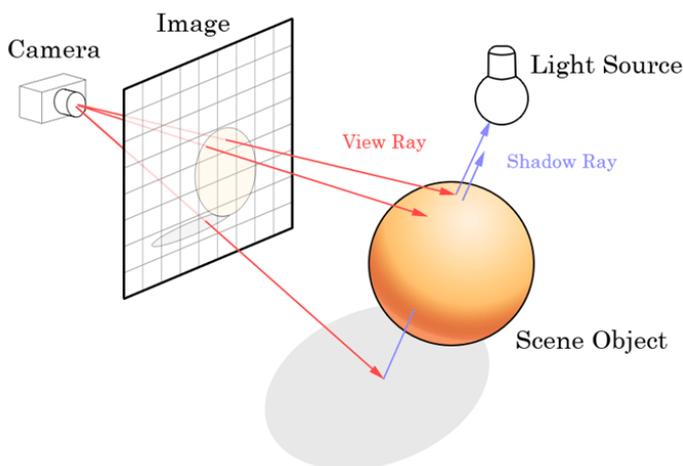


Abbildung 10: Darstellung Raytracing (Quelle: Hearn, 2019)

Von einem Schnittpunkt aus können auch andere Strahlen erzeugt werden. Wenn beispielsweise eine Oberfläche glänzend ist, wird ein Strahl in Richtung der Reflektion erzeugt. Dieser Strahl nimmt die Farbe des zuerst geschnittenen Objekts auf, dessen Schnittpunkt wiederum auf Schatten getestet wird. Es können auch Strahlen in Richtung der Lichtbrechung für transparente Festkörperobjekte erzeugt

und anschließende rekursiv (rekursives Raytracing) ausgewertet werden. Die klassischen Raytracing-Verfahren umfassen nur eine begrenzte Menge an Effekten: scharfe Reflexionen und Brechungen sowie harte Schatten. (Akenine-Möller et al., 2018)

3.5 Path Tracing

Anstatt eines einzigen Strahls werden beim Path Tracing-Verfahren unzählige Strahlen für jedes zu rendernde Pixel ausgesandt. Wenn diese auf eine Oberfläche treffen, zeichnet das Verfahren nicht den Weg zu jeder Lichtquelle nach, sondern der Strahl prallt so lange von der Oberfläche ab bis er auf eine Lichtquelle trifft oder eine Abprallgrenze erreicht hat (vgl. Abbildung 11). (Dusterwald, 2016)

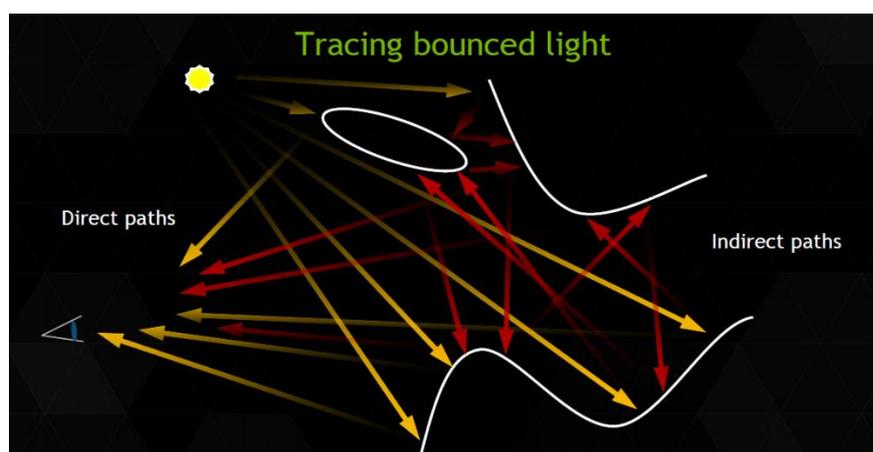


Abbildung 11: Darstellung Path Tracing (Quelle: Rados, 2014)

Anschließend wird die Lichtmenge berechnet, die auf dem ganzen Weg zum Pixel übertragen wird, einschließlich aller Farbinformationen, die von den passierten Oberflächen gesammelt werden. Schließlich wird der Mittelwert aus den

berechneten Werten aller Pfade gebildet, die innerhalb der Szene gesammelt wurden, um den endgültigen Farbwert des Pixels zu erhalten. Dieses Verfahren erfordert enorm viel Rechenleistung. Die Lichtquellen benötigen im Gegensatz zu Raytracing und Rasterization eine tatsächliche Größe, damit die Erstellung eines Schnittpunkts möglich ist. Mit diesem Verfahren wird all das Realität, was die Raytracing-Technik nicht ohne weiteres liefert: weiche Schatten, Kaustik und Global Illumination (GI). Jedoch können sehr komplexe Oberflächen (beispielsweise Haut) immer noch nicht vollständig von Path Tracing simuliert werden, hierfür werden zusätzlich bestimmte Shader benötigt, um diese vorzutäuschen. (Dusterwald, 2016)

Path Tracing wird laut Dusterwald durch den ständigen technischen Fortschritt und den damit einhergehenden Weiterentwicklungen der Rechenleistung in Zukunft mehr Anwendung finden, zumal im Gegensatz zu Raytracing und Rasterization weniger Feintuning erforderlich ist. Das bedeutet weniger Arbeit für die Illustratoren, um hochwertige fotoreale Ergebnisse zu erzielen. Abgesehen davon kann derzeit die Verwendung eines Path Tracers nicht unter allen Umständen empfohlen werden. Letztendlich geht es nur darum, das richtige Werkzeug für die Aufgabe zu wählen.

Für Einzelbilder, bei denen so viel Qualität wie möglich gewünscht wird und kein Zeitdruck besteht, eignet sich Path Tracing bestens. Wenn hingegen eine größere Anzahl an Bildern (Videoanimation) bevorsteht, ist Path Tracing ohne einer Renderfarm nicht empfehlenswert aufgrund des hohen Zeit- bzw. Rechenbedarfs. (Dusterwald, 2016)

3.6 Schattierungsverfahren – Shading

Durch den Einsatz von Schattierungsverfahren können Körper und Flächen in 3D-Grafiken realistischer dargestellt werden. Voraussetzung hierfür ist eine bereits vorhandene Beleuchtung des Körpers wobei Körperform, Körperkonturen als auch Krümmungen und Unebenheiten von Elementen plastisch hervortreten. Ferner können mit diesem Verfahren Lichtreflexionen auf der Oberfläche bestimmt werden. Es wird unterschieden zwischen Flat-Shading, Gouraud-Shading, Phong-Shading, Vertex- und Pixel-Shader, welche nachfolgend näher betrachtet werden. (ITWissen, 2012)

3.6.1 Flat-Shading

Das Flat-Shading wird von jeder Grafikkarte unterstützt und kann daher den einfachen Schattierungsverfahren für die Darstellung von gekrümmten Oberflächen zugeschrieben werden.



Abbildung 12: Flat-Shading
(Quelle: ITWissen, 2013)

“Beim Flat-Shading wird die Beleuchtung eines polygonalen Körpers an einem Oberflächenpunkt ausgewertet und die Farbfacetten mit der ermittelten Farbe dargestellt. Jedes einzelne Polygon wird mit einer Farbe dargestellt. Da die aneinander stoßenden Polygone unterschiedlichen [sic!] Farben haben, sind die Kanten in den Polygonnetzen deutlich zu erkennen.“ (ITWissen, 2013)

In Abbildung 12 wird ersichtlich, dass die einzelnen Polygone keinen Farbverlauf in sich haben. Als Beispiel lässt sich ein Würfel nennen, bei welchem jede Seite aus einem Polygon besteht. Eine Betrachtung ergäbe eine Sichtbarkeit von drei Würfelseiten in folglich nur drei möglichen Farbvarianten. (ITWissen, 2013)

3.6.2 Gouraud-Shading

Gouraud-Shading ist die populärste Variante, die dem Schattierungsprozess von Polygonen dient. Während beim Flat-Shading ein einziger Farbwert für das komplette Polygon bestimmt wird, werden hier die jeweiligen Farbwerte an den Eckpunkten, auch Vertex genannt, berechnet (vgl. Abb 13). Mit Hilfe linearer Interpolation werden alle Kanten des Polygons schattiert, wobei sich realitätsnahe Farbverläufe entwickeln. Gekrümmte Oberflächen lassen sich damit verbessert und mit Einsatz von weniger Polygonen darstellen. Bei Reflektionen kommt das Verfahren jedoch an sein Limit. (Spoerl & Haluschak, 2001)

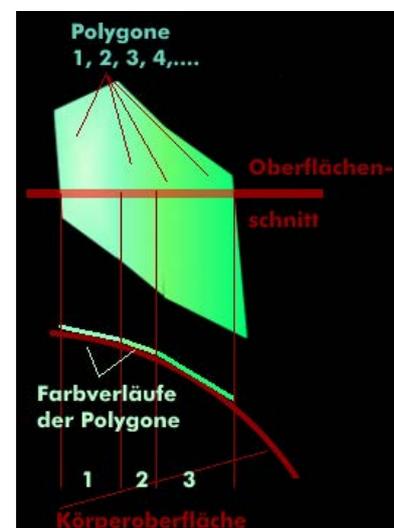


Abbildung 13: Gouraud-Shading
(Quelle: ITWissen, 2013)

3.6.3 Phong-Shading

Als Vertreter der Gruppe Smooth-Shading dient auch Phong-Shading der Beleuchtungsrechnung. Genau wie das Gouraud-Shading, ist auch das Phong-Shading dem Flat-Shading hinsichtlich der Darstellung der Farbverläufe, speziell bei gekrümmten Oberflächen, weit überlegen. Des Weiteren ist es besonders für das Rendern einer Szene, die mit spiegelnden oder glänzenden Objekten ausgestattet sind, geeignet. Während bei Gouraud-Shading Farbwerte interpoliert werden, interpoliert das Phong-Shading die Normalenvektoren. (Spektrum Akademischer Verlag, 2001)

“Der Farb- und Helligkeitswert für jeden Punkt wird über die Orientierung der ermittelten Normalen, d.h. über den Winkel des einfallenden Lichtstrahls mit dem Normalenvektor ermittelt. Spiegelungen werden dadurch sehr gut sichtbar, wobei dieses Verfahren weder Schatten noch Transparenz kennt.“ (Spektrum Akademischer Verlag, 2001)

3.6.4 Pixel-Shader

Ein Pixel-Shader ist ein kleines Programm, das Pixel verarbeitet und auf der Grafikkarte des Rechners (GPU) ausgeführt wird. Es wird nicht von jeder Grafikkarte unterstützt. Pixel-Shader müssen in der Regel durch den sogenannten Vertex-Shader gesteuert werden. Um beispielsweise die Beleuchtung pro Pixel zu berechnen, benötigt der Shader die Orientierung des Dreiecks, die Orientierung des Lichtvektors und in einigen Fällen die Orientierung des Ansichtsvektors. (Ubisoft, 2020)

Der Pixel-Shader eignet sich deshalb besonders für die Darstellung von Spiegelungen und in Computerspielen auch für die Illustration von Echtzeit-Schatten. Bei der Verarbeitung der Pixel der jeweiligen Oberflächen werden dabei insbesondere die Materialeigenschaften aber auch Transparenz, Licht, etc. miteinbezogen. Das Resultat ist eine realitätsnahe Darstellung der Objekte. (ComputerBild, 2018)

3.6.5 Vertex-Shader

Der Vertex-Shader wird verwendet, um die Attribute von Vertices (Punkte eines Dreiecks) wie Farbe, Textur, Position und Richtung aus dem ursprünglichen Farbraum in den Anzeigebereich zu transformieren. Er ermöglicht es, die ursprünglichen Objekte auf beliebige Weise zu verzerren oder umzuformen. (Pcmag, 2020)

Während beim Phong-, Flat- und Gouraud-Shading die Beleuchtung von Texturen und Oberflächen berechnet wird, dient der Vertex-Shader bei Lichteinfall- und Formveränderungen. Der Shader entlastet dabei die Grafikkarte (GPU). (Bullhost, 2018)

3.7 Beleuchtung – Lightning

Lichter sind für die Erzeugung von Helligkeit in einer Szene verantwortlich – ohne sie gäbe es nichts zu rendern. Die Lichtquellen werden so platziert, dass das Modell ein möglichst realistisches 3D-Erscheinungsbild erhält. Zeman formuliert die wichtigsten Lichtarten:

- Ambient Light
- Directional Light
- Point Light
- Spotlight
- Global Illumination
- Area Light

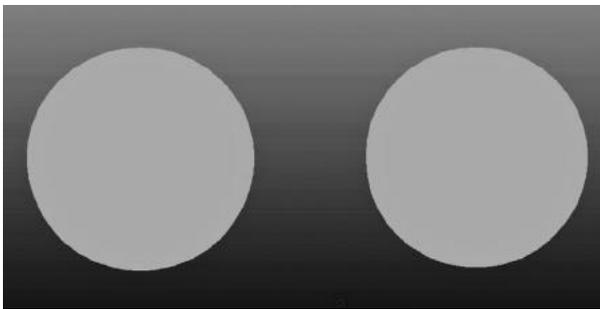


Abbildung 14: Beleuchtung mit Ambient Light (Quelle: Zeman, 2014)

Ambient Light – auch Umgebungslicht genannt, ist das unkomplizierteste Licht. Sinnbildlich vorgestellt, wirft es von allen Richtungen aus gleichzeitig Licht, wobei das zur Folge hat, dass keine Licht- und Schattenbereiche entstehen können. Daher eignet es sich am besten zur globalen Aufhellung oder Tönung einer Szene. In Abbildung 14 ist der

Effekt von Umgebungslicht ersichtlich. Es handelt sich hierbei um zwei Kugeln, die mit Hilfe von Ambient Light beleuchtet werden. Das Resultat ist sehr verwaschen und hat kein dreidimensionales Erscheinungsbild. Das liegt daran, dass sich die Beleuchtung über die gesamte Oberfläche nicht verändert. Das Licht wirft in allen Winkeln gleichzeitig auf alle Scheitelnormalen, wodurch die Beleuchtung völlig gleichmäßig ist. Folglich wird Ambient Light lediglich dazu verwendet, um die natürlichen Lichtverhältnisse zu verstärken oder eine Szene global aufzuhellen, ohne die bestehende Lichtanordnung zu verändern. (Zeman, 2014)

Directional Light – bzw. gerichtetes Licht, wirft Licht in einem Vektor oder einer Richtung unendlich weit. Das bedeutet, dass unabhängig von der Position des Lichts im Raum, die Strahlen immer aus einem bestimmten Winkel kommen, der durch die Rotation des Lichtknotens bestimmt wird. In Abbildung 15 sind zwei Kugeln sichtbar, die beide vom gleichen gerichteten Licht (welches sich zwischen ihnen befindet) beleuchtet werden. Trotz der Tatsache, dass sich das Licht vor der Kugel rechts vom Bildschirm befindet, wird es immer noch auf genau die gleiche Weise beleuchtet wie die Kugel davor. Das liegt daran, dass der

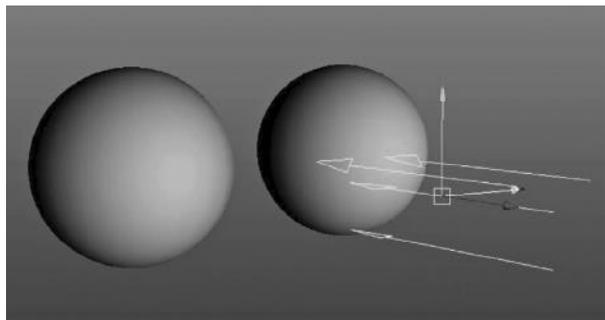


Abbildung 15: Beleuchtung mit Directional Light (Quelle: Zeman, 2014)

Einfallswinkel des Lichts steuert, wie das Licht auf das Objekt wirkt, und nicht die Position des Lichts. Das Directional Light wird oft für die Simulation der Sonne verwendet, da ihre Eigenschaften ähnlich sind und die Tageszeit durch einfaches Drehen des gerichteten Lichts animiert werden kann. Aus diesem Grund werden Außenszenen im Allgemeinen primär mit einem einzigen gerichteten Licht beleuchtet. (Zeman, 2014)

Point Light – auch Punktlicht genannt – ähnelt der Funktionsweise einer Glühlampe. Es handelt sich dabei um einen Punkt im Raum, der Licht in alle Richtungen ausstrahlt. Das Verschieben des Lichts verändert die Wirkung auf die schattierten Objekte (im Gegensatz zum Directional Light), jedoch bewirkt eine Drehung des Punktlichts nichts, da es das Licht, laut Zeman, immer in alle Richtungen ausstrahlt.

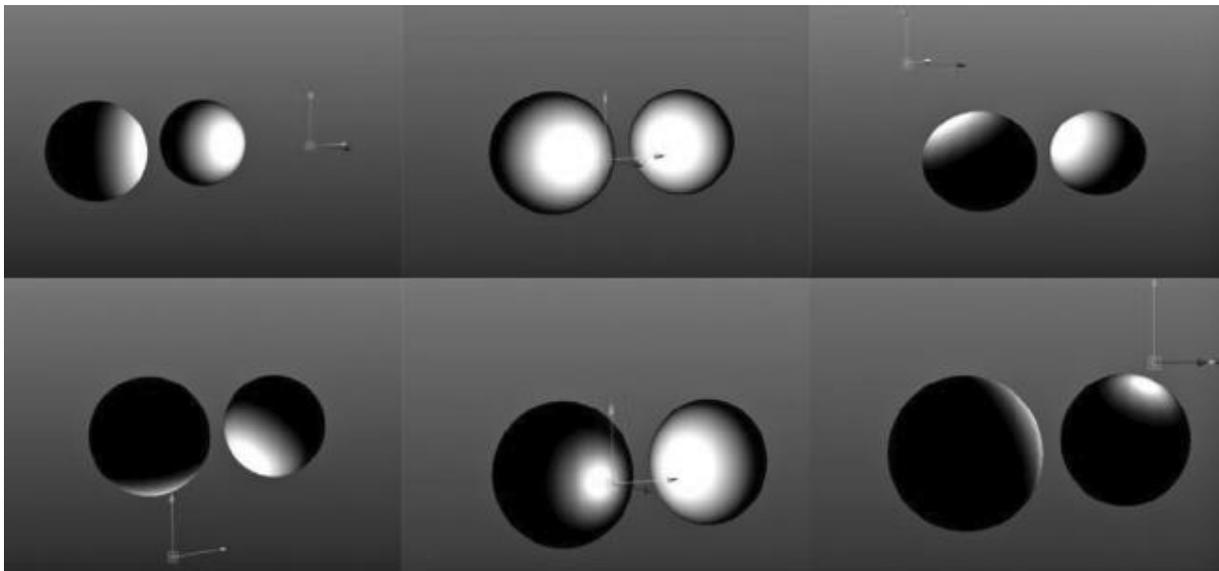


Abbildung 16: Verschiedene Positionen eines Punktlichts und deren Auswirkungen (Quelle: Zeman, 2014)

Abbildung 16 verdeutlicht, dass es mehrere Bilder von Kugeln gibt, die von einem einzigen Punktlicht an verschiedenen Orten beleuchtet werden. Im Gegensatz zum gerichteten Licht scheint das Punktlicht auf verschiedene Teile der beiden Kugeln im Bild, weil das Licht von einem Punkt im Raum statt von einem Winkel geworfen wird. Punktlichter werden im Allgemeinen für offene Quellen von Innenlicht verwendet, wie z.B. Glühlampen, Kerzen oder ähnliche Objekte. Punktlichter sind beim Rendern besonders aufwendig zu berechnen, da jeder Winkel des Lichts zu jeder Polygonnormalen berechnet werden muss. (Zeman, 2014)

Spotlight, ist im Wesentlichen ein Lichtkegel, der durch ein im Abstrahlwinkel begrenztes Punktlicht (vgl. Abb. 17) entsteht. Es findet vor allem bei der Darstellung von Deckenstrahlern oder auch bei Autoscheinwerfern Anwendung. Grundsätzlich können Spotlights wesentlich schneller gerendert werden, da nur die Lichtstrahlen innerhalb des Abstrahlwinkels berechnet werden müssen. (Zeman, 2014)

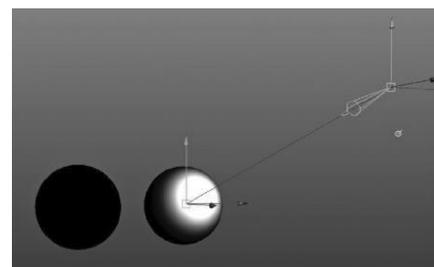


Abbildung 17: Beleuchtung mit Spotlight (Quelle: Zeman, 2014)

Global Illumination (GI) sorgt für eine sehr realitätsnahe Verteilung des Lichtes in einer 3D-Szene. Während 3D-Artists einzelne Lichtquellen selbst geschickt im Rahmen der Szene verteilen können, ermöglicht die Global Illumination Technik auch unerfahrenen Illustratoren den einfachen Einsatz einer Lichtverteilung, die sehr stark der Realität entspricht. Nachteilig hierbei ist der hohe Rechenaufwand, da generell jeder Objektpunkt fähig ist, Licht abzustrahlen. (Maxon, 2020)



Abbildung 18: Szene links mit Flächenlicht, rechts mit Global Illumination (Quelle: Schönmann, 2020)

Bei der Betrachtung von Abbildung 18 fällt zur rechten Seite die harmonischere Lichtverteilung auf, wohingegen links (ohne GI) viele dunkle Bereiche bleiben. (Maxon, 2020)

Area Light – auch Flächenlicht genannt – simuliert Licht, das von einer emittierenden Oberfläche stammt. Beispielhaft finden Flächenlichter Anwendung bei der Visualisierung von Büros (vgl. Abbildung 19), Fernsehbildschirmen oder auch als bewölkter Himmel. Das Flächenlicht erzeugt Schatten mit weichen Rändern indem es ein Licht entlang eines Rasters abtastet, dessen Größe vom Benutzer definiert wird. Dies steht in direktem Kontrast zu dem punktförmigen Kunstlicht, das hingegen scharfe Ränder erzeugt. (Blender, 2020)

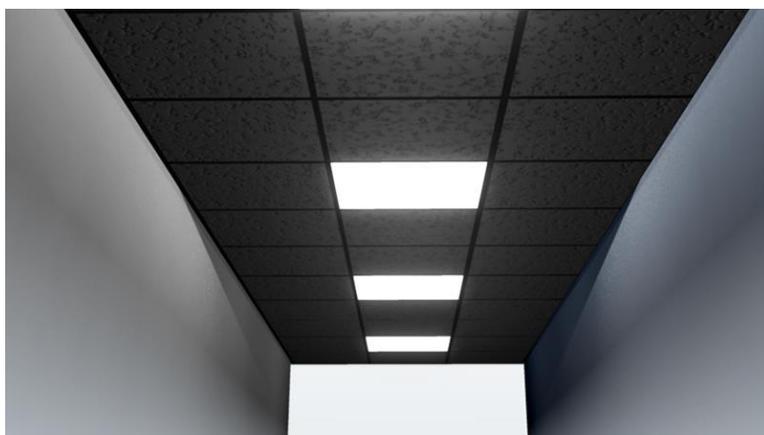


Abbildung 19: Einsatz von Area Lights (Quelle: Pluralsight, 2014)

3.8 Anti-Aliasing

Bei genauer Betrachtung eines Monitors fällt auf, dass der Bildschirm aus kleinen Quadraten, den sogenannten Pixeln, besteht. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um kleine rechteckige Lichter, die für die Anzeige von Inhalten sorgen. In Abbildung 20 wird jedoch ersichtlich, dass die verbleibende quadratische Restgröße der Pixel

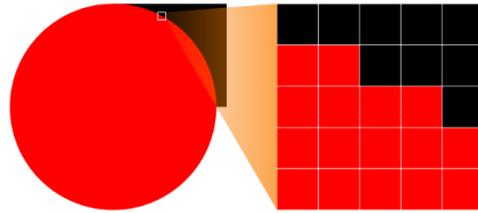


Abbildung 20: Darstellung eines Kreises mit Pixeln (Quelle: Mills, 2020)

zu einem Bild mit einem gezackten Rand – auch Treppeneffekt genannt – führt. Ein Lösungsansatz ist die Erhöhung der Auflösung der Monitore. Ein Bildschirm, der beispielsweise in 4k (3840×2160 Bildpunkte) auflöst, kann ein viel schärferes und detailreicheres Bild wiedergeben als einer, der nur in High Definition (1280×720 Bildpunkte) auflöst. Folglich lindert eine höhere Auflösung das Problem, jedoch bleibt es weiterhin in einem kleineren Maßstab bestehen. Eine Technik, die versucht dieses Darstellungsproblem zu lösen, wird Anti-Aliasing (AA) genannt. Oftmals wird auch von Kantenglättung gesprochen. Das Problem ist demnach Aliasing, das von Frost wie folgt definiert wird. (Frost, 2020)

“In gerasterten oder in Pixeln gerenderten Bildern werden [...] Zacken weitgehend durch Aliasing verursacht. Dies geschieht aufgrund von Bildverzerrungen, wenn die Scan-Konvertierung mit niederfrequenter Abtastung (oder Unterabtastung) durchgeführt wurde. Aliasing tritt auf, wenn reale Objekte, die glatte und kontinuierliche Kurven haben, mit Pixeln gerastert wurden, um ein Bild zu erzeugen.“
(Frost, 2020)

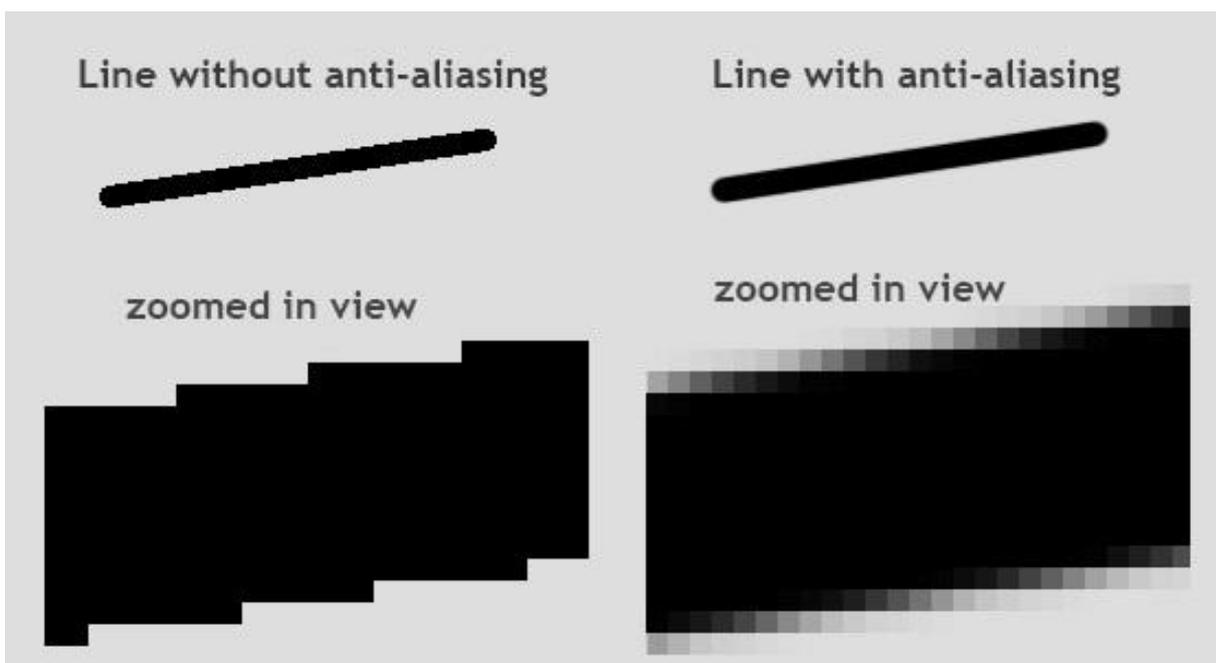


Abbildung 21: Anwendung von Anti-Aliasing (Quelle: Mills, 2020)

In Abbildung 21 wird eine Linie zweifach dargestellt, links ohne und rechts mit Einsatz von AA. Nach einem direkten Vergleich der beiden Bilder ist links ein klarer Treppeneffekt ersichtlich, bedingt durch die schräge Darstellung der Linie. Es wäre allerdings kein Unterschied erkennbar, wenn die Linie exakt horizontal oder vertikal, also parallel zum Pixelraster verlaufen würde. (Mills, 2020)

Im rechten Bild bewirkt Anti-Aliasing eine wesentlich weichere Darstellung der Linie, so dass der Eindruck einer durchgehenden, natürlichen Linie vermittelt wird. Im Zoom ist die Kantenglättung klar zu erkennen, wobei die umgebenden Pixel entsprechend angepasst werden und damit bei naher Betrachtung verschwommen erscheinen. (Mills, 2020)

“Beim Glätten werden diese treppenstufenartiger [sic!] Kanten in digitalen Bildern durch Ermittlung eines Mittelwerts der Pixelfarben an einer Grenze ausgeglichen.“
(Adobe, 2017)

Als Nachteil dieses Verfahrens lässt sich der höhere Rechenaufwand ebenso wie das unschärfere Erscheinungsbild bei der Betrachtung von Kanten nennen.

Ferner differenziert Mills zwischen den Arten von Anti-Aliasing. Die gängigsten Verfahren sind:

- Supersampling Anti-Aliasing (SSAA)
- Multisampling Anti-Aliasing (MSAA)
- Fast Approximate Anti-Aliasing (FXAA)

Supersampling Anti-Aliasing, als eines der ersten Verfahren, eignet sich besonders für fotorealistic Renderings, weil mit Hilfe der Kantenglättung die zuerst harten Linien weicher dargestellt werden. Das sorgt für einen realitätsnäheren Auftritt. (Frost, 2020) Im Grunde genommen wird das Bild mit einer höheren Auflösung gerendert und anschließend mit einem Filter herunterskaliert. Scharfe Kanten werden durch die Verkleinerung entzerrt. (Atwood, 2011) Nachteile entstehen bei horizontalen und vertikalen Linien, da auch diese korrigiert werden. Aufgrund des sehr hohen Rechenaufwands wird es sehr selten in Spielen verwendet. (Frost, 2020)

Multisampling Anti-Aliasing benötigt hingegen etwas weniger Rechenleistung, da nur die Polygonkanten geglättet werden. Die Texturen werden lediglich vom Ursprungszustand übernommen, was jedoch zu verpixelten Texturen führen kann. Aufgrund der Effektivität wird dieses Verfahren gerne bei Echtzeit Renderings eingesetzt, vor allem bei Spielen. (Frost, 2020)

Fast Approximate Anti-Aliasing zählt zu den schnellsten und effizientesten Verfahren, weil es Polygone und Linienkanten ignoriert und lediglich die Pixel auf dem Bildschirm analysiert. Es handelt sich dabei um ein Pixel-Shader-Programm, das jedes Bild innerhalb von ein oder zwei Millisekunden analysiert. Sobald Pixel erkannt werden, die einen Treppeneffekt erzeugen, werden diese geglättet. (Atwood, 2011)

3.9 Texturierung – Texture Mapping

“Texture Mapping ist eine effiziente Methode um einer Oberfläche mehr Realismus und Details hinzuzufügen, ohne dass weitere Geometrie erzeugt werden muss. Anschaulich kann man das Verfahren wie folgt beschreiben: Ein Poster wird an eine weiße Wand geklebt, dort entsteht nun möglicherweise ein komplexes, räumliches Bild, ohne dass man die Oberfläche der Wand geometrisch verändert hat.“
(Vöhringer, 2020)

Ein computergeneriertes 3D-Modell ist erst dann wirklich fertig und bereit zum Rendern, wenn es Farbe und Informationen über die Unebenheit oder Glätte seiner Oberfläche erhalten hat. Eine Textur ist das oberflächliche Erscheinungsbild, das einem Objekt zugewiesen wird. Bei der Textur kann es sich in der einfachsten Form um eine Volltonfarbe handeln. Genauso gut kann es ein Bitmap-Bild sein, das auf die Oberfläche aufgetragen wird. Ferner sind auch prozedurale Texturen möglich, welche mit Hilfe mathematischer Algorithmen erstellt werden und anschließend Muster erzeugen, die geordnet oder chaotisch erscheinen können. Texturen können auch zusätzliche Informationen enthalten, um beispielweise eine holprige Kopfsteinpflasterstraße visuell zu ermöglichen. Ein Material kann typischerweise als die Kombination von Textur und Shadern beschrieben werden. (Chopine, 2011)

3.9.1 Projection Mapping



Abbildung 22: Projection Mapping (Quelle: Chopine, 2012)

Eine gängige Technik für das Anwenden von 2D-Texturen auf 3D-Objekte ist das „**Projection Mapping**“. Das Verfahren kann grundsätzlich mit dem Verpacken eines Geschenks in Form eines Würfels verglichen werden. Dies funktioniert gut, um sich den endgültigen Effekt vorzustellen, beschreibt jedoch bei Weitem nicht alle Dinge, die beim Mapping einer Textur auf ein Objekt berücksichtigt werden müssen. Des Weiteren sind die meisten Objekte keine einfachen Quader. Die Ränder der Textur müssen folglich zueinander passen und dürfen sich nicht überlappen oder gar Lücken hinterlassen. Eine Methode, ein Bild auf die Oberfläche eines Objekts

zu übertragen, wird als „**planar projection**“ bezeichnet. Wie der Name schon sagt, wird das Bild auf die Oberfläche projiziert, ähnlich dem Funktionsprinzip eines Filmprojektors. Dabei kann dieses Bild bewegt, gedreht und geschert werden. Der Einsatz der planaren Projektion eignet sich besonders bei flachen Oberflächen, z.B. bei einer Reklametafel. Hingegen kann das Bild bei der Projektion auf nicht ebenen Oberflächen verzerrt oder zerstückelt erscheinen (vgl. Abbildung 22 links). Es existieren neben dieser noch weitere Arten der Projektionsabbildung. Bei der sogenannten „**cube/box projection**“ wird die Textur in sechs verschiedene Quadrate aufgeteilt, die dann zu einem Würfel gefaltet und auf die Oberfläche projiziert werden. Bei der „**cylindrical projection**“ wird das Bild vor der Projektion zu einer Röhre aufgerollt (vgl. Abbildung 22 mitte). Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die „**spherical projection**“ zu erzeugen, aber die Grundidee besteht darin, dass das Muster zu einer Kugel geformt wird, bevor es auf die Oberfläche projiziert wird (vgl. Abbildung 22, rechts). Die Wahl der Projektion hängt damit wesentlich von der Form der Geometrie ab. (Chopine, 2011)

Folglich ist das „Projection Mapping“ effizient für die Texturierung von Grundformen, z.B. bei einem Würfel oder einer Kugel, einsetzbar. Es ist jedoch nicht der Aufgabe gewachsen, ein Bild auf ein detailliertes Modell ohne Dehnungs- oder Bündelungsartefakte zu bringen. Darüber hinaus kann es für einen Illustrator schwierig sein, die Textur so zu platzieren (normalerweise mit Einstellungen wie Versatz, Projektion oder Bildmittelpunkt), dass die Bilddetails mit den geometrischen Details übereinstimmen. (Chopine, 2011)

3.9.2 UV Mapping

Unter **UV** werden zweidimensionale Texturkoordinaten verstanden, die mit den Vertex-Informationen korrespondieren. Während **U** die horizontale Achse steht, wird mit **V** die vertikale Komponente bezeichnet. Diese Koordinaten sind von entscheidender Bedeutung, da sie die

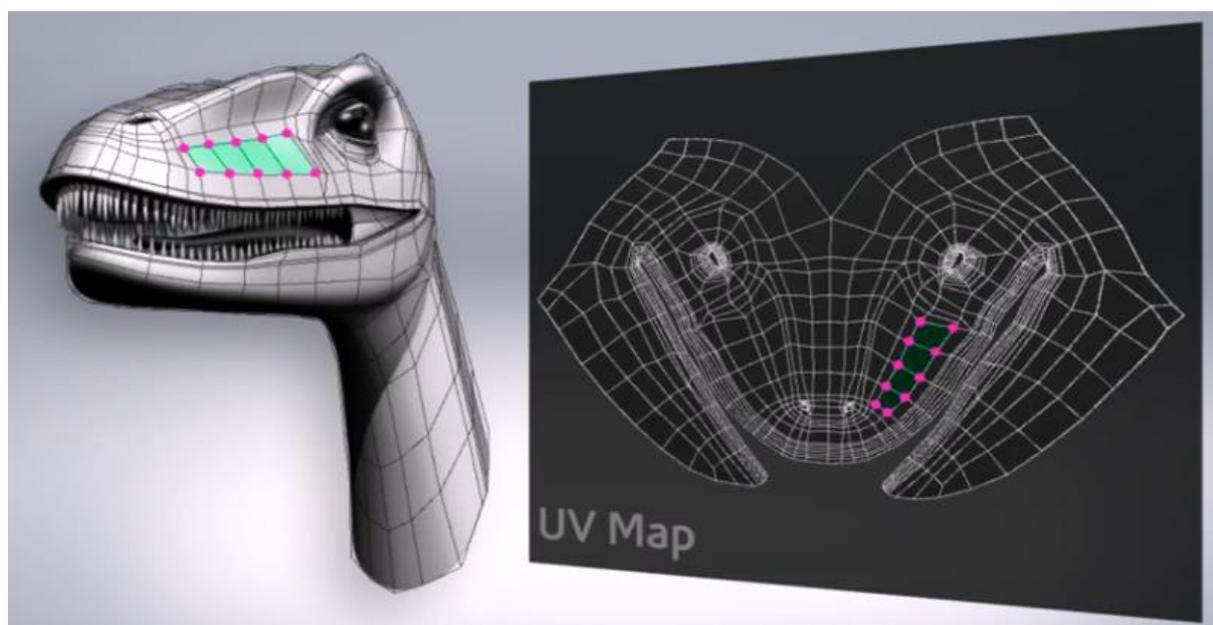


Abbildung 23: 3D Netz mit zugehöriger UV Map (Quelle: PLURALSIGHT, 2014)

Verbindung zwischen einem Oberflächennetz in der Art und Weise herstellen, wie eine Bildtextur auf die Oberfläche aufgebracht wird. Sie können im Wesentlichen als Markierungspunkte interpretiert werden, die steuern, welche Pixel auf der Textur welchem Vertex auf dem 3D-Netz entsprechen. Standardmäßig erstellen die meisten 3D-Anwendungen ein automatisches UV-Layout, während das Modell erstellt wird. Wenn jedoch beispielsweise die Textur für den Kopf eines Menschen ohne weitere Korrektur auf das 3D-Modell projiziert werden würde, wäre ein nicht zufriedenstellendes Resultat sehr wahrscheinlich. Deshalb muss nach der Erstellung des Modells mit dem Prozess des Layouts der UVs begonnen werden (oft als UV-Mapping bezeichnet). Dies ist im Grunde genommen der in Abbildung 23 ersichtliche Prozess der Erstellung einer 2D-Darstellung des 3D-Objekts. (Pluralsight, 2014)

Fast jede 3D-Anwendung verfügt über einen UV-Editor, mit dem die UVs für das jeweilige Modell entfaltet und bearbeitet werden können. Abhängig von der Anwendung ist jede Fläche oder jedes Polygon des 3D-Modells an eine Fläche auf der UV-Karte gebunden. Abschließend werden die Texturen mit den zuvor genannten Projektionsverfahren generiert. (Pluralsight, 2014)

3.9.3 Bump Maps

Bump Maps sind Graustufenkarten, die der Oberfläche eines Modells eine simulierte Höhe oder Tiefe hinzufügen. Dabei steht die Farbe schwarz für die niedrigste Höhenlage und weiß für die höchste. Der Prozess funktioniert folgendermaßen. Angenommen, der

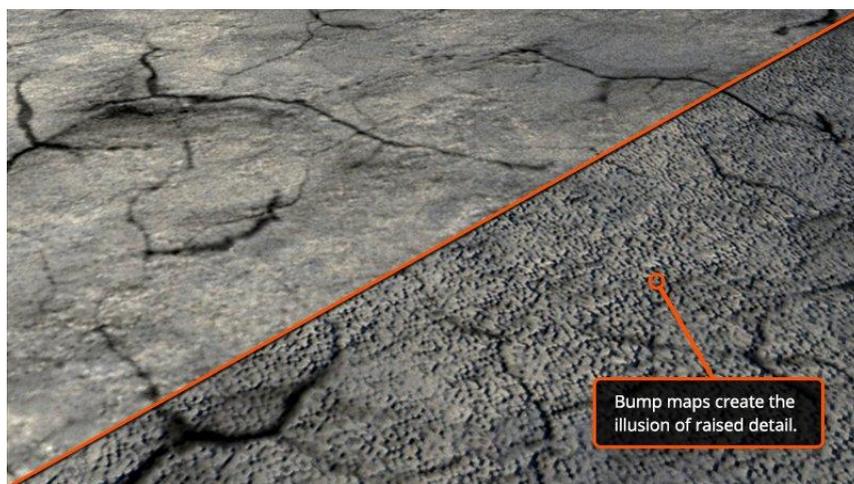


Abbildung 24: Effekt einer Bump Map (Quelle: Pluralsight, 2014)

Renderer verwendet Phong-Shading, um herauszufinden, wie dunkel oder hell ein Pixel auf der Oberfläche (immer bezogen auf die Normale) ist, die das Licht reflektiert. Anschließend werden die Informationen aus der Bump Map hinzugefügt, wodurch die Normale geändert wird. Wenn es sich beispielsweise ursprünglich um eine einzelne Fläche mit einer einzigen Normalen handelt und darauf nun eine Bump Map angewandt wird, kann diese Fläche nun mehrere Normalen haben, die aufgrund der verschiedenen Höhenlagen alle unterschiedlich sein können. In Abbildung 24 wird ersichtlich, dass dadurch der visuelle Eindruck von Tiefe entsteht. Die Geometrie wird dadurch jedoch nicht wirklich verändert, so dass die Silhouette und der Schatten des Objekts glatt bleiben, da sie durch die Anwendung der Bump Map nicht

beeinflusst werden. Bump Maps eignen sich damit für flache Arten von Rauheit, wie z.B. von einem Ziegelstein, einer Orange oder einem Golfball. (Chopine, 2011)

3.9.4 Normal Maps

Normal Maps können als eine neuere, bessere Art von Bump Maps bezeichnet werden. Identisch zu den Bump Maps, wird auch bei Normal Maps keine zusätzliche Geometrie erzeugt, die Details werden erneut lediglich simuliert. Damit hat eine Normal Map zwar dasselbe Ziel, die Erzeugung der Illusion von Tiefendetails auf der Oberfläche eines Modells, jedoch auf eine andere Art und Weise. Während bei der Bump Map Graustufenwerte verwendet werden, verwendet die Normal Map RGB-Informationen, die direkt mit der X-, Y- und Z-Achse im 3D-Raum korrespondieren. Diese RGB-Informationen teilen der 3D-Anwendung mit, in welche Richtung die Oberflächennormalen für jedes einzelne Polygon genau ausgerichtet sind. Die Orientierung der Oberflächennormalen, die oft nur als Normalen bezeichnet werden, teilt der 3D-Anwendung mit, wie das Polygon schattiert werden soll. (Pluralsight, 2014)

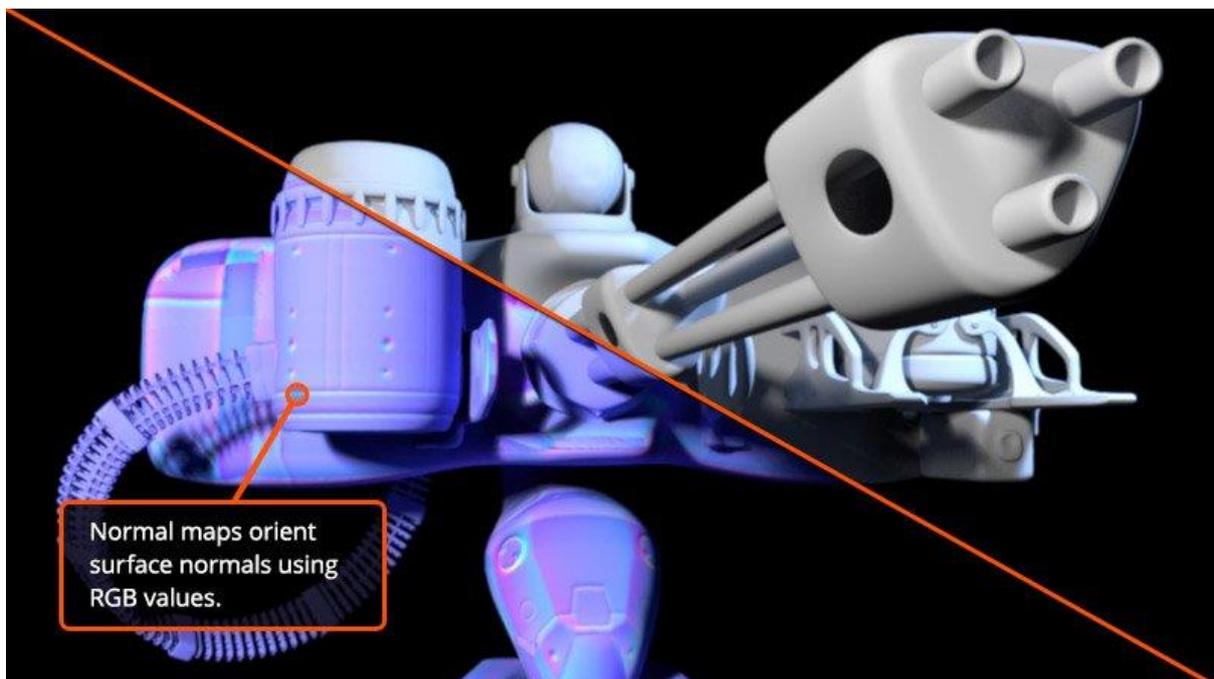


Abbildung 25: Effekt einer Normal Map (Quelle: Pluralsight, 2014)

Es existieren zwei Arten von Normal Maps, welche bei der Betrachtung im 2D-Raum völlig unterschiedlich aussehen. Die am häufigsten verwendete Art wird **Tangent Space Normal Map** bezeichnet und ist eine Mischung aus hauptsächlich violetten und blauen Farbtönen (vgl. Abbildung 25). Diese Karten funktionieren am besten bei Modellen, die sich während der Animation verformen müssen. Tangent Space Normal Maps eignen sich daher hervorragend für die Darstellungen von Menschen in Filmen. Für Objekte, die sich nicht verformen müssen, wird die sogenannte **Object Space Normal Map** verwendet. Diese Maps haben ein Regenbogensortiment verschiedener Farben sowie eine leicht verbesserte Performance gegenüber den Tangent Space Normal Maps. Im Gegensatz zu einer Bump Map sind diese Arten von Maps

in einer Bildbearbeitungssoftware wie Photoshop äußerst schwierig zu erstellen oder zu bearbeiten. (Pluralsight, 2014)

3.9.5 Displacement Maps

Displacement Maps sind Graustufentexturen, die auf Objekte abgebildet werden, um ein echtes Oberflächenrelief (Erhebungen und Vertiefungen) auf einem ansonsten flachen Objekt zu erzeugen. Bei Displacement Maps werden Vertiefungen und Erhebungen Teil der Geometrie des Objekts und verändern daher die Topologie, im Gegensatz zu Bump Maps, die nur die Illusion eines Oberflächenreliefs erzeugen. Da eine Displacement Map die Geometrie eines Objekts verändert, erfordert das Verfahren in der Regel eine weitere Unterteilung der Oberflächen. Das bedeutet, dass mehr Dreiecke im Modell generiert werden, die der Renderer zur Annäherung an die Glattheit der Oberfläche verwendet. (Autodesk, 2019)



Abbildung 26: Effekt einer Displacement Map (Quelle: Lumion, 2020)

Das Erstellen all dieser zusätzlichen Geometrie ist vor allem beim Realtime Rendering besonders komplex und anspruchsvoll für den Rechner. Aus diesem Grund berechnen die meisten 3D-Anwendungen die endgültigen Verschiebungsergebnisse während der Renderzeit. Im Vergleich zu Bump- oder Normal Maps benötigt daher eine Displacement Map wesentlich mehr Zeit beim Rendern. Da die Oberfläche tatsächlich verändert wird, spiegelt die Silhouette die zusätzliche Geometrie wider und die Resultate sind nur schwer zu übertreffen. Abbildung 26 zeigt links eine Steinwand ohne und rechts mit Displacement Map. Jedoch sollten immer die Kosten einer Displacement Map gegen den zusätzlichen Nutzen abgewogen werden, bevor die Entscheidung über die Verwendung einer Displacement Map fällt. (Pluralsight, 2014)

3.10 Graphics Rendering Pipeline

Punkte, Linien und Dreiecke sind laut Akenine-Möller et al. die Primitive, aus denen ein Modell oder ein Objekt aufgebaut wird. Angenommen, es handelt sich um eine interaktive CAD-Anwendung und der Illustrator möchte eine Visualisierung eines Toasters erstellen. Um den Prozess des Renderings zu veranschaulichen, wird nachfolgend anhand dieses Beispiels die Grafik Rendering Pipeline erläutert, die aus den in Abbildung 27 ersichtlichen vier Hauptphasen besteht:

- Application
- Geometry Processing
- Rasterization
- Pixel Processing

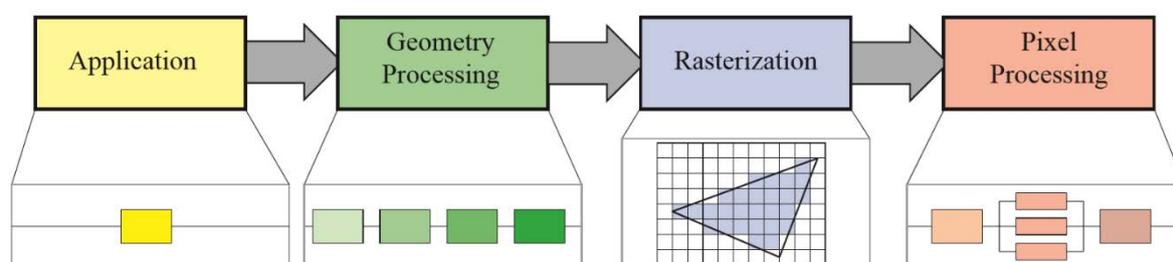


Abbildung 27: Grundlegender Aufbau einer Rendering Pipeline (Quelle: Akenine-Möller et al., 2018)

Die Szene wird mit einer Perspektive in einem Anzeigefenster auf dem Monitor gerendert. In diesem einfachen Beispiel enthält das Modell des Toasters sowohl Linien (zur Darstellung der Kanten von Teilen) als auch Dreiecke (zur Darstellung der Oberflächen). Der Toaster besitzt ferner einen Deckel, der geöffnet werden kann. Einige der Dreiecke sind durch ein zweidimensionales Bild mit dem Logo des Herstellers texturiert. In diesem Beispiel werden die Oberflächenschattierungen vollständig in der Phase *Geometry Processing* berechnet. Lediglich die Anwendung der Textur erfolgt während der Phase *Rasterization*. (Akenine-Möller et al., 2018)

Application

CAD-Anwendungen ermöglichen es dem Benutzer, Teile des Modells auszuwählen und zu verschieben. Zum Beispiel könnte der Anwender den Deckel auswählen und die Maus entsprechend bewegen, um ihn zu öffnen. Hierbei muss die Phase Application die Mausbewegung in eine entsprechende Rotationsmatrix übersetzen und dann dafür sorgen, dass diese Matrix beim Rendern ordnungsgemäß auf den Deckel angewendet wird. Ein weiteres Beispiel wäre eine Animation, die die Kamera entlang eines vordefinierten Pfades bewegt, um den Toaster aus unterschiedlichen Ansichten zu zeigen. Die Kameraparameter, wie z.B. Position und Blickrichtung, müssen dabei von der Anwendung zeitabhängig aktualisiert werden. Für

jedes zu rendernde Einzelbild überträgt die Phase Application die Kameraposition, die Beleuchtung und die Primitive des Modells an die nächste wichtige Phase in der Pipeline, *Geometry Processing*. (Akenine-Möller et al., 2018)

Geometry Processing

Für die perspektivische Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die Anwendung eine Projektionsmatrix weitergegeben hat. Außerdem hat die Anwendung für jedes Objekt eine Matrix berechnet, die sowohl die Ansichtstransformation als auch die Position und Orientierung des Objekts an sich beschreibt. In Bezug auf das Beispiel hätte der Sockel des Toasters eine Matrix, der Deckel eine andere. In der Phase Geometry Processing werden die Eckpunkte (Vertices) und Normalen des Objekts mit dieser Matrix transformiert, wodurch das Objekt in den Betrachtungsraum gebracht wird. Dann können Schattierungen oder andere Berechnungen an den Eckpunkten unter Verwendung von Material- und Lichtquelleneigenschaften berechnet werden. Die Projektion wird anschließend mit Hilfe einer separaten, vom Benutzer bereitgestellten Projektionsmatrix durchgeführt, wodurch das Objekt in einen einheitlichen Raum umgewandelt wird, der das darstellt, was das Auge sieht. Alle Primitive außerhalb des Raumes werden verworfen. Alle Primitive, die diesen Betrachtungsraum schneiden, werden mit dem Raum verschnitten, um einen Satz von Primitiven zu erhalten, der vollständig innerhalb liegt. Die Eckpunkte werden dann im Anwendungsfenster auf dem Bildschirm abgebildet. Nachdem all diese Operationen durchgeführt wurden, werden die resultierenden Daten an die Phase *Rasterization* weitergeleitet. (Akenine-Möller et al., 2018)

Rasterization

Alle Primitive, die im jetzt noch im Betrachtungsraum liegen, werden nun gerastert. Dieses Verfahren wurde bereits in einem vorherigen Kapitel näher erläutert. Abschließend folgt die letzte Phase, in der die Pixel verarbeitet werden. (Akenine-Möller et al., 2018)

Pixel Processing

Das Ziel dieser Phase ist, die Farbe jedes Pixels aller sichtbarer Primitive zu berechnen. Jene Dreiecke, die mit bestimmten Texturen (Bildern) assoziiert wurden, werden jetzt gerendert. Jedes Objekt wird der Reihe nach bearbeitet und das finale Bild wird als Resultat auf dem Bildschirm angezeigt. (Akenine-Möller et al., 2018)

3.11 Animation

Animation steht im einfachsten Sinn für eine Veränderung im Laufe der Zeit. Alles, was im Fernsehen, in Spielen oder Filmen zu sehen ist und nicht mit einer Kamera aufgenommen wird, gilt als Animation. Während Videos eingefangene Bilder aus dem realen Leben sind, werden Animationsbilder entweder von Hand oder durch einen Computer generiert. Animationen werden mit einer gewissen Geschwindigkeit wiedergegeben, damit eine Bewegung entstehen kann. 24 fps (frames per second) sollten laut Zeman mindestens für Animationen eingesetzt werden. Eine höhere Bildwiederholungsrate, z.B. 60 fps sorgt vor allem bei schnellen Bewegungen für ein flüssigeres Bild. (Zeman, 2014)



Abbildung 28: Keyframes und Interpolation

Eine Animation findet statt, wenn sich die Werte eines Attributs zwischen zwei verschiedenen Zeitpunkten unterscheiden. Ein Zeitpunkt, zu dem ein Attribut einen definierten Wert besitzt, wird als Keyframe bezeichnet. Ferner wird die Wertänderung über die Zeitspanne zwischen den Keyframes als Interpolation beschrieben. In Abbildung 28 werden die Keyframes im Zeitverlauf ersichtlich. Der Verlauf zwischen den Keyframes wird als Bewegungskurve bezeichnet. Die Interpolation erzeugt Werte zwischen den Keyframes beispielsweise mit Hilfe von linearer Interpolation in Abhängigkeit der jeweils vergangenen Zeit. (Zeman, 2014)

Bei Einsatz der Software Lumion 10 können Animationen sehr übersichtlich grafisch angelegt werden. Dafür wird für jede Bewegungsrichtung ein Pfad mit seiner zugehörigen Pfadbreite und Richtung angelegt (vgl. Abbildung 29). Anschließend wird die gewünschte Geschwindigkeit festgelegt. Nun werden im Rendering sämtliche Objekte, die sich auf dem Pfad befinden mit der zugehörigen Geschwindigkeit bewegt.



Abbildung 29: Animation von Fahrzeugen und Menschen in Lumion 10 Pro Student

4 OBERMEYER Demomodell – Proof of Concept

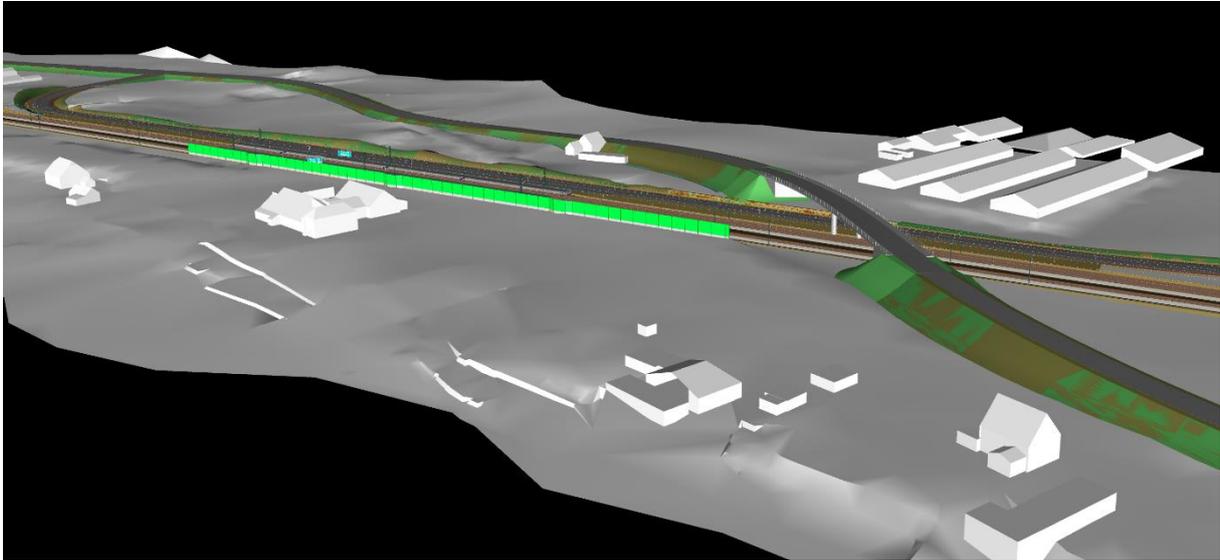


Abbildung 30: Rohdaten in Autodesk Navisworks Simulate

Das im nachfolgenden beschriebene 3D-Modell wurde von dem Unternehmen OBERMEYER zu Testzwecken zur Verfügung gestellt. In der Abbildung 30 wird bereits ersichtlich, dass es sich bei dem etwa einen Kilometer langen Abschnitt um ein Rohmodell eines geplanten Infrastrukturprojektes handelt. Das Planungsprojekt befindet sich in der Nähe von Rees, einer Stadt in Nordrhein-Westfalen. Die Modellierung erfolgte fast ausnahmslos mit der Software ProVI, lediglich die Brücke wurde mit Hilfe von SIEMENS NX konstruiert und anschließend in ProVI importiert. Abschließend wurde das Modell, bestehend aus den verschiedenen Teilmodellen der Gewerke Schiene, Straße, Brücke, Erdbau, Vermessung und Umgebungsbebauung, aus ProVI in verschiedenen Dateiformaten (.nwd, .fbx, .ifc, .dwg) exportiert.

ProVI, als Abkürzung für Programmsystem für Verkehrs- und Infrastrukturplanung, steht für eine CAD-Software, die mittlerweile von der gleichnamigen ProVI GmbH vermarktet und weiterentwickelt wird. Seit 1. Januar 2019 agiert das Spin-off Unternehmen der OBERMEYER Planen + Beraten GmbH eigenständig in den Geschäftsräumen in München. Die Ausgründung war für die weitere Etablierung im deutschen als auch im europäischen Raum ein wichtiger Schritt. (GEObranchen, 2019)

“In den 1980er Jahren programmierte die EDV-Abteilung der OBERMEYER Planen und Beraten ProVI als eine AutoCAD-Applikation für die interne Planung von Infrastrukturprojekten. Seitdem hat sich die Software, die von Ingenieuren für Ingenieure entwickelt wurde, erfolgreich als eine der führenden Trassierungssysteme am deutschsprachigen Markt etabliert. Große Verkehrsgesellschaften wie die Deutsche Bahn, Verkehrsbetriebe wie Wiener Linien, Bremer Straßenbahn, Rhein-

Neckar Verkehr sowie Ingenieurbüros setzen ProVI für ihre Infrastrukturplanungen ein.“ (GEObranchen, 2019)

Bei der Software **SIEMENS NX** handelt es sich um ein weitverbreitetes CAD-System, welches Unterstützung bei dem kompletten Fertigungs- und Produktentwicklungsprozess bietet. Den Ursprung des Programms bildet die Vereinigung von I-DEAS und Unigraphics, welche anschließend von SIEMENS PLM Software kontinuierlich weiterentwickelt und übernommen wurde. Durch den modularen Aufbau verfügt NX neben der Fertigungsunterstützung auch über weitreichende Möglichkeiten zur Konstruktion, Entwicklung elektrischer Systeme und mechatronischer Konzepte, Fahrzeugs- und Schiffsbau, Visualisierung und Simulation. Dabei basiert SIEMENS NX auf dem bekannten Parasolid-Modellierkern, welcher die Grundlage für die Geometriedarstellung bildet. (Wünsch & Pilz, 2020)

4.1 Import

Von OBERMEYER wurden folgende Dateiformate zur Verfügung gestellt:

- *Demoprojekt* als .nwd (Navisworks Document)
- *ProVI_Demo-Netz* als .dwg
- *ProVI_Demo-Netz* als .fbx
- *ProVI_Demo-Volumen* als .fbx
- *Demoprojekt* mit den wesentlichen Ebenen als .ifc

Begonnen wurde mit der im Kapitel Grundlagen bereits vorgestellten Software Autodesk InfraWorks. Obwohl InfraWorks fast alle gängigen Importformate unterstützt, traten hierbei mehrere Probleme auf. Im Rahmen des (.ifc) Imports musste ein passendes Koordinatensystem gewählt werden, um die Georeferenzierung zu ermöglichen (DeutscheBahn.Gauss3d-2). Das sollte die genaue Platzierung des Modells auf dem zuvor ausgewählten Luftbild ermöglichen.

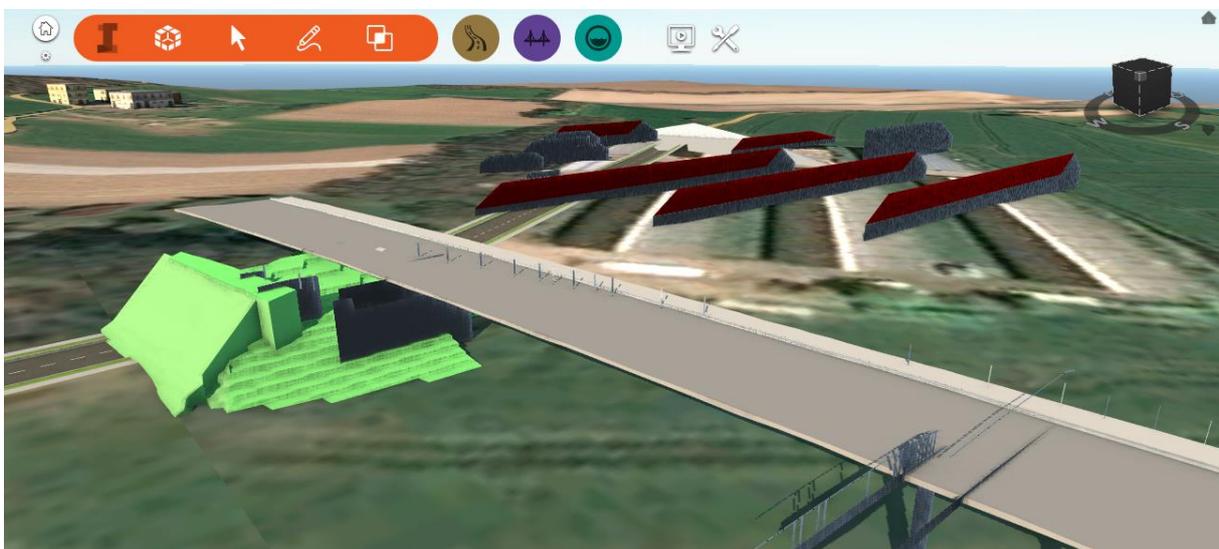


Abbildung 31: Fehlerhafte Platzierung der Objekte in InfraWorks

In Abbildung 31 wird die Diskrepanz zwischen Theorie und Praxis schnell ersichtlich. Sowohl die Industriegebäude werden falsch platziert als auch die Brücke einschließlich Brückengeländer, das dazugehörige Auflager werden fehlerhaft dargestellt und an verschiedenen Orten, obwohl sich diese Objekte im gleichnamigen Koordinatensystem befinden, platziert.

Anders verhielt sich der Importversuch mit Hilfe des Volumen- bzw. Netzmodells (.fbx). Hier funktioniert die genaue Georeferenzierung, jedoch fehlen teilweise relevante Flächen, z.B. ersichtlich am Gebäude in Abbildung 32 links. Bei Betrachtung der Kanten fallen schnell die Unstimmigkeiten bei den Betonschwellen einschließlich der Gleise, den Bahnsteigen, der Oberleitung, dem Brückengeländer usw. auf.

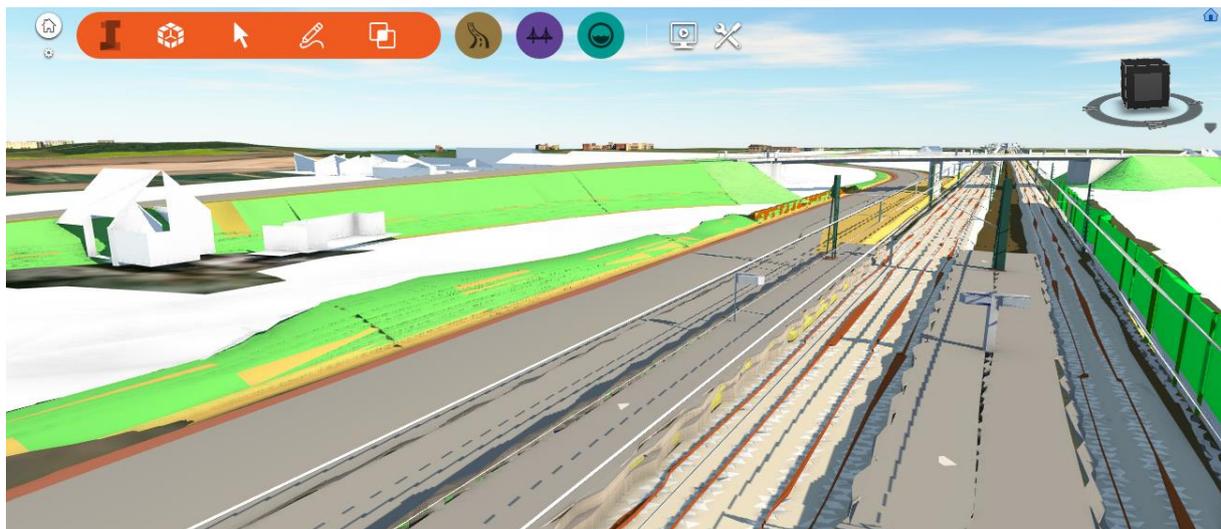


Abbildung 32: Darstellungsprobleme beim Volumenmodellimport mit InfraWorks

Abschließend wurde der Import der (.dwg) Datei untersucht. Hierbei ist die korrekte Darstellung der Brücke einschließlich des Geländers positiv zu erwähnen. Dennoch fehlen erneut teilweise komplette Flächen, die für die Visualisierung des Modells benötigt werden (vgl. Abbildung 33 – Gebäude, Zufahrtsstraßen, Bahnsteig, Oberleitung...). Damit scheidet das Programm InfraWorks für eine aus dem Modell schnell ableitbare Visualisierung aus.

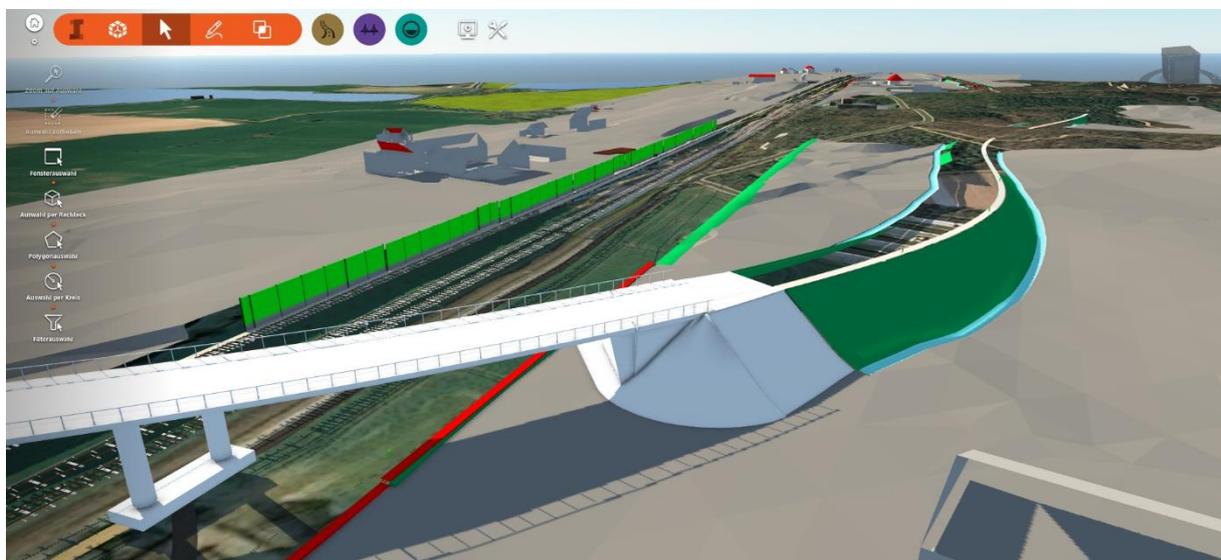


Abbildung 33: Darstellungsprobleme beim (.dwg) Import mit InfraWorks

Als weitere Möglichkeit stand die Software 3ds Max von Autodesk im Raum, mit der vorrangig ausgebildete 3D-Artists arbeiten. Im Rahmen des (.fbx) Imports wurden sehr lange Ladezeiten festgestellt. Nach Abschluss des Ladevorgangs waren die Modelle nur noch sehr verzögert bis überhaupt nicht mehr bedienbar, womit oftmals ein Absturz des Programms einher ging. Einzig der Import der (.dwg) war möglich. Dieser hatte jedoch mit Infracad vergleichbare Darstellungsfehler, die im Drahtgittermodell in Abbildung 34 ersichtlich sind, zur Folge.

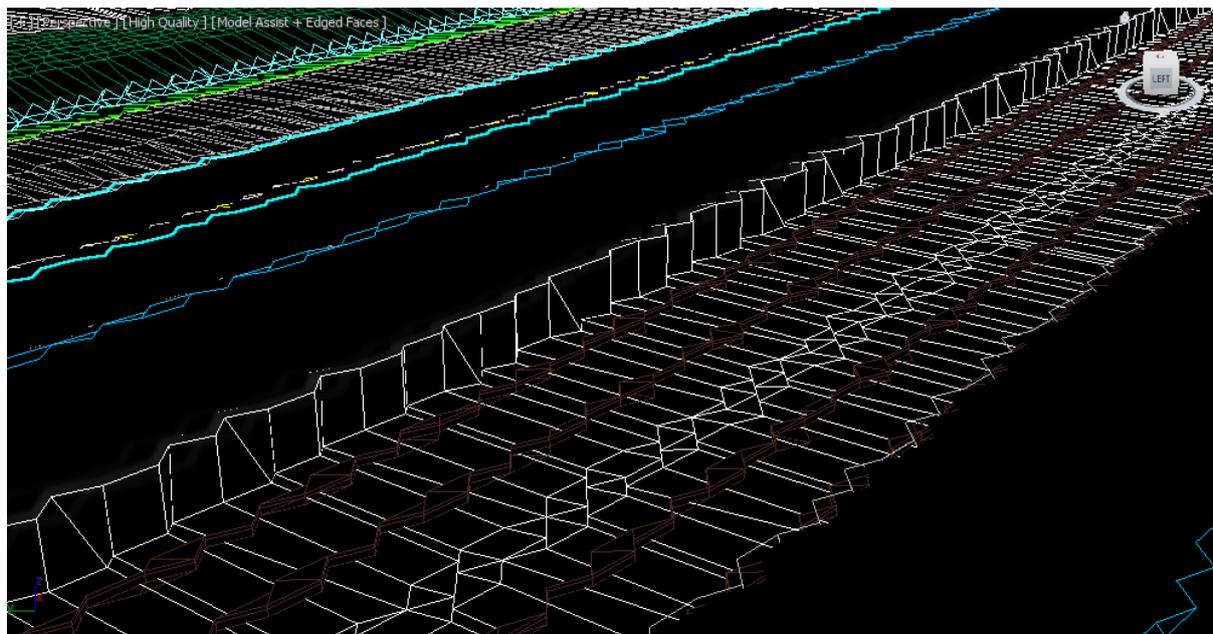


Abbildung 34: Probleme beim (.dwg) Import mit 3ds Max

Um einen Installationsfehler der Software ausschließen zu können, wurde zusätzlich eine professionelle Firma für 3D Visualisierungen mit dem Import in 3ds Max beauftragt. Die Firma *HJ Visualization* kam zum identischen Ergebnis, nachdem verschiedene Wege des Imports versucht wurden. Deren Erfahrung nach eignet sich die zur Verfügung gestellte Datei nicht für eine brauchbare Visualisierung in 3ds Max.

Als weitere Möglichkeit stand die Software Lumion in Verbindung mit Autodesk Revit zur Auswahl. Dafür wurde das Plugin **Lumion LiveSync for Autodesk Revit** installiert. Diese Softwareerweiterung ermöglicht eine hochwertige Echtzeit 3D-Ansicht während der Betrachtung bzw. Bearbeitung des Modells in Revit. So werden Änderungen des Modells in Revit, z.B. das Ergänzen einer Brüstung, sofort mit der Darstellung in Lumion synchronisiert. Das hat einen besonders effizienten Workflow zur Folge, da die ständige zeitaufwendige manuelle Synchronisation der Daten über sonstige Dateiformate entfällt. (Lumion, 2020)

Die (.dwg) des Infrastrukturmodells wurde in Revit mit der Funktion *CAD verknüpfen* (ähnliche funktionsweise einer XRef in AutoCAD) importiert, da auch hier der klassische Import der Datei über die Funktion *CAD Importieren* zu Darstellungsproblemen innerhalb von Revit geführt hat.



Abbildung 35: Import der (.dwg) mit Lumion LiveSync for Autodesk Revit

In Abbildung 35 wird ersichtlich, dass dank des Plugins sämtliche Objekte korrekt in Lumion übertragen werden. Auch die gruppierten Elemente (Dächer, Fahrbahn, Wiesen, etc.), welche später jeweils mit den gewünschten Texturen überschrieben werden, sind in Lumion bereits richtig dargestellt.

Zuletzt wurde noch die Software Twinmotion betrachtet, welche sich als sehr ähnlich zu Lumion erwiesen hat. Twinmotion unterstützt jedoch keinen (.dwg) Import, wobei nur die vermutlich fehlerbehafteten (.fbx) Dateien zum Test verblieben. Sowohl das Netzmodell als auch das Volumenmodell führten deshalb zu den fast identischen Darstellungsproblemen wie in 3ds Max und Infraworks. Denn auch hier sind ähnliche Fehler festzustellen. Die Oberflächen sind

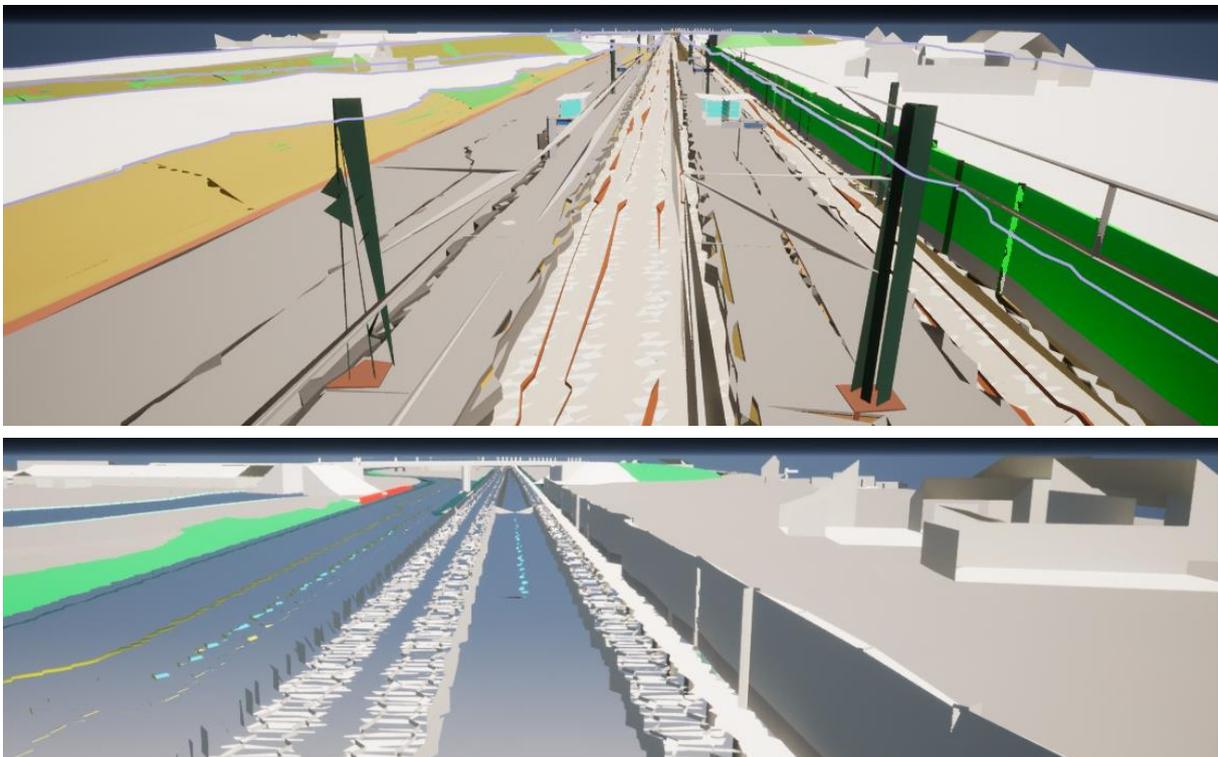


Abbildung 36: Probleme mit Volumen- (oben) und Netzmodell (unten) in Twinmotion

verzerrt und in sich nicht schlüssig, Kanten fehlen teilweise gänzlich oder sie sind gezackt. Bei Betrachtung der Bebauung in Abbildung 36 fallen fehlende Wände bzw. verrutschte Elemente

auf. Besonders beim Netzmodell fehlt der komplette Bahnsteig und die Zufahrtsstraße zur Brücke.

Da von OBERMEYER die Vermutung bestand, dass die Darstellungsfehler eventuell auf die Georeferenzierung zurückzuführen sein könnten, wurde das Modell in den Ursprung verschoben und anschließend als Netzmodell neu zur Verfügung gestellt.

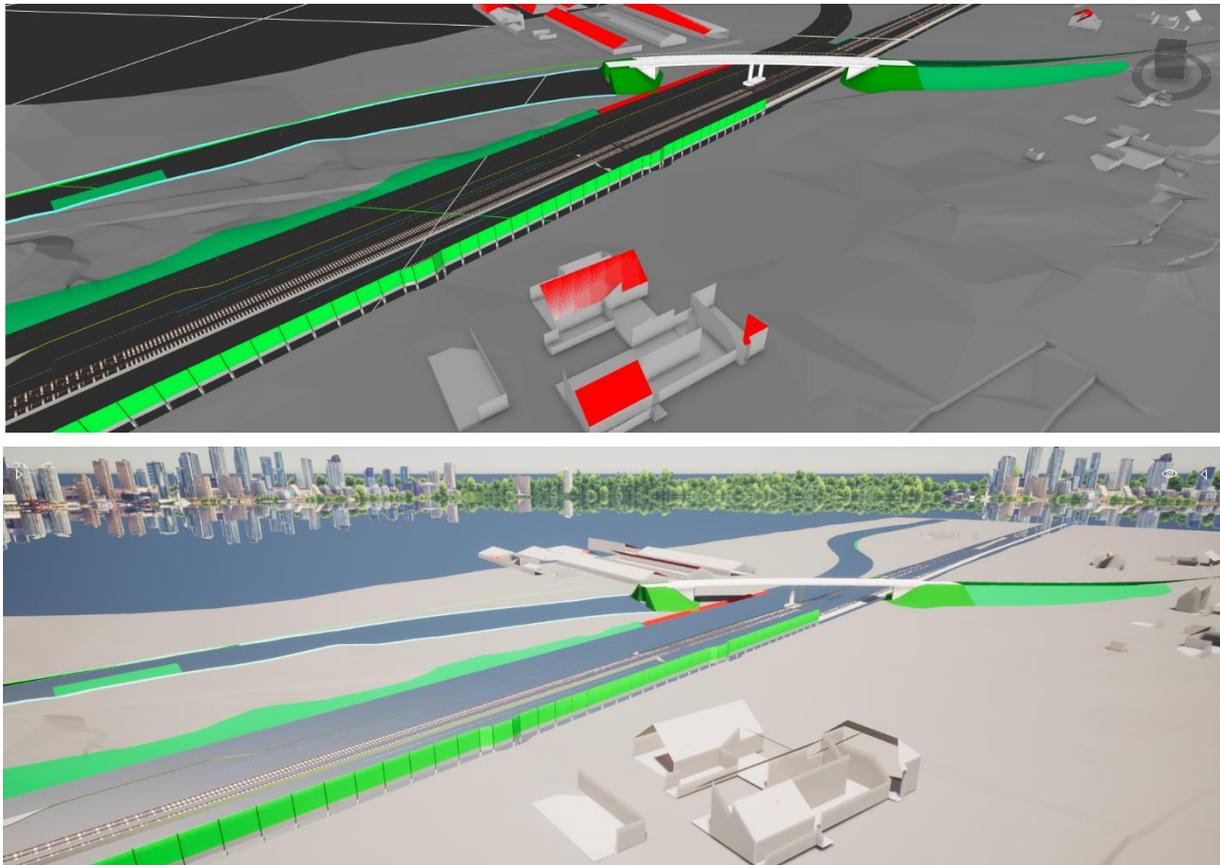


Abbildung 37: Darstellungsfehler in InfraWorks (oben) und Twinmotion (unten)

In Abbildung 37 sind die Ergebnisse des Versuchs sichtbar. Die Verschiebung zum Ursprung hatte jedoch nur überschaubare Verbesserungen zur Folge. Die Bahngleise und Betonschwellen werden nun, bis auf zwei Abschnitte, klar dargestellt. Auch die Brücke einschließlich Geländer wurde richtig importiert. Trotzdem traten erneut die in den vorherigen Versuchen festgestellten Probleme (Fehlen der Straße, Böschung,...) auf. Auch der Bahnsteig und Gehweg fehlen gänzlich.

Lediglich der korrekte Import in die Software 3ds Max wurde durch die bezüglich des Ursprungs korrigierte Datei möglich. Jedoch reagiert die Software nach dem Import, vermutlich der Größe der Datei geschuldet, kontinuierlich sehr träge und stürzt wenig später ab.

4.2 Szenengestaltung mit Lumion

Nach einem erfolgreichen Import kann nun mit der Szenengestaltung begonnen werden. Dieser Prozess unterscheidet sich nur geringfügig zwischen den einzelnen Programmen. Im

Nachfolgenden wird das Vorgehen in Lumion geschildert. In der Regel wird zur Bedienung das Drag & Drop Prinzip angewandt. Dabei werden die gewünschten Texturen aus der software-eigenen Material-Bibliothek gezogen und auf den entsprechenden Objekten abgelegt.

In diesem Zuge wird das importierte Material mit einer Textur von Lumion überschrieben. Dabei werden sämtliche Elemente des Modells, die mit dem gleichen importierten Material belegt und somit gruppiert sind, mit derselben Textur überschrieben. In Abbildung 38 wird das *Rendermaterial 128-128-128* beispielsweise mit einem sehr realistischen Lumion 3D Gras belegt. Ferner können weitere Einstellungen, beispielsweise zur Graslänge, zur Schwerkraft und Biegekraft, zusätzlich getroffen werden.



Abbildung 38: Zuweisung von Materialien in Lumion

Nachdem sämtliche Materialien zugewiesen wurden, wird mit Hilfe der Objekt-Bibliothek in der Szene für mehr Realität gesorgt. Entweder werden die optimierten softwareeigenen Objekte eingesetzt oder alternativ ist auch der Import von Modellen aus sämtlichen Online-Bibliotheken möglich. In der Arbeit wurde vor allem das *3D-Warehouse*, eine Plattform von SketchUp, neben den Lumion eigenen Objekten genutzt.

“Das 3D-Warehouse ist die größte Online-Plattform für 3D-Modelle. Hier stehen Ihnen als Anwender von SketchUp Pro über 3,5 Millionen 3D-Modelle kostenfrei zur Verfügung. Viele der Modelle werden direkt vom Hersteller bereitgestellt. So können Sie ohne großen Aufwand realitätsnahe Objekte für Ihre eigenen Modelle verwenden.“ (EinsteinConcept, 2020)

Die damit einhergehende Zeitersparnis ist immens. Anstelle von zeitaufwendiger Modellierung in Eigenregie kann so oft innerhalb von wenigen Sekunden ein passendes Modell über die Suchfunktion gefunden und anschließend in das Modell integriert werden. Vorteilhaft ist, dass jeder Nutzer auch selbst Modelle erstellen und uploaden kann, was eine ständige Erweiterung der Online-Bibliothek nach sich zieht. Es wurden jedoch nur Personen aus der Lumion eigenen

Bibliothek eingesetzt, da diese für die Software optimiert sind und bereits definierte Animationen (z.B. Bewegen der Zeitung beim Lesen) mit sich bringen.

Der Einsatz der inkludierten Animationen lohnt sich besonders bei einer späteren Filmproduktion. Deshalb wurde in Abbildung 39 ein Junge platziert, der die Fähigkeit besitzt, automatisch Gehbewegungen für eine spätere Pfadanimation auszuführen. Die Züge, welche im Hintergrund sichtbar sind, wurden aus dem 3D-Warehouse bezogen.



Abbildung 39: Platzierung von Personen

Aufgrund der sehr begrenzten Auswahl von kostenfreien Zugmodellen der Deutschen Bahn wurde für den rötlichen Zug ein Low-Poly-Modell verwendet. Bei genauer Betrachtung von Abbildung 40 sind nun die Nachteile eines Low-Poly-Modells ersichtlich. Die normalerweise in der Realität vorhandenen Rundungen mit sauberen Übergängen auf die



Abbildung 40: Einsatz eines Low-Poly-Modells

Seitenflächen des Zuges erscheinen bereits in der Rendervorschau als etwas kantig. Dieser Effekt ist, wie bereits im Kapitel Grundlagen erläutert, der zu niedrigen Anzahl an Polygonen geschuldet. Trotz der Korrektur der Kantenrundung im Rahmen der Materialparameter würde hier nur ein höher aufgelöstes Modell zu einem besseren Ergebnis führen. Hochaufgelöste Modelle dieses Zuges sind selbstverständlich online erhältlich, jedoch nur gegen Gebühren. Vor allem bei detaillierten Visualisierungen eines Bahnsteiges, die auch das Innere des Zuges zeigen sollen, lohnt sich der einmalige Kauf eines solchen Modells. Das kantige Erscheinungsbild wurde mit einem größeren Betrachtungsabstand in den späteren Renderings kompensiert. Bei den restlichen Platzierungen von Objekten wurde bestmöglich auf eine für den Zweck angemessene Qualität geachtet. Auf dieselbe Art und Weise wurde das Gesamtmodell noch um Kraftfahrzeuge, Sitzmöglichkeiten, Werbetafeln, kleine Details wie Abfalleimer oder auch Laubblätter ergänzt. Möglichst viele Details sind für ein realistisches Rendering abschließend unabdingbar. Im Rahmen der Bachelorarbeit wurden lediglich kostenfreie Modelle eingesetzt.

4.3 Nachbearbeitung



a



b



c



d

Abbildung 41: Korrekturen des Modells

Die Nachbearbeitung des Modells kann gleichzeitig mit der Szenengestaltung vorgenommen werden. Hierbei erweist sich das Plugin *Lumion Live-Sync for Autodesk Revit* als besonders hilfreich. Damit kann beispielsweise gezielt das Brückengeländer um Füllstäbe ergänzt werden oder auch das Geländer am Bahnsteig angebracht werden.

Die Füllstäbe (vgl. Abbildung 41a) wurden mit Hilfe von einfachen Zylindern erstellt und anschließend dupliziert. Ferner wurden die Leitpfosten, welche an den (.dwg) Import gekoppelt waren, durch detailliertere Leitpfosten (vgl. Abb. 41b) aus dem 3D-Warehouse ersetzt.

Die erforderliche Absturzsicherung für den Bahnsteig wurde kurzer Hand mit dem Geländer-Werkzeug generiert (vgl. Abb. 41c). Zuletzt wurde die fehlende Mauer an der Bahnsteigkante durch eine Reihe an Sichtbetonelementen aus der Lumion eigenen Bibliothek dargestellt (vgl. Abb. 41d). Alternativ dazu wäre auch die Generierung eines entsprechenden Körpers in Autodesk Revit möglich, mit anschließender Materialüberschreibung zu Sichtbeton.

Zudem wurden die Gabionen, welche sich zur Hangsicherung unter der Brücke befindet und im nächsten Unterkapitel näher betrachtet wird, durch einen passenderen Modellkörper ersetzt

Zusammenfassend war der Aufwand für die nötigen Korrekturen für das gewünschte Erscheinungsbild des Modells bemerkenswerterweise gering.

4.4 Modellierung von individuellen Materialien/Oberflächen

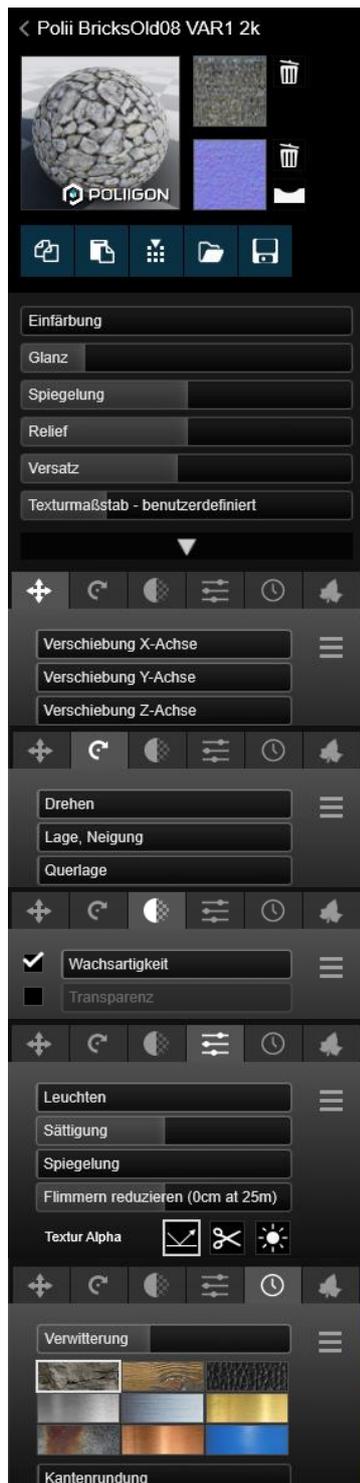


Abbildung 43: Texturierung

Sofern in der Materialbibliothek keine passende Textur gefunden werden kann ist auch die Erstellung eines eigenen Materials möglich. Beispielsweise wurde zur Darstellung der Gabionen eine passende Textur aus dem Internet bezogen. Bei der ausgewählten Textur handelt es sich um ein möglichst orthogonales Foto einer realen Gabione. Während der Fotografie sollte sowohl auf eine gute Belichtung als auch auf eine ausreichend hohe Auflösung geachtet werden. Zudem sollten markante Unregelmäßigkeiten, z.B. ein großer Moosfleck auf der Wand, vermieden werden. Abschließend wird das Foto in einem Bildbearbeitungsprogramm (Adobe Photoshop, GIMP, etc.) auf einen nahtlos kachelbaren Bereich zugeschnitten, damit die Textur innerhalb der Software Lumion möglichst unauffällig unzählige Male wiederholt werden kann. Ein großer Moosfleck würde deshalb zu einer ungewollten regelmäßigen Wiederholung führen.

Nach dem Import der Textur in das Programm können etliche zusätzliche Einstellungen getroffen werden. Diese sind ebenfalls in Abbildung 42 dargestellt und reichen von den klassischen Translationen und Rotationen der Textur über die Anpassung des Texturmaßstabes bis hin zu Einstellungen der Transparenz und Wachsartigkeit. Auch die Ergänzung einer Normal Map wäre bei Bedarf möglich. In Abbildung 43 wird im Hintergrund das Resultat der Gabionen sichtbar. Ferner wurde auch der Reflektor des Leitpfostens mit der Funktion *Leuchten* angepasst, was ein wesentlich realistischeres Erscheinungsbild zur Folge hat.



Abbildung 42: Resultat der Texturierung

4.5 Darstellung realistischer Kraftfahrzeuge



Abbildung 44: Platzierung von Lichtquellen

Die Szene wurde größtenteils mit Lumion eigenen Kraftfahrzeugen gestaltet. Dies brachte den Vorteil mit sich, dass die Lichter (Front- und Rücklichter) per Mausklick aktiviert werden konnten. Jedoch erzeugen diese Lichter keine Lichtkegel. Sie würden in einer Visualisierung vergleichbar mit dem Effekt *Leuchten* erscheinen. Deshalb wurden für eine möglichst realistische Darstellung zusätzlich sogenannte *Spotlights* vor den Fahrzeugen platziert (vgl. Abbildung 44). Diese können hinsichtlich der Helligkeit, des Kegelwinkels und der Farbe frei konfiguriert werden. Zusätzlich kann über die Funktion *Nacht-Aktivierung* ein automatisches Einschalten der Spotlights bei entsprechender Dämmerung verknüpft werden. Dies erwies sich als praktisch, da sämtliche Straßenlaternen ebenfalls auf diese Weise aktiviert werden können. Auch für die Straßenbeleuchtung wurden jeweils Spotlights mit einer sichtbaren Lichtquelle eingesetzt, welche anschließend nur noch hinsichtlich des Kegelwinkels definiert werden mussten. Das hochauflösende Resultat ist in Abbildung 45 sichtbar.



Abbildung 45: Möglichkeiten durch den Einsatz individueller Beleuchtung

4.6 Workflow mit Lumion

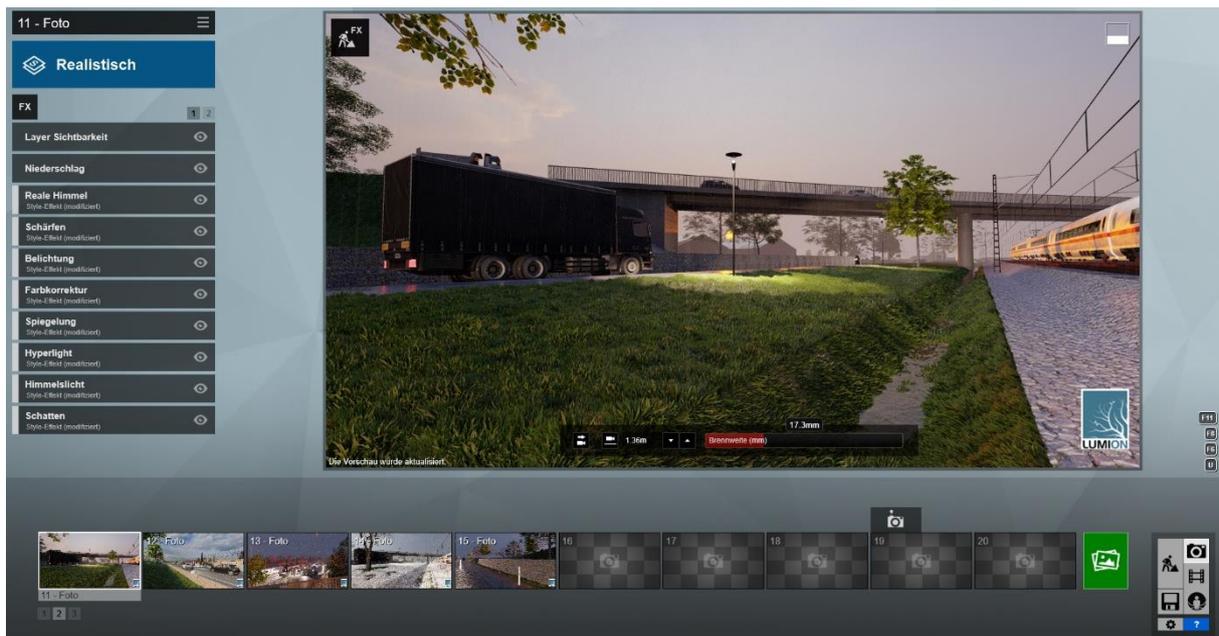


Abbildung 46: Vorschau und Einstellungen in Lumion

Nachdem die Szene den Vorstellungen entsprechend gestaltet und belichtet wurde, kann mit der Erstellung von Kameraperspektiven begonnen werden. Dazu wird in Lumion durch Einsatz der Maus einschließlich Scrollrad, oder alternativ auch über die Pfeiltasten, der gewünschte Szenenausschnitt festgelegt. Die Vorschau des Renderings, welche in Abbildung 46 rechts ersichtlich ist, wird kontinuierlich automatisch aktualisiert. Dies ermöglicht eine sofortige Evaluation der vorgenommenen Einstellungen. Im gleichen Zug können die Brennweite und die Höhe der Kamera korrigiert werden. In Abbildung 46 links werden zusätzliche Effekte bei Bedarf hinzugefügt. Diese reichen von Korrekturen der Farben über Einstellungen zur Tiefenschärfe bis hin zur Wahl eines realen Himmels. In den jeweiligen Untermenüs können die einzelnen zusätzlichen Effekte über verschiedene Skalen beeinflusst werden.

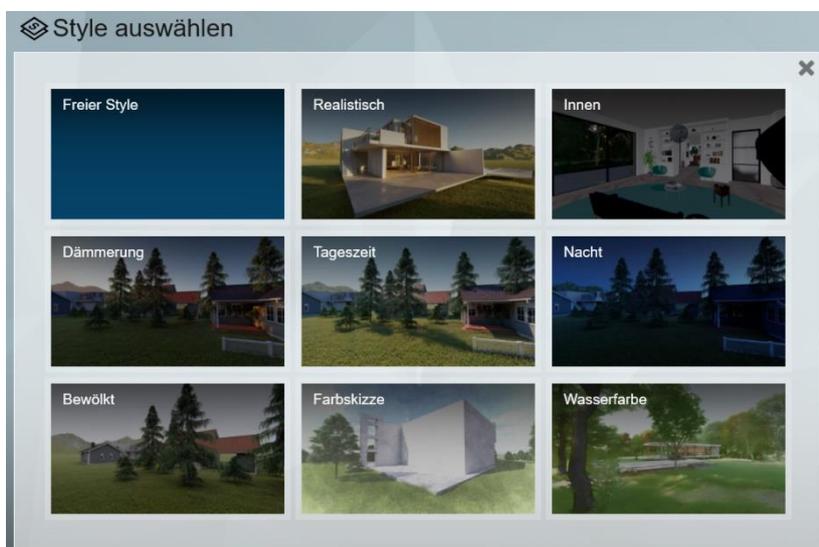


Abbildung 47: Auswahl eines vordefinierten Styles

Besonders die grundlegenden Einstellungen (Belichtung, Wetter, etc.) werden in Lumion durch die Auswahl von vordefinierten Styles abgenommen (vgl. Abbildung 47). Styles decken alle gängigen Erscheinungsbilder ab und erleichtern daher wesentlich den Arbeitsaufwand für das gewünschte Ergebnis.

4.7 Ergebnisse



Abbildung 48: Rendering Blick von der Brücke in Lumion

Es wurden mehrere Perspektiven gerendert, darunter eine Filmsequenz und Panoramen. Dabei wurden unterschiedliche Tageszeiten benutzt, um eine große Variation zu erzeugen. In Abbildung 48 und 49 sind zwei Ergebnisse davon dargestellt. Vor allem in Abbildung 49 kommt die sehr realistische Darstellung des Grases, einschließlich der Wasserführung, zur Geltung. Auch das Bankett und die Textur des Asphaltts entfalten durch den Einsatz einer *Displacement Map* ihre Wirkung. Ferner sind in Abbildung 48 die Lichtreflektionen auf der Fahrbahn zu nennen, welche für ein äußerst realistisches Erscheinungsbild sorgen.

Viele Ergebnisse können im Anhang betrachtet werden, lediglich die Filmsequenz und die Panoramen befinden sich auf dem beiliegenden Speichermedium. Es empfiehlt sich, alle Resultate digital zu betrachten. Alle Bilder wurden mit einer Auflösung von 3840×2160 Pixel gerendert.



Abbildung 49: Rendering Landstraße in Lumion

4.8 Mögliche Optimierungen der Ausgangsdatei

Nach einer ausgiebigen Arbeit mit dem von OBERMEYER zur Verfügung gestellten Modell sind folgende Optimierungsmöglichkeiten für ein unkompliziertes Rendering, welche in Abbildung 50 markiert wurden, festzuhalten.

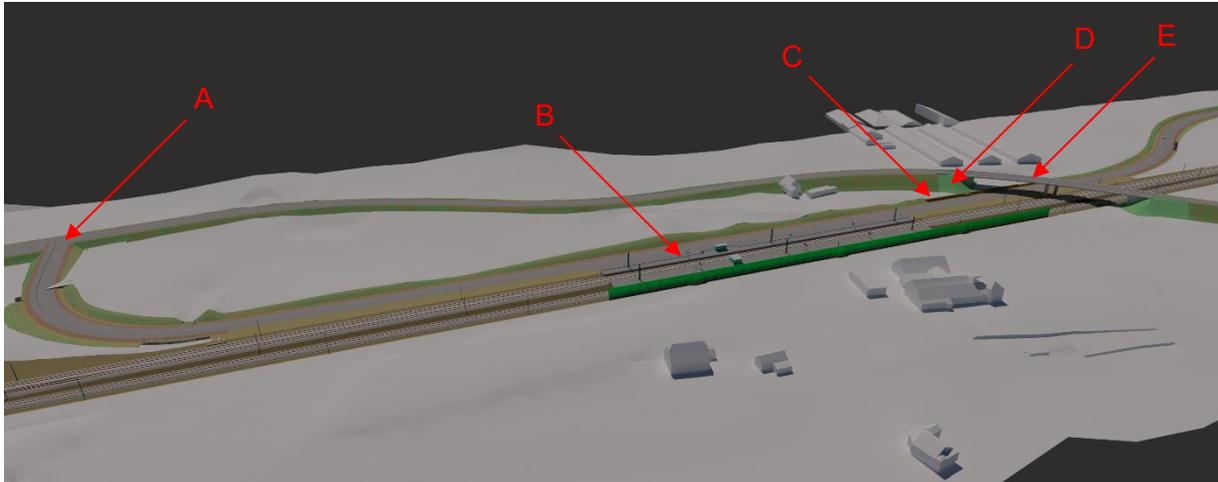


Abbildung 50: Darstellung der Optimierungsmöglichkeiten

- A. Im Einmündungsbereich existieren aktuell keine Fahrbahnmarkierungen. Zudem wurde die eigentliche Asphaltfläche mit dem Material des Bordsteins importiert. Eine Ergänzung der Markierung und eine Berichtigung der Texturbelegung entsprechend der anderen Asphaltflächen wäre hier zu optimieren.
- B. In der Ausgangsdatei ist keine Brüstung zur Absturzsicherung der Fahrgäste vorhanden. Der Bahnsteig könnte bereits während der Modellerstellung mit einem passenden Geländer ausgestattet werden, um eine Nachbearbeitung zu vermeiden.
- C. Die Gabionen sind derzeit mit der Textur der Hausdächer belegt. Auch hier kann eine neue Textur in der Ursprungsdatei zugewiesen werden.
- D. Ein kleiner Teil der Böschung der Brücke durchstößt momentan die geplanten Gabionen. Abhilfe würde nur eine Änderung des Modells schaffen. Da im Rahmen der Bachelorarbeit kein Zugriff auf die Ausgangssoftware bestand, wurde dieses Problem durch eine neu modellierte und größere Gabione gelöst. Im gleichen Zug konnte damit auch die falsche Textur behoben werden. Anzumerken ist, dass die Böschung der Brücke nahe den Auflagern mit dem Material der Brücke (Beton) importiert wurde. Falls hier ein anderes Material gewünscht wäre, könnte auch das behoben werden.
- E. Die Brücke verfügt lediglich über ein einfaches Geländer. Das Ergänzen von Füllstäben während der Planung wäre laut OBERMEYER umsetzbar. Ferner sollte dem Geländer gleich ein anderes Material zugewiesen werden, um es ohne großen Aufwand als Stahlgeländer in Visualisierung darstellen zu können. Da die Brücke mit einem einheitlichen Material importiert wurde, wäre es z.B. hinsichtlich des Asphaltbelags sinnvoll, die jeweiligen verschiedenen Oberflächen (Fahrbahn, Bordstein, Geländer, ggf. Gehweg) unterschiedlich zu texturieren.

5 Zielgruppen

Es existieren für Visualisierungen die verschiedensten Zielgruppen. Von Maklern oder Bauträgern, die Planungen für etwaige Käufer visuell aufbereiten lassen bis hin zu Stadträten, die sich ein schnelles Bild über den Planungsstand verschaffen möchten. Zumal auch immer mehr Bürgerinitiativen gegründet werden, in denen vor allem von den Planungen betroffene Anlieger ihre Vorstellungen einbringen.

5.1 Inhalte der Visualisierungen

Eine bedachte Wahl der Inhalte von Visualisierungen ist ein bedeutender Prozess. So sollte bei jedem Element, das innerhalb einer späteren Perspektive sichtbar wird, überlegt werden, welche Wirkungen dieses erzeugen kann. Auch wenn in aller Regel der Satz: "unverbindliche Darstellung aus Sicht des Illustrators" auftaucht, so werden mit oft fotorealistischen Renderings Vorstellungen bei Betrachtern verfestigt. Beispielweise wäre es unpassend, eine Visualisierung eines Infrastrukturprojektes mit vielen neuen Bäumen herauszugeben, welche jedoch nie geplant sind, umzusetzen. Eine Visualisierung bringt daher eine gewisse Verpflichtung mit sich, dass tatsächlich das dargestellt wird, was wirklich geplant ist.

Ferner sollte im Rahmen eines Infrastrukturprojektes auf eine differenzierte Wahl der Kraftfahrzeuge geachtet werden. Nur Autos aus der Oberklasse zu platzieren wäre beispielsweise im Rahmen einer Bürgerbeteiligung kontraproduktiv. Es sollte sich deshalb um ein ausgewogenes Verhältnis handeln, welches alle sozialen Schichten gleichermaßen repräsentiert.

Bei dem vorliegenden Modell handelt es sich laut OBERMEYER um eine Planung für den Auftraggeber Deutsche Bahn. Daher sollten auch die Züge des Auftragsgebers, sofern sie in den Bibliotheken auffindbar und brauchbar sind, eingesetzt werden. Hier würden Züge, beispielsweise die eines ausländischen Unternehmens, einen ungewollten Fokus setzen und für viel unbeabsichtigten Gesprächsstoff bzw. Verwirrung sorgen.

Zuletzt können bisher nicht existierende Bauwerke, beispielsweise Windräder, welche nur zum Füllen des Hintergrundes der Visualisierung gedacht sind, weitere Gründe für Diskussionen bei einer Veröffentlichung darstellen und sollten deshalb nur bedacht eingesetzt werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Visualisierungen, die veröffentlicht werden, ein enormes Potential für Reaktionen von unterschiedlichen Interessensgruppen bieten können. Damit ist sowohl ein positives als auch negatives Feedback für ein geplantes Projekt möglich. Es muss also abgewogen werden, welche Elemente wo und wie dargestellt werden. Und das immer in Einstimmigkeit mit einem pflichtbewussten Planungsgedanken.

5.2 Qualitätsstufen

Aus den verschiedenen Zielgruppen lassen sich unterschiedliche Qualitätsstufen, welche in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt werden, ableiten.

5.2.1 Out of the box Rendering

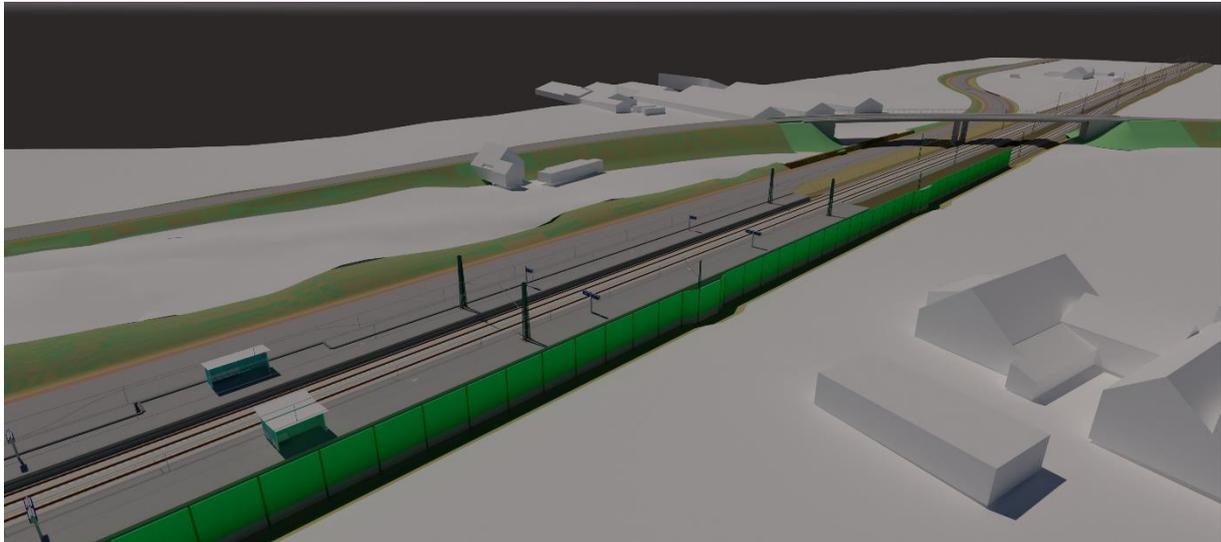


Abbildung 51: Visualisierung mit Autodesk Navisworks Simulate 2020

Das Rendern des Rohmodells stellt mit Abstand die schnellste Variante dar. Dazu wurde die zur Verfügung gestellte (.nwd) Datei in Navisworks Simulate importiert. Es wurde auf sämtliche Bearbeitungen des Modells verzichtet. Anschließend wurde für das Rendering die Autodesk Cloud benutzt. Dies erwies sich als äußerst unkompliziert, da das Modell automatisch während des Prozesses hochgeladen und anschließend in der Cloud gerendert wurde. Wenige Minuten später folgte eine Benachrichtigung per Email über die Fertigstellung. Zudem stand der Rechner für andere Tätigkeiten zur Verfügung.

Trotz des sehr geringen Zeitaufwands wird in Abbildung 51 das grundlegende Konzept des geplanten Projektes deutlich. Die Konstruktionen werden weitestgehend klar dargestellt. Nachteilig ist, dass keinerlei Fahrzeuge, Bäume und Personen dargestellt werden.

Einsatz könnte diese Variante beispielsweise innerhalb eines Planungsbüros finden. Als schneller Austausch zwischen Kollegen oder zur Vorstellung von verschiedenen Konzepten. Das Resultat, verfügbar in den Formaten (.jpeg), (.png), (.tiff) und (.exr), kann anschließend kurzer Hand per Email zur Rücksprache versendet werden. Insbesondere zur Klärung von Belangen mit Personen außerhalb der Abteilung (z.B. Abstimmung mit dem Straßenbauamt) kann so der teils zeitintensive Import des Modells vermieden werden. Durch den Austausch von einfachen Bilddateien wird zudem die Installation einer in der Regel mit Kosten verbundenen Software umgangen.

5.2.2 Quick & dirty Rendering



Abbildung 52: Rendering Landstraße in Infracore

Die in Abbildung 52 ersichtliche Qualitätsstufe zeichnet sich durch ein wesentlich lebhafteres Auftreten aus, im Vergleich zur vorherigen. Für dieses Rendering wurde die Software Autodesk Infracore eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein Tool, das vor allem für schnelle und weniger genaue Infrastrukturentwürfe gedacht ist. Ursprung eines derartigen Modells ist in der Regel ein Luftbild, welches auch Höheninformationen (weniger genau) enthält. Hierauf können mit Hilfe eines sehr benutzerfreundlichen Interfaces sämtliche Bauwerke angelegt oder importiert werden. Auch Details wie beispielsweise Bäume, Personen, Kraftfahrzeuge oder auch eine Beschilderung sind möglich.

Der bedeutende Vorteil dieser Variante ist das schnell produzierbare Ergebnis, das innerhalb einer einzigen Software möglich wäre. Daher würde sich Infracore für konzeptionelle Entwurfsarbeiten eignen, wobei zeitgleich zur Modellierung eine an sich brauchbare Visualisierung entstehen soll. Die Zielgruppe sind auch hier besonders Planungsbüros und Auftraggeber, die sich einen Überblick über verschiedene, schnell erstellbare Konzepte verschaffen möchten und weniger Wert auf Details in der Darstellung legen.

Nachteile ergeben sich bei genauerer Betrachtung der Objekte. Die Texturen sind einfach gehalten, gleiches gilt für die softwareeigenen Objekte. Die Software setzt hauptsächlich Low-Poly-Modelle ein. Dies ist wohl der benötigten Rechenleistung für größere Modelle geschuldet, um auch dann einen guten Workflow gewährleisten zu können.

Abschließend kann Autodesk Infracore deshalb in die Qualitätsstufe „Quick & dirty Rendering“ eingeordnet werden.

5.2.3 Realitätsnahes Rendering



Abbildung 53: Rendering Bahnhof in Lumion

Unter realitätsnahes Rendering lassen sich sämtliche Produktionen einordnen, die der Realität sehr nahe kommen, sie jedoch nicht exakt widerspiegeln. Beispielsweise fällt das Ergebnis aus Lumion, welches in Abbildung 53 dargestellt ist, in diese Qualitätsstufe. Positiv hervorzuheben sind die sehr realen Texturen, welche bereits in der eingesetzten Software vorkonfiguriert und damit sofort einsatzbereit sind. Beispielsweise kommt bei näherer Betrachtung des Asphalt dessen Struktur angemessen zur Geltung. Auch die unregelmäßigen Wasseransammlungen auf der Fahrbahn und im Bankett, welche mit wenig Aufwand generiert werden konnten, sorgen für ein realistisches Erscheinungsbild. Zuletzt sind die Lichter einschließlich deren Reflexionen zu nennen. Die Rücklichter des grauen Transporters erwecken die Szene ebenso zum Leben wie die Lampen an den Bushaltestellen und Reklametafeln. Bemerkenswert sind außerdem die automatisch generierten Reflexionen des Scheinwerfers auf der nassen Fahrbahn, welche durch das entgegenkommende schwarze Auto (rechts in Abbildung 52) erzeugt werden.

Mögliche Optimierungen finden sich bei dieser Qualitätsstufe generell nur noch im Detail. Zum Beispiel würde die Kante zwischen Bankett und Gras in der Gegenwart nie exakt parallel verlaufen. Gleiches gilt für den Rand des Asphalt. Deshalb müssten diese Elemente um einige Imperfektionen ergänzt werden, sofern ein fotorealischeres Ergebnis gewünscht ist. Diese Änderungen können nicht innerhalb von Lumion erzeugt werden und es müsste deshalb auf eine umfangreiche Modellierungssoftware wie Autodesk 3ds Max zurückgegriffen werden. Allein diese Optimierungen können für einen nicht unwesentlichen zusätzlichen Zeitaufwand sorgen.



Abbildung 54: Rendering Bahnhof in Twinmotion

Ferner wurden auch die möglichen Ergebnisse aus der Software Twinmotion untersucht. Dabei handelt es sich mit großem Abstand um das preiswerteste Produkt im Rahmen der Bachelorarbeit. Die lebenslange Lizenz ist derzeit (Stand September 2020) für unter 400 € erhältlich. Die Kosten liegen damit nur bei einem Bruchteil, sofern ein direkter Vergleich mit den Preisen für Lumion angestellt wird. Hierfür werden bereits bei der bezüglich den Inhalten limitierten Version ca. 1.500 € und bei der vollumfänglichen Version rund 3.000 € aufgerufen. Für die Studienarbeit wurden ausschließlich die kostenfrei erhältlichen Studentenversionen, welche teilweise limitiert und mit Wasserzeichen versehen sind, eingesetzt.

In Abbildung 54 wird das Resultat aus Twinmotion sichtbar. Auch hier wurde das Low-Poly-Modell eines Zuges der Deutschen Bahn eingesetzt. Die Benutzeroberfläche einschließlich der Funktionen ähneln sehr dem Konkurrenzprodukt Lumion. Ferner befindet sich das Rendering aus Twinmotion auf dem nahezu gleichen hohen Niveau. Besonders das natürliche Erscheinungsbild der Personen einschließlich der detailtreuen Schattendarstellung überrascht positiv. Auch die bereits vordefinierten Texturen überzeugen in der Darstellung.

Zielgruppen dieser Qualitätsstufe könnten neben Behörden auch etwaige Bürgerbeteiligungen sein. Auf diese Weise ist es möglich, von Planungen betroffene Anlieger effektiv zu beteiligen, da oftmals das Vorstellungsvermögen in Bezug auf zweidimensionale Pläne fehlt. Sehr oft wird dieses Niveau zudem im Marketingbereich eingesetzt, um im Rahmen von Planungsvorhaben den Kunden ein aussagekräftiges Bild vermitteln zu können.

Abschließend stellt das realitätsnahe Rendering den besten Kompromiss aus Kosten aufgrund von benötigter Zeit und daraus resultierender Qualität dar.

5.2.4 Fotorealistisches Rendering



Abbildung 55: Fotorealistisches Rendern mit Autodesk 3ds Max (Quelle: Turbosquid, 2020)

Unter der Qualitätsstufe fotorealistisches Rendering wird ein Ergebnis verstanden, dass von einem realen Abbild eines Objektes nicht mehr zu differenzieren ist. Die Visualisierung wird dabei von einem Betrachter als Foto eines vermeintlich realen Objektes gesehen.

Um ein fotorealistisches Ergebnis in Autodesk 3ds Max produzieren zu können, sind mehrere Jahre Erfahrung im Bereich der Visualisierung elementar. Grund hierfür ist, dass keine Presets existieren, was unter anderem dem gewaltigen Funktionsumfang geschuldet ist. Zudem ist die

Benutzeroberfläche äußerst umfangreich, das ein schnelles Zurechtfinden ohne entsprechende Schulungen für Einsteiger so gut wie unmöglich macht. Allein im Rahmen der Modellierung stehen unzählige Tools zur Auswahl, deren Zwecke vorrangig in eigenständigem Studium herauszufinden sind. Auch im Bereich des Rendering müssen sämtliche Einstellungen manuell getroffen werden und können erst in einer jeweils separat zu berechnenden Vorschau des Renderings begutachtet werden. Nicht zuletzt arbeiten daher hauptsächlich 3D-Artists mit 3ds Max, welche den Umgang damit innerhalb der Ausbildung von Grund auf gelernt haben. All das sind wesentliche Punkte, die gegen eine geplante schnelle und teilweise Inhouse-Umsetzung im Unternehmen OBERMEYER sprechen.

Um sich dennoch ein Bild über die Möglichkeiten von 3ds Max in Verbindung mit fotorealistischem Rendering verschaffen zu können, ist in Abbildung 55 die Visualisierung eines vierspurigen Tunnels ersichtlich. Unterhalb befindet sich das dazugehörige Modell, welches in Autodesk 3ds Max 2018 konstruiert wurde. Hier machen sich sofort einige Details bemerkbar. Die exakt modellierten Ventilatoren und Lampen tragen ebenso wie die beleuchteten Hinweisschilder zu einem fotorealistischen Ergebnis bei. Ferner sind die Verkabelungen einschließlich deren Befestigungen an der Decke erkennbar. Auch die Reflektoren als Fahrbahntrennung und an den Wänden leisten ihren Beitrag für das reale Erscheinungsbild.

Abschließend lässt sich festhalten, dass 3ds Max besonders bei hoch detaillierten Szenen Einsatz finden sollte, um komplexe Modellierungsarbeit und Rendering in einer Software vereinen zu können. Zudem kann mit den vorhandenen Tools fast alles Erdenkliche modelliert und auch animiert werden.

Grundsätzlich wäre ein derartiges fotorealistisches Ergebnis auch mit Lumion möglich. Beispielsweise könnte allein das Grundmodell, in Abbildung 55 unten, in 3ds Max modelliert werden und anschließend in Lumion importiert werden. Deshalb kann der Übergang vom realitätsnahen zum fotorealistischen Rendering in Form von zusätzlicher Modellierungsarbeit aufgefasst werden, da der Unterschied vorrangig in der detaillierteren Modellierung steckt.

Zielgruppen des fotorealistischen Renderings erweisen sich als weitestgehend identisch zu dem realitätsnahen Rendering. Hinzu kommt hier die Branche Film und Fernsehen, wo in der Regel fast ausschließlich hochprofessionelle Renderings eingesetzt werden. Das erhöhte Budget für diese Qualitätsstufe sollte jeweils berücksichtigt werden.

5.3 Zeitaufwand

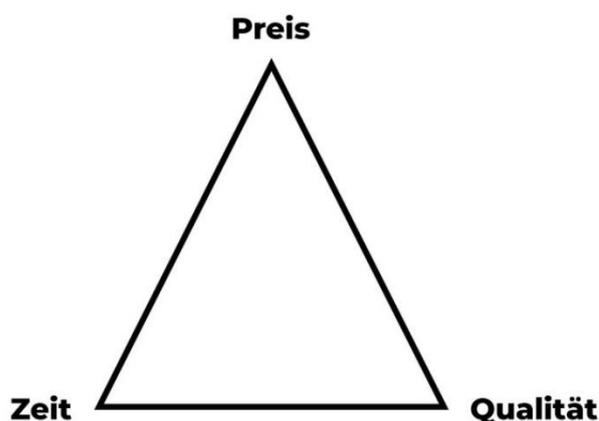


Abbildung 56: Magisches Netzdiagramm (Quelle: Studio 2038, 2020)

vermutlich die Qualität in Mitleidenschaft gezogen, da weniger Arbeitszeit für die Visualisierung aufgewandt wird. Liegt der Fokus jedoch auf Zeit und absolutem Fotorealismus, so spiegelt sich das gewiss in der Höhe des Preises wider. (Studio 2038, 2020)

In Abhängigkeit vom Kundenbudget kann grundsätzlich jedes Projekt realisiert werden. Abbildung 56 zeigt das sogenannte magische Netzdiagramm, welches sich aus dem Preis, der Zeit und Qualität zusammensetzt. Innerhalb des Dreiecks lassen sich lediglich 2 entscheidende Faktoren direkt beeinflussen. Wird beispielsweise der Fokus auf den Preis und die Zeit gesetzt, so wird

Der Zeitaufwand für die Visualisierungen im Rahmen der Bachelorarbeit war sehr unterschiedlich. Für das „Out of the box Rendering“ in Autodesk Navis Simulation waren insgesamt ca. 15 Minuten nötig. Diese teilen sich in 5 Minuten Ausschnittauswahl einschließlich Einstellungen und 10 Minuten Rendering in der Cloud bis zum abschließenden Download auf.

Die darauffolgende Qualitätsstufe „Quick & dirty Rendering“ in Autodesk Infraworks gestaltete sich als wesentlich zeitintensiver. Der Szenengestaltungsprozess hinsichtlich der zu platzierenden Objekte benötigt in etwa die gleiche Zeit wie beim „realitätsnahem Rendering“ in Lumion oder Twinmotion. Die Zeitersparnis hierbei ergibt sich lediglich durch sehr beschränkten Einstellungsmöglichkeiten hinsichtlich Belichtung, Kameraoptionen und zusätzlichen Effekten. Der Gesamtaufwand in Infraworks liegt im Fall des Demoprojekts bei etwa 5 Stunden. Bemerkenswert ist, dass ein Schnappschuss sofort gerendert wird und damit innerhalb weniger Sekunden zur Verfügung steht.

Lumion und Twinmotion verhalten sich hinsichtlich der Szenengestaltung nahezu identisch. Für eine mit InfraWorks vergleichbare Gestaltung wurden ca. 6 Stunden benötigt. Ferner betrug das Pensum für die nötigen Nachbearbeitungen, welche sich jedoch vermeiden lassen würden bei einer entsprechenden Optimierung des Ausgangsmodells, rund 4 Stunden. Vor allem das Platzieren der Füllstäbe des Brückengeländers gestaltete sich aufgrund der leichten Kurve als mühsamer Prozess. Das ständige Anpassen der Rotation und die Korrektur der Höhe war von längerer Dauer. In Lumion wurden zahlreiche Perspektiven produziert, wobei allein die Optimierung dieser mehrere Stunden gekostet hat. Ferner ist auch der Aufwand für die Belichtung innerhalb der Szene zu nennen, welcher beispielsweise die Scheinwerfer der Kraftfahrzeuge und die Straßenlaternen beinhaltet. Insgesamt betrug der Arbeitsaufwand für

die Bilder in Lumion etwa 20 Stunden. Über die Aufgabenstellung hinaus wurde auch eine kurze Filmsequenz produziert, wobei der zusätzliche Aufwand bei sehr überschaubaren 2 Stunden lag. Für das Rendering des 30 sekündigen Films wurden vom Rechner knapp 6 Stunden benötigt bei einer HD-Auflösung (1080×720 Pixel) und 60 fps. Eingesetzt wurde hierfür eine Grafikkarte von Nvidia, die GTX 1070 mit 8 Gigabyte Arbeitsspeicher. Bei Einsatz einer performanteren Grafikkarte ließe sich die benötigte Zeit selbstverständlich optimieren. Für Einzelbilder mit einer hohen Auflösung von 3840×2160 Pixel waren in Lumion jeweils knapp 2 Minuten nötig. Auch zwei 360° Panoramen auf dem Bahnsteig bzw. Gehweg wurden mit einer Auflösung von 8192×4096 Pixel gerendert. Dieser Prozess wurde bemerkenswerterweise innerhalb von weniger als 5 Minuten absolviert.

Der Zeitaufwand ließe sich mit Sicherheit, aufgrund der gesammelten Erfahrungen, bei einem weiterem Infrastrukturprojekt dieser Größe halbieren, sodass mit Lumion bzw. Twinmotion hochwertige Visualisierungen in weniger als 10 Stunden Arbeitsaufwand generiert werden können.

5.4 Möglichkeiten der Darstellung von Visualisierungen



Abbildung 57: Visualisierungen mit virtueller Realität interaktiv erleben (Quelle: Tong, 2016)

Das Szenario in Abbildung 57 ist keineswegs außergewöhnlich, denn mittlerweile integrieren immer mehr Planer Systeme die virtuelle Realität (VR) in ihr Arbeitsumfeld. Neben den verwandten Begriffen Mixed Reality (MR) und Augmented Reality (AR) wird durch Virtual Reality Gestaltern die Möglichkeit geboten, die bisherigen Grenzen der Visualisierung zu erweitern und den Kunden oder auch Kollegen neue Wege aufzuzeigen, um ein geplantes Projekt zu erleben und zu verstehen, lange bevor es tatsächlich umgesetzt wird. Mit Hilfe von VR können Architekten vermitteln, wie das Projekt aussehen soll und das Raumgefühl sein wird. VR ist,

wie die meisten technischen Branchen, schnellen Neuerungen und damit Veränderungen unterworfen. Systeme für VR existieren in unterschiedlichen Formen bereits seit mehreren Jahrzehnten, nachdem sich die erste Vorstellung eines Produkts mit Headset auf 1968 datieren lässt. Bisher war die Technik jedoch nicht flexibel genug, um ein breites Anwendungsspektrum zu ermöglichen. Besonders durch den technischen Fortschritt innerhalb der Mobilgerätechologie, der hochauflösende Bilder für große Teile der Bevölkerung möglich gemacht hat, gewann VR in den vergangenen Jahren enorm an Popularität. Mittlerweile werden Datenbrillen, im Englischen auch als „head-mounted displays“ (HMDs) bezeichnet, von vielen namhaften Unternehmen entwickelt. Bekannte Systeme sind beispielsweise Samsung Gear VR, Oculus Rift, HTC Vive, Google Cardboard und Microsoft HoloLens. Damit ist die virtuelle Realität in der Mitte der Gesellschaft angekommen und konsequenterweise erschwinglicher geworden. (O’Connell, 2016)

Obwohl sich AR, MR und VR ähneln, so stehen diese Begriffe jeweils für unterschiedliche Funktionen. Mit VR wird von den meisten Menschen das interaktive Rundum-Erlebnis mit Datenbrille und ggf. Controller verbunden. Benutzer tauchen bei VR in eine virtuelle Umgebung ein, während sie sich von der Außenwelt völlig abkapseln. Durch den Einsatz eines Controllers sind ferner weitere Funktionen möglich, z.B. Messen oder Gestalten der virtuellen Welt. Dagegen werden bei Verwendung von Augmented Reality Daten und Anweisungen animiert in unserer realen Welt dargestellt. Verwendung findet dieses System häufig bei kompakten Mobilgeräten wie bei Tablets oder Smartphones. Als bekanntes Beispiel hierfür kann die App Pokémon Go genannt werden. Professionellen Einsatz könnte ein solches System bei einer Reparatur finden, damit in Annahme ein Ingenieur einem Mechaniker eine komplexe Reparatur erklären kann, selbst wenn sich der Mechaniker auf einem anderen Kontinent befindet. (O’Connell, 2016)

Zuletzt existiert noch Mixed Reality. Diese Technologie, erklärt O’Connell, stellt eine Verknüpfung zwischen VR und AR dar. Dabei werden die virtuellen Objekte in der realen Welt abgebildet. Wenn sich zum Beispiel zwei Personen, darunter ein Statiker und ein Architekt an unterschiedlichen Orten befinden, können sie sich innerhalb einer virtuellen Welt vernetzen und danach gemeinsam an einem virtuellen Gebäude auf einer realen Baustelle arbeiten.

Die Darstellung der Bilder in unterschiedlichen Detaillierungsgraden, im Englischen auch als „level of detail“ (LOD) bezeichnet, ist ein praktischer Vorteil der virtuellen Realität. Zum Beispiel kann ein Planer bereits in ein frühzeitiges Entwurfsstadium mit Hilfe von VR eintauchen, um ein Gefühl für den Raum und die Massen zu erlangen. Für Kunden könnte das Erlebnis auch hyperreal aufbereitet werden, in dem das fotorealistische Panoramabild auf dem Gehsteig mit einer entsprechenden Soundkulisse hinterlegt wird oder gleich zu einem 360° Video ergänzt wird. (O’Connell, 2016)

Der Trend im professionellen Marketing neigt jedoch zu 360° Standbildern, welche ohne zusätzliches Equipment (Datenbrille, Controller...) komfortabel auf dem Mobilgerät betrachtet werden können. In Abbildung 58 ist ein gängiges Konzept einer Visualisierung in Neubaubereich abgebildet. Dabei kann mit Hilfe der Tastatur und Maus oder am Smartphone über einfache Wischgesten das virtuelle 360° Panorama gesteuert werden. Ferner können andere Blickwinkel angesteuert werden, welche in der Abbildung in Form vom grünen Kreis ausgewählt werden können. Durch den im Vergleich zu Videos geringen Speicherbedarfs sind 360° Standbilder im Rahmen einer virtuellen Besichtigung immer häufiger anzutreffen. (O'Connell, 2016)

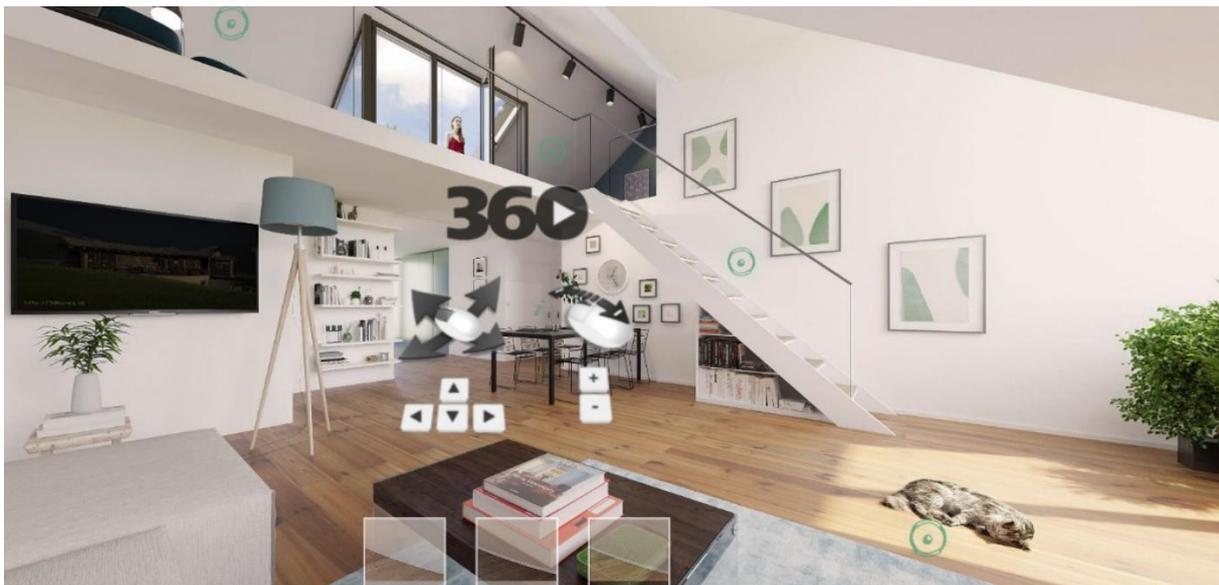


Abbildung 58: 360° Rundgang (Quelle: 3dtunez, 2020)

Dennoch werden, so O'Connell, mobile Lösungen für VR Anwendungen immer populärer. Deshalb wird innerhalb der 360° Bilder oft zusätzlich die Möglichkeit geboten, ein stereoskopisches Bild zu erzeugen, welches mit einem kostengünstigen „Cardboard-Headset“ (eine Brille aus Pappkarton) und dem Smartphone betrachtet werden kann. Der Planer kann Panoramabilder direkt über die BIM-Software wie Autodesk Revit oder mit Hilfe eines Visualisierungstools wie beispielsweise Autodesk 3ds Max wiedergeben und die Resultate über Fremddienstleister wie „VRto.me“ im Netz zur Ansicht freigeben, ohne dass die Installation zusätzlicher Software nötig wird.

Abschließend hat VR hat in der Planungsbranche großes Potential. Für den effizienten Einsatz von VR benötigt man teilweise noch umfangreiche Fachkenntnis, und für Planungsbüros ist es oftmals eine Herausforderung, die notwendige Zeit für das Experimentieren mit dieser Technologie zu finden. (O'Connell, 2016)

6 Fazit und Ausblick

Die Softwarebranche wird in Zukunft noch leistungsfähigere Lösungen, bedingt durch den ständigen technischen Fortschritt, zur Verfügung stellen. Zudem liegt der Fokus schon jetzt auf einem benutzerfreundlichen Interface, das möglichst leicht zu erlernen ist. Denn nur so kann schnell eine große und momentan größtenteils noch branchenfremde Zielgruppe, worunter sämtliche Planungsbüros und Architekten fallen, erschlossen werden. In Zukunft wird Cloud-Rendering immer mehr an Bedeutung gewinnen. Damit fällt eine große Hürde, die oft sehr kostspielige Hardware, weg. Als Konsequenz davon ist eine Gestaltung der dreidimensionalen Szene an preiswerten und mobilen Geräten, bis hin zu Smartphone-Apps, denkbar. Bei besonderen High-End-Visualisierungen wird jedoch auch in naher Zukunft kein Weg an spezialisierten 3D-Artists, welche vorwiegend mit der komplexen und zeitintensiven Software 3ds Max arbeiten, vorbeiführen.

Ziel der Hersteller ist es jedoch viel mehr, nahezu jedem in der Planungsbranche eine Möglichkeit zu geben, seine eigenen Visualisierungen anfertigen zu können. Das hat zur Folge, dass die Lücken, die zwischen Planern und externen Büros für Visualisierung oftmals entsteht, effizient vermieden und Kosten eingespart bzw. die Wertschöpfung im eigenen Unternehmen umgesetzt werden kann. Damit kann der Planer die Vision und Ausstrahlung einer Visualisierung unmittelbar selbst beeinflussen. Ferner entfallen auch die zeitlichen Unsicherheiten, die oftmals mit der Beauftragung einer externen Firma einhergehen.

Davon kann auch OBERMEYER profitieren. Der Einsatz einer einfach zu erlernenden Software würde das Leistungsspektrum optimal abrunden. Damit wäre die Konzeption eines Projektes über die Detailplanung bis hin zur fotorealistischen Visualisierung „Inhouse“ möglich. Als einzige Hürde hierbei kann der erfolgreiche Import gesehen werden. Dass dieser problemlos möglich sein kann, hat die Variante über Revit mit einem speziellen Plugin für Lumion bewiesen. Andererseits kann der Import auch Schwierigkeiten bereiten, wie es im Rahmen der Bachelorarbeit analysiert wurde. Deshalb gilt es, die Ausgangsdatei in ProVI hinsichtlich der getroffenen Exporteinstellungen zu untersuchen. Ist dieses Problem gelöst, so steht Visualisierungen in den verschiedensten Qualitätsstufen aus den unterschiedlichen Programmen nichts mehr im Weg.

Als bester Kompromiss zwischen Zeitaufwand und Qualität hat sich Lumion herauskristallisiert. Viele Ergebnisse davon finden sich im Anhang. Besonders lohnt sich der Blick auf die zusätzlich erstellten 360° Panoramen, da diese Perspektiven immer häufiger im Marketing anzutreffen sind und, wie im vorherigen Kapitel geschildert, auch Planungsbüros neue Chancen eröffnen. Alternativ ist auch der Einsatz von Twinmotion denkbar. Im Optimalfall wäre, sofern die

Optimierungsvorschläge des Modells berücksichtigt werden und somit keine Nacharbeiten nötig werden, die Realisierung einer Visualisierung in der Größenordnung des Demoprojekts in weniger als einem Arbeitstag möglich. Denn der Prozess beschränkt sich dabei lediglich noch auf die Texturierung und Szenengestaltung. Zuletzt wird das normalerweise benötigte Fachwissen hinsichtlich Szenenbeleuchtung durch vorgefertigte Presets abgenommen, die je nach gewünschter Atmosphäre aktiviert werden können.



Abbildung 59: Visualisierung der Winterlandschaft in Lumion

All das sind Prozesse, die in der Praxis tatsächlich eine Begeisterung für die Software nach sich ziehen, da die Gestaltung der Szene dank des intuitiven Interfaces äußerst leicht fällt und der eigenen Kreativität (vgl. Abbildung 59) keine Grenzen gesetzt sind.

Literaturverzeichnis

- 3dtunez. (2020). *Interaktiver 360° Rundgang*. Abgerufen am 21. 09. 2020 von <https://www.3dtunez.de/360-hofmann-01.html>
- Adobe. (2017). *Aliasing und Glätten*. Abgerufen am 25. 05. 2020 von <https://helpx.adobe.com/de/photoshop-elements/key-concepts/aliasing-anti-aliasing.html>
- Akenine-Möller, T., Haines, E., & Hoffman, N. (2018). *Real-time Rendering*. Taylor & Francis Ltd. doi:<https://doi.org/10.1201/b22086>
- Atwood, J. (2011). *What Is FXAA, And Why Has It Made Anti-Aliasing As We Know It Obsolete?* Abgerufen am 25. 05. 2020 von <https://www.kotaku.com.au/2011/12/what-is-fxaa/>
- Autodesk. (2014). *Introduction to UV mapping*. Abgerufen am 02. 06. 2020 von <https://knowledge.autodesk.com/support/maya/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Maya/files/UV-mapping-overview-Introduction-to-UV-mapping-htm.html>
- Autodesk. (2018). *AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK*. Abgerufen am 19. 05. 2020 von <https://knowledge.autodesk.com/de/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/DEU/Inventor-Help/files/GUID-7E605E33-12BA-44E6-A535-B1EE0268C37C-htm.html>
- Autodesk. (2019). *Displacement maps*. Abgerufen am 03. 06. 2020 von <https://knowledge.autodesk.com/support/maya/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Maya-LightingShading/files/GUID-E7A03E4E-8C9A-4B62-8218-28FC063A82AB-htm.html>
- Autodesk. (2020). *Software für 3D-Rendering*. Abgerufen am 18. 05. 2020 von <https://www.autodesk.de/solutions/3d-rendering-software>
- Autodesk. (2020). *Software für die Planung und Konzeption im Infrastrukturbau*. Abgerufen am 17. 05. 2020 von <https://www.autodesk.de/products/infraworks/features>
- Bau Messe München. (2020). *Lumion - Die Software für 3D Architekturvisualisierung*. Abgerufen am 15. 08. 2020 von <https://exhibitors.bau-muenchen.com/en/exhibitors-products/service-product-description/service-product-description-details/objId/137/actionpro/detail/controllerpro/Products/>

- Blender. (2020). *Light Objects*. Abgerufen am 22. 05. 2020 von https://docs.blender.org/manual/en/latest/render/lights/light_object.html
- Bullhost. (2018). Abgerufen am 21. 05. 2020 von <https://www.bullhost.de/v/vertex-shader.html>
- Caulfield, B. (2018). *What's the Difference Between Ray Tracing and Rasterization?* Abgerufen am 24. 05. 2020 von <https://blogs.nvidia.com/blog/2018/03/19/whats-difference-between-ray-tracing-rasterization/>
- Chopine, A. (2011). *3D Art Essentials: The Fundamentals of 3D Modeling and Animation*. Taylor & Francis Ltd. doi:<https://doi.org/10.4324/9780240814728>
- ComputerBild. (2018). *Pixel-Shader: Das müssen Sie über die Technik wissen!* Abgerufen am 21. 05. 2020 von <https://tipps.computerbild.de/software/systemsoftware/pixel-shader-das-muessen-sie-ueber-die-technik-wissen-585937.html>
- Denham, T. (2020). *What is High & Low Poly in 3D Modeling?* Abgerufen am 14. 09. 2020 von <https://conceptartempire.com/high-vs-low-poly-modeling/>
- Dusterwald, S. (2016). *Path Tracing vs Ray Tracing*. Abgerufen am 23. 05. 2020 von <https://www.dusterwald.com/2016/07/path-tracing-vs-ray-tracing/>
- Easyrender. (2020). *Lumion 3D*. Abgerufen am 17. 05 2020 von <https://www.easyrender.com/a/lumion-3d>
- EinsteinConcept. (2020). *3D-Warehouse*. Abgerufen am 13. 09. 2020 von <https://sketchup.einsteinconcept.de/produkte/3d-warehouse>
- Elecosoft. (2020). *Twinmotion 2020 – Rendering und Videos in Echtzeit*. Abgerufen am 05. 09. 2020 von https://elecosoft.de/software/visualisierung/twinmotion/?gclid=Cj0KCQjwqrb7BRDIARIsACwGad7dBTISaSXf4cnltxZKrzHMPvsl77HM1fq_iwdRAMb3j4kFTIMsQjMaAiL2EALw_wcB
- File Type Advisor. (2020). *DAE Dateien öffnen*. Abgerufen am 28. 05. 2020 von <https://www.filetypeadvisor.com/de/extension/dae>
- FileTypes. (2020). *Dateiendung 3DS*. Abgerufen am 28. 05. 2020 von <https://www.filetypes.de/extension/3ds>
- Frost, N. (2020). *Was ist Anti-Aliasing*. Abgerufen am 25. 05. 2020 von <https://www.cwhonors.org/de/was-ist-anti-aliasing/>
- GEObranchen. (2019). *ProVI startet durch*. Abgerufen am 09. 07. 2020 von <https://www.geobranchen.de/mediathek/geonews/item/provi-startet-durch>

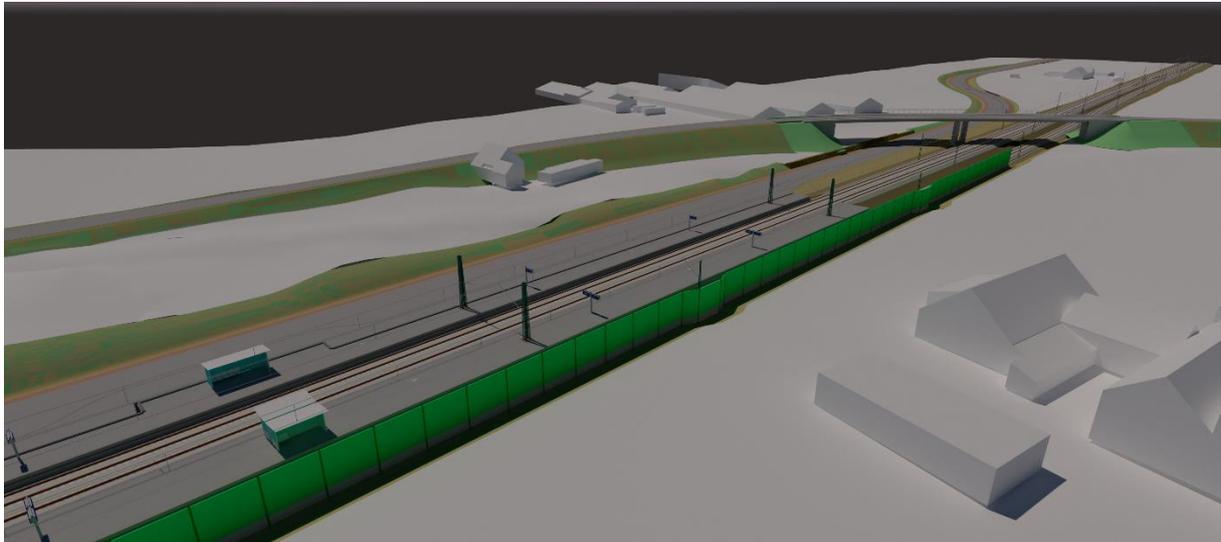
- Griggs, M. (2016). *Get started with cloud rendering*. Abgerufen am 18. 05. 2020 von <https://www.creativebloq.com/3d/get-started-cloud-rendering-51620443>
- Hearn, P. (2019). *What is Path Tracing and Ray Tracing? And Why do They Improve Graphics?* Abgerufen am 21. 06. 2020 von https://www.online-tech-tips.com/wp-content/uploads/2019/06/Ray_trace_diagram.png.webp
- Imaginit. (2020). *Top reasons to try accelerate infrastructure design*. Abgerufen am 10. 09. 2020 von <https://resources.imaginit.com/brochures/top-reasons-to-try-infraworks>
- ITWissen. (2012). *Schattierung*. Abgerufen am 21. 05. 2020 von <https://www.itwissen.info/Schattierung-shading.html>
- ITWissen. (2013). *Flat-Shading*. Abgerufen am 21. 05. 2020 von <https://www.itwissen.info/Flat-Shading-flat-shading.html>
- Krömker, D. (2001). *Graphische Datenverarbeitung*. (G.-U. Frankfurt, Hrsg.) Abgerufen am 20. 05. 2020 von https://www.gdv.informatik.uni-frankfurt.de/lehre/ss2001/Folien/GDV/GDV_12_RayTracing_und_Radiosity.pdf
- Lobeck, F. (2014). *Virtuelle Produktdarstellung*. Abgerufen am 06. 09. 2020 von https://www.uni-due.de/imperia/md/content/vip/v-virtproduktdarst_ss17.pdf
- Lumion. (2020). *Darum setzen BIM Architekten auf Lumion*. Abgerufen am 13. 09. 2020 von <https://www.lumion3d.de/autodesk-revit-export>
- Lumion. (2020). *Die Software für 3D Architekturvisualisierung*. Abgerufen am 17. 05. 2020 von <https://www.lumion3d.de/>
- Lumion. (2020). *Lumion 10: Materials - Displacement Maps*. Abgerufen am 10. 06. 2020 von <https://support.lumion.com/hc/en-us/articles/360044478353-Lumion-10-Materials-Displacement-Maps>
- Maxon. (2020). *Global Illumination*. Abgerufen am 22. 05. 2020 von <https://help.maxon.net/de/index.html#32219>
- MB CAD. (2020). *DWG-Datei*. Abgerufen am 28. 05. 2020 von <https://www.mbcad.de/glossar/dwg-datei/>
- Mills, M. (2020). *Was ist Anti-Aliasing und wie funktioniert es?* Abgerufen am 25. 05. 2020 von <https://itigic.com/de/what-is-anti-aliasing-and-how-does-it-work/>
- O'Connell, K. (2016). *4 Tipps für erste Anwendungen von Virtual Reality in der Architektur*. Abgerufen am 21. 09. 2020 von <https://www.autodesk.de/redshift/virtual-reality-in-architecture/>

- Pcmag. (2020). *vertex shader*. Abgerufen am 21. 05. 2020 von <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/vertex-shader>
- Petty, J. (2020). *What is 3ds Max & What is it Used For?* Abgerufen am 17. 05. 2020 von <https://conceptartempire.com/what-is-3ds-max/>
- Pluralsight. (2014). *Area Light*. Abgerufen am 22. 05. 2020 von https://www.pluralsight.com/content/dam/pluralsight/blog/dt/wp-uploads/2014/01/Ceiling_Light.jpg
- Pluralsight. (2014). *Eliminate Texture Confusion: Bump, Normal and Displacement Maps*. Abgerufen am 03. 06. 2020 von <https://www.pluralsight.com/blog/film-games/bump-normal-and-displacement-maps>
- Pluralsight. (2014). *Understanding UVs*. Abgerufen am 02. 06. 2020 von <https://www.pluralsight.com/blog/film-games/understanding-uvs-love-them-or-hate-them-theyre-essential-to-know>
- Pülz, G. (2002). *DXF-Datenaustausch*. (B. -U. WEIMAR, Hrsg.) Abgerufen am 28. 05. 2020 von <http://puelz.net/dxf.pdf>
- Purgathafer, W. (2020). *Globale Beleuchtung: Radiosity*. Abgerufen am 20. 05 2020 von <https://www.cg.tuwien.ac.at/courses/CG1/textblaetter/11%20Radiosity.pdf>
- Rados, S. (2014). *Path Tracing*. Abgerufen am 21. 06. 2020 von https://fudzilla.com/images/stories/Reviews/Graphics/Nvidia/Maxwell/GTX_980/Reference/VXGI-1.jpg
- Schechter, S. (2020). *Everything You Need to Know About Using FBX Files*. Abgerufen am 28. 05. 2020 von <https://www.marxentlabs.com/fbx-files/>
- Scratchapixel. (2020). *Rasterization: a Practical Implementation*. Abgerufen am 24. 05. 2020 von <https://www.scratchapixel.com/lessons/3d-basic-rendering/rasterization-practical-implementation>
- Spektrum Akademischer Verlag. (2001). *Lexikon der Kartographie und Geomatik*. Abgerufen am 21. 05. 2020 von <https://www.spektrum.de/lexikon/kartographie-geomatik/phong-shading/3859>
- Spoerl, M., & Haluschak, B. (2001). *Gouraud-Shading*. Abgerufen am 21. 05. 2020 von <https://www.tecchannel.de/a/das-tecchannel-3d-lexikon-g-bis-r,401410,2>
- Stiemer, F. (2012). *Grafikkarte Bild für Bild erklärt*. Abgerufen am 19. 05. 2020 von <https://www.pcwelt.de/ratgeber/Hardware-Grundlagen-Die-Grafikkarte-Bild-fuer-Bild-erklaert-6084561.html>

- Studio 2038. (2020). *Kosten 3D Rendering*. Abgerufen am 21. 09. 2020 von <https://www.studio2038.com/3d-rendering-kosten-preis/>
- Teprode. (2013). *www.teprode.org*. Abgerufen am 29. 08. 2020 von <http://teprode.org/cadmodelle.html>
- The Imagery. (2020). *Ein Rendering entsteht*. Abgerufen am 23. 05. 2020 von <https://the-imagery.net/rendering/>
- Tong, M. (2016). *4 Tipps für erste Anwendungen von Virtual Reality in der Architektur*. Abgerufen am 18. 09. 2020 von <https://cdn.redshift.autodesk.com/sites/3/2017/01/virtual-reality-in-architecture-header.jpg>
- Turbosquid. (2020). *Tileable Straßentunnel 01 3D-Modell*. Abgerufen am 15. 09. 2020 von <https://www.turbosquid.com/de/3d-models/tileable-road-tunnel-3d-1259980>
- Tutorialboneyard. (2020). *What is 3ds Max? An Introduction* Abgerufen am 17. 05. 2020 von <https://www.tutorialboneyard.com/3ds-max-introduction/>
- Ubisoft. (2020). *What is Vertex and Pixel Shading?* Abgerufen am 21. 05. 2020 von <https://support.ubisoft.com/en-us/Faqs/000010031/What-is-Vertex-and-Pixel-Shading-1364550233142>
- Universität Duisburg-Essen. (2014). Abgerufen am 06. 09. 2020 von https://www.uni-due.de/imperia/md/content/vip/v-virtproduktdarst_ss17.pdf
- Unreal Engine. (2020). *Real-time immersive 3D architectural visualization*. Abgerufen am 17. 05. 2020 von <https://www.unrealengine.com/en-US/twinmotion>
- Vöhringer, S. (2020). *Die Grundlagen des Texture Mapping*. Abgerufen am 02. 06. 2020 von http://www.lichtundliebe.info/projects/Silverlight/texturemapping_sascha.pdf
- Wünsch, A., & Pilz, F. (2020). *Siemens NX für Einsteiger – kurz und bündig*. Springer Vieweg. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-658-29589-9_1
- Zeman, N. (2014). *Essential Skills for 3D Modeling, Rendering, and Animation*. A K PETERS LTD. doi:<https://doi.org/10.1201/b17637>

Anhang A

A.1 Visualisierung in Autodesk Navisworks Simulation



A.2 Visualisierung in Autodesk InfraWorks



A.3 Visualisierung in Twinmotion – Bahnhof



A.4 Visualisierung in Lumion - Bahnsteig (Nacht)



A.5 Visualisierung in Lumion - Busbahnhof (Nacht)



A.6 Visualisierung in Lumion - Busbahnhof (Tag)



A.7 Visualisierung in Lumion – Landstraße 1 (Tag)



A.8 Visualisierung in Lumion – Landstraße 1 (Dämmerung)



A.9 Visualisierung in Lumion – Szenerie (Tag)



A.10 Visualisierung in Lumion – Szenerie (Nacht)



A.11 Visualisierung in Lumion – Landstraße 2 (Tag)



A.12 Visualisierung in Lumion – Landstraße 2 (Regen)



A.13 Visualisierung in Lumion – Bushaltestelle



A.14 Visualisierung in Lumion – Detail Gabionen (Regen)



A.15 Visualisierung in Lumion – Detail Wasserführung (Regen)



A.16 Visualisierung in Lumion – Detail Wasserführung (Winter)



A.17 Visualisierung in Lumion – Blick von der Brücke (bewölkt)



A.18 Visualisierung in Lumion – Blick von der Brücke (Regen)



Anhang B

Auf dem beigefügten Datenträger befindet sich folgender Inhalt:

- Der schriftliche Teil der Arbeit als PDF-Dokument
- Die von OBERMEYER zur Verfügung gestellten Daten des Demomodells
- Titelbild der Arbeit für die Webseite des Lehrstuhls
- Die gerenderten Visualisierungen (Bilder, Film, Panoramen)

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ich versichere außerdem, dass die vorliegende Arbeit noch nicht einem anderen Prüfungsverfahren zugrunde gelegen hat.

München, 4. November 2020

Michael Thusbaß

Michael Thusbaß

