

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Diplomová práce

**Možnosti streamování ve vysokém rozlišení a jeho vliv
na kvalitu obrazu a datové přenosy**

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Autor práce: Bc. Pavel Myslík

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Pavel Myslík

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Možnosti streamování ve vysokém rozlišení a jeho vliv na kvalitu obrazu a datové přenosy

Název anglicky

Possibilities of Streaming in High Resolution and its Influence on Image Quality and Data Transfer

Cíle práce

Cílem práce je popsat a otestovat všechny dostupné softwarové a hardwarové technologie pro streamování obrazu ve vysokém rozlišení.

Metodika

V diplomové práci budou zhodnoceny softwarové a hardwarové technologie pro streamování obrazu ve vysokém rozlišení:

a) SW: VRED, VRAY, VRUT

b) HW: NVIDIA, BARCO...

Autor by se měl zaměřit na porovnání streamování obrazu s raw daty a dále by měl popsat vliv streamování na HW nároky a propustnost sítě.

Doporučený rozsah práce

50 – 60 str.

Klíčová slova

Streamování, vysoké rozlišení, datové přenosy, raw data, kvalita obrazu

Doporučené zdroje informací

MÖLLER, T., HAINES, E., HOFFMAN, N.: Real-time rendering. Milton, Chapman and Hall/CRC, 2018. ISBN 9781138627000

ŠONKA, M. HLAVÁČ, V.: Počítačové vidění. V Praze: Grada, 1992. Nestůjte za dveřmi. ISBN 80-85424-67-3.

ŽÁRA, J. BEDŘICH, B. SOCHOR, J. FELKEL, P.: Moderní počítačová grafika. Computer Press, 2005. ISBN 80-251-0454-0

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Konzultant

Miroslav Machač

Elektronicky schváleno dne 11. 2. 2021

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 20. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Možnosti streamování ve vysokém rozlišení a jeho vliv na kvalitu obrazu a datové přenosy" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu práce prof. Ing. Jaromíru Volfovi, DrSc., za jeho odborné rady, připomínky a pomoc při psaní této diplomové práce. Dále také svému konzultantovi ze společnosti Škoda Auto Miroslavovi Macháčovi za jeho odborný dohled nad touto prací.

Možnosti streamování ve vysokém rozlišení a jeho vliv na kvalitu obrazu a datové přenosy

Abstrakt

Diplomová práce popisuje hardwarové a softwarové technologie streamování, které jsou ve společnosti Škoda Auto dostupné nebo by mohly být přínosné. Na začátku práce je popsána digitalizace a zpracování obrazu, což je důležitou součástí streamování. Následuje definování vykreslení neboli renderování obrazu společně s jeho metodami, kde je také porovnání mezi CPU a GPU renderingem. Dále jsou v kapitole technologie streamování podrobně popsány hardwarové a softwarové kodéry také, jak dochází ke kódování a dekódování videa a streamovací protokoly, jenž umožňují přenos celého streamu. V praktické části jsou hardwarové a softwarové kodéry otestovány ve společnosti Škoda Auto a následně shrnuty výsledky testování. Cílem práce je porovnání streamování obrazu s raw daty a popsání vlivu streamování na hardwarové nároky, propustnost sítě a kvalitu obrazu.

Klíčová slova: Streamování, vysoké rozlišení, datové přenosy, raw data, kvalita obrazu

Possibilities of Streaming in High Resolution and its Influence on Image Quality and Data Transfer

Abstract

The diploma thesis describes the hardware and software streaming technologies that are available at Škoda Auto or could be beneficial. At the beginning of the thesis, digitization and image processing are described, which is an important part of streaming. This is followed by the definition of rendering or image rendering together with its methods, where there is also a comparison between CPU and GPU rendering. Furthermore, the chapter on streaming technology describes hardware and software encoders in detail, as well as how video is encoded and decoded, and streaming protocols that allow the transmission of the entire stream. In the practical part, hardware and software encoders are tested at Škoda Auto and then the test results are summarized. The aim of this thesis is to compare image streaming with raw data and describe the effect of streaming on hardware requirements, network throughput and image quality.

Keywords: Streaming, High resolution, Data transfer, Raw-data, Image quality

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1 Úvod..... | 1 |
| Cíl práce a metodika..... | 3 |
| 1.1 Cíl práce | 3 |
| 1.2 Metodika | 3 |
| 2 Teoretická východiska | 4 |
| 2.1 Digitalizace a zpracování obrazu | 4 |
| 2.1.1 Snímání obrazu | 4 |
| 2.1.2 Kvantování obrazu | 4 |
| 2.1.3 Vzorkování..... | 5 |
| 2.1.4 Segmentace obrazu | 5 |
| 2.2 Renderování obrazu | 7 |
| 2.2.1 Porovnání CPU a GPU renderingu | 7 |
| 2.2.2 Ray tracing | 9 |
| 2.2.3 Rasterizace | 11 |
| 2.2.4 Radiozita | 12 |
| 2.3 Zobrazovací zařízení | 13 |
| 2.3.1 Monitory | 14 |
| 2.3.2 VR Brýle..... | 16 |
| 2.4 Technologie streamování | 18 |
| 2.4.1 Kódování videa | 18 |
| 2.4.2 Dekódování videa | 20 |
| 2.4.3 Softwarové kodéry | 20 |
| 2.4.4 Hardwarové kodéry..... | 23 |
| 2.4.5 Kodek..... | 27 |
| 2.4.6 Streamovací protokoly | 29 |
| 3 Vlastní práce..... | 33 |
| 3.1 Software VRED | 33 |
| 3.1.1 Streamování z Apola přes interní síť | 34 |
| 3.1.2 Streamování z Apola přes HPC síť..... | 36 |
| 3.1.3 Streamování ze stanice..... | 36 |
| 3.2 Software VRUT | 37 |
| 3.3 Software Unreal Engine | 40 |
| 3.4 Software V-Ray Standalone..... | 41 |
| 3.5 VDI..... | 41 |
| 3.6 Barco NGS-D320 Lite..... | 44 |

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| 3.7 | Výsledky..... | 45 |
| 3.7.1 | Softwarové kodéry | 45 |
| 3.7.2 | Hardwarové kodéry..... | 47 |
| 4 | Závěr..... | 48 |
| 5 | Seznam použitých zdrojů..... | 50 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 GPU renderování | 9 |
| Obr. 2 CPU renderování | 9 |
| Obr. 3 Vypnutý ray tracing | 10 |
| Obr. 4 Zapnutý ray tracing..... | 11 |
| Obr. 5 Jednotlivá rozlišení obrazu [13] | 14 |
| Obr. 6 XTAL 8K Headset [18] | 17 |
| Obr. 7 HTC VIVE Pro Headset [17]..... | 17 |
| Obr. 8 NVIDIA Shield [29] | 25 |
| Obr. 9 NVIDIA Shield Pro [29]..... | 25 |
| Obr. 10 Barco NGS-D320 Lite [32] | 26 |
| Obr. 11 Výchozí model pro streamování | 33 |
| Obr. 12 Stream ve 4K rozlišení | 35 |
| Obr. 13 Stream ve Full HD rozlišení | 35 |
| Obr. 14 Stream ve QHD rozlišení..... | 36 |
| Obr. 15 VRUT 4K stream..... | 38 |
| Obr. 16 VRUT QHD stream | 39 |
| Obr. 17 VRUT Full HD stream | 39 |
| Obr. 18 Unreal Engine Full HD stream | 40 |
| Obr. 19 VDI 4K stream..... | 42 |
| Obr. 20 VDI QHD stream..... | 43 |
| Obr. 21 VDI Full HD stream | 43 |

Seznam použitých zkratk

CPU Central Processing Unit

GPU Graphics Processing Unit

FPS Frames Per Second

HD High Definition

QHD Quad High Definition

OLED Organic Light-Emitting Diode

LCD Liquid Crystal Display

VR Virtual Reality

VDI Virtual Desktop Infrastructure

HPC High Performance Computing

1 Úvod

Ve společnosti Škoda Auto a.s. potřebují klienti každý den zobrazovat vykreslené 3D modely v reálném čase a ve vysokém rozlišení pro potřeby daného oddělení. Nové technologie a přání klientů zvyšují nároky a požadavky na hardware a datové přenosy, proto je potřeba do blízké budoucnosti přinést rozumné řešení, kterým je využití možnosti streamování obrazu a snížení tak nároků na hardware, a hlavně datové přenosy.

V současné době je situace řešena na základě stanice, která k vyrenderování daného modelu využívá výpočetní výkon clusteru (skupina spolupracujících počítačů). Z počítače jsou posílána data na cluster o datovém průtoku Megabajtů za sekundu (MB/s), kde tedy cluster model zpracuje a vyrenderuje. Pro odeslání dat zpět do počítače je nutná segmentace obrazu, při které dojde k rozdělení obrazu na dané části. Počítač klienta pak přijímá raw data o velikosti datového průtoku desítek Gigabajtů za sekundu, což je velký objem dat. Následně jsou data přenesena do projektoru, který nejčastěji promítá data na powerwally, respektive promítací stěny vysokého rozlišení.

Samozřejmě se vyskytují různé požadavky klientů, zejména přenos obrazu do brýlí virtuální reality ve 4K rozlišení a zároveň při snímkové frekvenci 90 snímků za sekundu. Dále to jsou také nově přicházející 8K powerwally, na kterých by klienti rádi prezentovali své modely. Obecným požadavkem je samozřejmě rozlišení alespoň 4K, co nejvíce FPS, a co nejmenší latence při zachování kvality obrazu. V současné době musí být v počítačích síťové karty kvůli výskytu různých druhů optických sítí, čemuž by se samozřejmě s využitím streamingu mohlo předejít. Do současné situace se společnost dostala postupným vývojem. V úplných začátcích měli klienti stanice u sebe a nepotřebovali tak výpočetní výkon clusteru. Modely se totiž renderovaly pouze do rozlišení Full HD, a tak výpočetní výkon jedné stanice naprosto stačil.

Na začátku této diplomové práce, která se zabývá právě problematikou streamování, je popsána digitalizace a zpracování obrazu, což považuji za důležitou součást streamování. Dále je definováno renderování obrazu, jeho metody a porovnán rozdíl mezi renderováním grafickým procesorem a renderováním hlavním procesorem. Následuje kapitola technologie

streamování, kde jsou uvedeny softwarové a hardwarové kodéry, které se již ve společnosti využívají nebo by se případně mohly využívat.

Praktická část je věnována testování jednotlivých kodérů a vyhodnocení výsledků na základě vlastností streamu s měnícím se rozlišením. Mezi hlavní pozorované vlastnosti patří datový tok, kvalita obrazu, vytížení hardwaru a počet zobrazených snímků za sekundu.

Cíl práce a metodika

1.1 Cíl práce

Cílem mé práce bude popsat a otestovat všechny dostupné softwarové a hardwarové technologie pro streamování obrazu ve vysokém rozlišení, které jsou používány ve společnosti Škoda Auto, nebo by mohly být pro společnost v oblasti streamování přínosné.

1.2 Metodika

Metodikou této práce bude nejprve nastudovat a prozkoumat možnosti a technologie streamování, které budou zpracovány v teoretické části. V praktické části budou otestovány softwarové a hardwarové kodéry pro streamování obrazu ve vysokém rozlišení. Autor by se měl zaměřit na porovnání streamování obrazu s raw daty a dále by měl popsat vliv streamování na hardwarové nároky, propustnost sítě a kvalitu obrazu.

2 Teoretická východiska

2.1 Digitalizace a zpracování obrazu

Jelikož se tato práce zaměřuje na streamování dat obrazu, je důležité vědět, co to obraz vlastně je a rád bych také stručně popsal, jak dochází k jeho zpracování.

Reálný obraz je definován jako nějaká spojitá funkce, kdežto obraz v počítači je diskrétní. Snímaný obraz má teoreticky nekonečný rozsah obrazových hodnot. Bude však zobrazen konečným množstvím pixelů v konečném počtu barev. Přejít ze spojité funkce obrazu na obraz diskrétní se nazývá digitalizace obrazu, která probíhá ve dvou krocích, konkrétně kvantování a vzorkování. [1]

Průběh zpracování a rozpoznávání obrazu reálného světa je obvykle rozdělen do několika kroků. Základem pro zpracování a rozpoznání obrazu je vlastní získání obrazu reálného světa, následný převod do digitální formy vhodné pro uložení a další zpracování v počítači či jiném zařízení. [2]

2.1.1 Snímání obrazu

Jedná se o převod optické veličiny na elektrický signál, který je spojitý v čase i úrovni. Na výsledný obraz má vliv spousta různých faktorů. Například ozáření snímaného objektu a jeho vlastnosti. Pokud jsou ale předem dané některé veličiny, jakými jsou např. právě ozáření a odrazivost povrchu, mohou nám pomoci při částečné rekonstrukci 3D modelu z 2D obrazu, který získáme při snímání.

Vstupní informací při snímání nemusí být vždy jen jas z kamery či scannery, ale mohou jí být i jiné veličiny, jako jsou ultrazvuk či tepelné záření. [2]

2.1.2 Kvantování obrazu

Kvantování se řadí ke skupině úprav pro redukci barev, jejichž úkolem je omezit paletu barev výstupního obrazu. Jde o obor hodnot obrazové funkce, který se rozdělí na intervaly, jimž je následně přidělena jediná zástupní hodnota. Zástupnou hodnotou bývá obvykle průměr celého intervalu. V podstatě jde o to, že kvantovaná funkce nemůže nabývat

jakékoliv hodnoty. Souvisí to s reprezentací hodnoty kvantované funkce jako dvojkového čísla, které má svou velikost omezenou v Bytech.

Podle způsobu rozdělení kvantované veličiny dělíme kvantování na uniformní a neuniformní. Uniformní kvantování využívá konstantní délku intervalu a používá se častěji, protože se snadněji realizuje. Neuniformní kvantování využívá proměnnou délku intervalu. Je méně časté, avšak má své využití, zejména při rekvantizaci obrazu, kdy se převádí obrázky s velkým barevným rozlišením na obrázky s menším počtem barev.

Během kvantování dochází ke kvantizační chybě, která je způsobena ztrátou informace při nahrazení množiny hodnot jedinou hodnotou. [2]

2.1.3 Vzorkování

Vzorkováním rozumíme zachytávání hodnot neboli vzorků v předem daných intervalech. Vzdálenost mezi jednotlivými vzorky se nazývá perioda vzorkovacího signálu a její opačná hodnota se nazývá vzorkovací frekvence. Při vysoké vzorkovací frekvenci je zachycen kvalitnější obraz, ale s vyššími nároky na výpočetní techniku. Při malé vzorkovací frekvenci dochází ke ztrátě informace a na základě toho je méně kvalitní obraz. Tento problém řeší Shannonův teorém, který říká, že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvakrát větší než maximální frekvence signálu.

Pokud nebude dodržen Shannonův teorém, může dojít k chybě na základě ztráty informace. Chyba vzorkování se nazývá aliasing neboli zfalšování. Na základě vzorkování dojde ke zfalšování původní frekvence spojité informace. Aliasingu je nutné předcházet, protože jeho odstranění je velmi složité. Proto se před převodník spojitého signálu na diskretní zařazuje antialiasingový filtr, který má odfiltrovat vyšší frekvenci, než odpovídá Shannonovu teorému. [2]

2.1.4 Segmentace obrazu

Jedná se o nejtěžší krok u zpracování obrazu. Segmentace obrazu je v podstatě analýza obrazu vedoucí k nalezení objektů v obraze. Jako objekty jsou myšleny části obrazu, které mají být bodem zájmu v dalším průběhu zpracování. Úkolem segmentace je tedy rozdělit

obraz do částí, které odpovídají předmětům reálného světa a jejím výsledkem by měl být soubor oblastí odpovídající vstupnímu obrazu. V tomto případě se se jedná o kompletní segmentaci, pokud by ale oblasti neodpovídaly přesně objektům, mluvili bychom o částečné segmentaci. [2]

2.2 Renderování obrazu

Neboli vykreslování (dále jen rendering / renderování) je tvorba reálného obrazu na základě počítačového modelu, nejčastěji 3D. Úkolem je tedy vytvořit z modelu obraz, který je, pokud možno nerozeznatelný od fotografie daného objektu v reálném světě. Syntéza obrazu významně ovlivňuje tvorbu počítačových her, programů pro tvorbu grafiky a také CAD/CAM programy. Poslední dobou se znovu přechází na GPU renderování, které zaručuje mnohem efektivnější grafické výpočty.

Existují dva typy renderingu, renderování v reálném čase a předběžné renderování. Jejich hlavní rozdíl spočívá v rychlosti, jakou probíhá výpočet a finalizace obrázků. Vykreslování v reálném čase je typ renderování, které se využívá v interaktivní grafice a u her, kde je nutné vytvářet obrázky co nejrychleji. Důvodem vytváření obrázků v reálném čase je vysoká interakce uživatele v daném prostředí. Ke zlepšení výkonu real-time renderování (renderování v reálném čase) vede vyhrazený grafický hardware a předběžná kompilace informací.

Druhým typem renderování je renderování předběžné. Tato technika se používá tam, kde není rychlost hlavním požadavkem. Konkrétně se využívá u animací a vizuálních efektů, kde musí být výsledný obraz co nejvíce reálný. K výpočtům obrazu dochází pomocí vícejadrových centrálních procesorových jednotek, nikoli s využitím grafického hardwaru. [3]

2.2.1 Porovnání CPU a GPU renderingu

V počítačové grafice je možnost renderování pomocí hlavního procesoru počítače (CPU), nebo pomocí grafického procesoru (GPU). Delší dobu se pro renderování využívá CPU, nicméně v posledním desetiletí došlo k zdokonalení GPU, a tak je více prostoru pro jejich využití i pro výpočty raytracingu při renderování. Základní rozdíl je v tom, že CPU je schopen řešit velmi složité úkoly velkou rychlostí, ale není vhodný k paralelnímu zpracování dat. Na druhou stranu GPU není stavěný na složité úkoly, ale je schopen velmi dobře řešit velké množství jednoduchých úkolů najednou.

Důležitým faktorem, který je třeba řešit, je rychlost. Zatímco CPU má omezený počet jader, které jsou vhodné právě k provádění procesů sériově, GPU se skládají z menších jader ve větším množství než průměrný procesor, což umožňuje pracovním stanicím provádět několik procesů současně a rychleji. Hodiny zpracování lze zobrazit během několika minut a mohou zefektivnit proces návrhu při použití GPU. Pokud je tedy rychlost hlavní prioritou renderování, jsou upřednostňovány GPU.

Dalším faktorem je kvalita obrazu. Ačkoli dokončení vykreslování může trvat hodiny, tradiční renderování založené na procesoru přinese s větší pravděpodobností vyšší kvalitu obrazu bez šumu. GPU má sice mnohem více jader, než CPU, ale celkově běží každé jádro pomaleji, než jádro CPU. Když je například několik procesorů propojeno, aby pracovaly jako cluster, mohou potenciálně vyprodukovat kvalitnější výsledek, než by mohlo grafické řešení založené na GPU. Pokud tedy nedochází k limitování časem, ale je prioritou co nejlepší obraz, je vhodné použití CPU renderování.

Podstatným rozdílem je také cena hardwaru. Kromě rychlosti může být výkon jednoho GPU roven alespoň pěti až deseti CPU. To znamená, že jedna pracovní stanice může plnit úkoly několika propojených pracovních stanic založených na CPU, což umožňuje navrhovat a vyvíjet 3D modely ve vysokém rozlišení doma. GPU tedy výrazně snižují náklady na potřebný hardware a eliminují potřebu spolupráce více strojů. [4], [5]

Ve společnosti Škoda Auto jsem měl možnost tyto dvě technologie renderování porovnat. Byla mi poskytnuta pracovní stanice s téměř nejlepším hardwarem, který trh nabízí. Pro GPU renderování byly použity dvě grafické karty NVIDIA Quadro RTX 6000 a pro CPU renderování dva procesory Intel Xeon Gold 6234. Výsledkem renderování byly modely auta ve 4k rozlišení při 128 samplech a jejich kvalita je téměř totožná, viz Obr. 1 a 2. Rozhodujícím faktorem však byla rychlost, kdy grafické karty zvládly vyrenderovat obrázek mnohonásobně rychleji než procesory. Konkrétně GPU renderování trvalo 35,3 sekund a CPU renderování 3 minuty a 39,4 sekund. S vývojem grafických karet a jejich moderních technologií si tedy myslím, že GPU renderování je mnohem efektivnější, kdy při mnohonásobně vyšší rychlosti je schopné poskytnout minimálně stejně kvalitní výsledek jako CPU renderování.



Obr. 1 GPU renderování



Obr. 2 CPU renderování

2.2.2 Ray tracing

Jedná se o metodu vykreslování neboli renderování, která je schopna vytvářet neuvěřitelně realistické světelné efekty. Algoritmus ray tracingu funguje na základě sledování cesty světla a poté simuluje způsob, jakým světlo interaguje s objekty ve virtuálním světě. Ray tracing také umožňuje výrazně reálnější stíny a odrazy spolu s vylepšeným rozptylem a průsvitností. Algoritmus bere v úvahu, kde světlo dopadá a vypočítává interakci podobně, jako by lidské oko zpracovávalo skutečné světlo, stíny a odrazy. I v reálném světě ovlivňuje způsob, jakým světlo dopadá na objekty, barvy, které vidíme a stejně tomu je i právě u ray tracingu.

Nejnovější grafické procesory Nvidia zajišťují ray tracingu v reálném čase. Právě schopnost sledování paprsků v reálném čase u grafických karet RTX umožňuje přesněji modelovat účinek odrazu světla od povrchů, a to pomocí globálního osvětlení. Globální

osvětlení je proces výpočtu všech světelných interakcí ve scéně, včetně nepřímých odrazů světla od jednoho povrchu k druhému. Jinými slovy, dochází k přirozenému odrazu světla, které osvětluje a rozjasňuje okolní detaily. Dříve to bylo běžně dosahováno pomocí světelných map a světelných sond.

S dostatečným výpočetním výkonem je tedy možné vytvářet neuvěřitelně realistické obrázky a modely, které jsou k nerozeznání od skutečného světa. Ray tracing se ve velké míře používá při vývoji snímků v počítačové grafice pro filmy a televizní pořady, ale je to proto, že studia mohou využívat clustery k dokončení práce. A i tak to může být dlouhý a náročný proces. Často nemusí být ani na první pohled viditelné, že je ray tracing implementován, protože je součástí celého obrazu v graficky ohromujícím prostředí. Teprve když uživatel vidí souběžné porovnání modelu či obrazu se zapnutým a vypnutým ray tracingem, bude patrný rozdíl. [6], [7]

Porovnání zapnuté a vypnuté funkce ray tracingu je vidět na Obr. 3 a Obr. 4, kde je vyrenderovaný tentýž model automobilu v softwaru VRED. Na Obr. 3 je funkce vypnutá a na Obr. 4 je ray tracing zapnutý včetně globálního osvětlení. Již na první pohled je vidět kvalita osvětlení a stínů modelu.



Obr. 3 Vypnutý ray tracing



Obr. 4 Zapnutý ray tracing

2.2.3 Rasterizace

Úkolem rastrování neboli rasterizace je zobrazení trojrozměrných objektů na dvourozměrné obrazovce. Během rastrování jsou objekty na obrazovce tvořeny z virtuálních trojúhelníků nebo polygonů, které vytvářejí právě 3D objekty. Vrcholy těchto polygonů se vzájemně protínají s vrcholy jiných trojúhelníků různých velikostí a tvarů. V každém vrcholu je uloženo mnoho informací, včetně jeho polohy prostoru a barvy. Počítač pak dokáže převést trojúhelníky 3D modelů na pixely nebo body na 2D obrazovce. Každý pixel může mít přiřazenou barvu z dat uložených právě ve vrcholech trojúhelníků.

Pomocí stínování, které umožňuje další zpracování pixelu, může být barva změněna podle toho, jak světla ve scéně dopadají na daný pixel. Dále umožňuje použití jedné nebo více textur na pixel a kombinování a generování konečné barvy, která bude na pixel aplikována.

Celý proces rastrování je velice výpočetně náročný, zejména kvůli velkému počtu použitých polygonů ve scéně. Proto jsou potřeba velmi kvalitní grafické karty. Své využití mají i vyrovnávací paměti, které se používají k vykreslování nadcházejících snímků dříve, než se objeví na obrazovce. Musí být také zajištěno ukládání informací o hloubce pixelů, aby bylo zajištěno, že objekty v přední části obrazovky budou skryty, zatímco objekty v zadní části budou skryty.

I při velké výpočetní náročnosti je tato technika ve srovnání například s ray tracingem extrémně rychlá, a proto se používá při vykreslování v reálném čase. Nicméně výsledky nejsou vždy tak kvalitní, jako při použití ray tracingu. [8]

2.2.4 Radiozita

Radiozita je metoda globálního osvětlení scény, která je používána k renderování 3D scény. Tato metoda vychází ze zákona zachování energie, proto vyžaduje uzavřené objekty. Principem této techniky je rozdělit všechny povrchy modelu na malé plošky zvané patche a vypočítat hodnotu radiozity právě pro každou plošku. Získaná data se následně použijí k vytvoření obrázku složeného ze všech patchů viditelných z vybraného hlediska. Plošky s vysokými hodnotami radiozity jsou vykresleny jednodušeji, takže vypadají jasněji, zatímco plošky s nižšími hodnotami radiozity jsou tmavší, takže vypadají poměrně matně.

Na základě radiozity lze simulovat spousty důležitých efektů, jako je například nepřímé osvětlení prostředí, které není přímo osvětleno primárním zdrojem světla. Je to velmi důležité, protože mnoho povrchů ve vnitřním prostředí není osvětleno žádným přímým osvětlením a jsou viditelné pouze světlem, jenž se odráží od jiných povrchů difúzně. Může také fungovat jako zdroj plošného světla, což má za následek přesnější stínování a kvalitnější barevné efekty.

Hlavní výhodou použití radiozity je, že přesněji modeluje prostředí, kde jsou matné povrchy, které difúzně odrážejí světlo ve všech směrech a také na jiné matné povrchy. Obecně vnitřní prostory a interiéry jsou častým příkladem takového prostředí a radiozita je tedy důležitou metodou pro architektky, stavitele a designéry počítačové grafiky, kteří modelují vnitřní prostředí. Nevýhodou této metody je náročnost z hlediska času a paměti počítače. Další nevýhodou je, že nedokáže pracovat s průhlednými objekty či texturami. Nicméně je to jediná technika, která dokáže vyprodukovat model s fyzicky přesnými světelnými podmínkami. [9], [10]

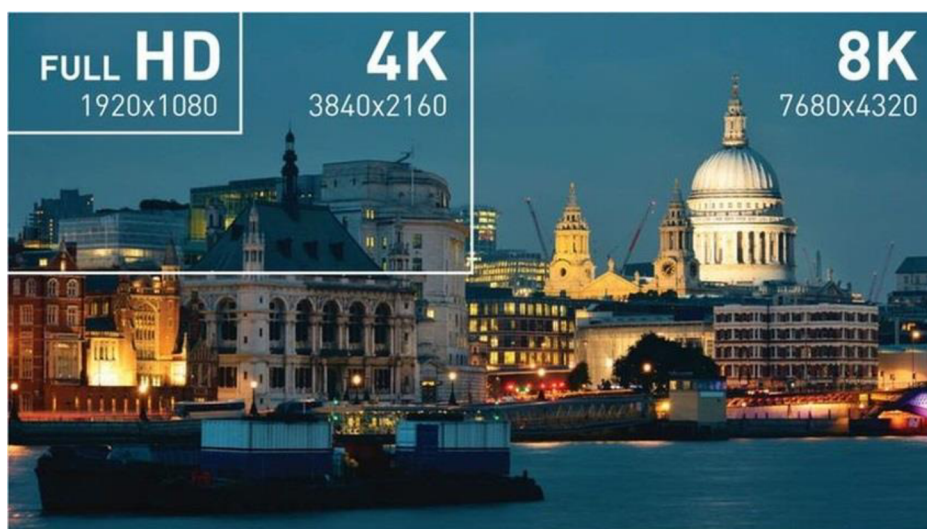
2.3 Zobrazovací zařízení

Za zobrazovací zařízení je považován hardware, jehož úkolem je prezentování dat uživateli. Slouží k zobrazování textových i grafických informací a jeho hlavní částí je obrazovka, na které se zobrazují jednotlivé pixely. Jelikož se tato práce zabývá streamováním obrazu ve vysokém rozlišení, klíčovým rozlišením bude 4K a 8K. Je to zejména kvůli počtu pixelů, což jsou obrazové body svítící různými barvami, jimiž je následně vytvořen obraz. Větší počet pixelů na dané uhlopříčce tedy znamená, že jsou pixely menší, a tím pádem je jemnější obraz. Proto je potřebný co největší počet pixelů, protože při malém počtu mají větší velikost a na krátkou vzdálenost mohou být rozeznatelné, což může mít za následek narušení kvality obrazu.

V dnešní době je 4K rozlišení neboli Ultra HD (UHD) velice rozšířené a činí nejčastěji $3\,840 \times 2\,160$ pixelů. Dle normy může mít však až $4\,096 \times 2\,304$ pixelů, takové rozlišení je pak označováno jako DCI 4K. UHD je čtyřikrát vyšší než stále rozšířené Full HD rozlišení, takže je schopno zobrazit mnohem ostřejší obraz. Streamování obrazu ve 4K rozlišení není zatím tak běžné kvůli čtyřnásobnému množství dat v porovnání s HD. I kdyby bylo možné obsah v takovémto rozlišení streamovat, vyžaduje připojení k internetu o rychlosti alespoň 25 Mb/s, což většina lidí ani nemá. [11]

Jak jsem zmínil výše, 4K obraz je v dnešní době v podstatě běžným rozlišením, a proto muselo přijít něco nového. Nástupcem 4K rozlišení je tedy 8K neboli UHD-2. Počet pixelů pro 8K v klasickém formátu 16:9 činí $7\,680 \times 4\,320$, což je čtyřikrát více než u 4K a šestnáctkrát více než u Full HD, viz Obr. 5. Proto ani při sledování z blízkosti u běžných obrazovek lidské oko nezaznamená pixelovou mřížku. U takového rozlišení se však musí počítat s obrovskou velikostí videosouboru, což je velmi náročné z hlediska datového

přenosu. Například pro streamování videa v 8K bude potřeba rychlost linky 50–100 Mb/s, přesná přenosová rychlost záleží na kodeku videa. [12]



Obr. 5 Jednotlivá rozlišení obrazu [13]

2.3.1 Monitory

Monitor je ve výpočetní technice základním výstupním zařízením, které slouží k zobrazení grafického uživatelského rozhraní. K počítači je připojen buď přes grafickou kartu, nebo je do některých zařízení rovnou integrován. V dnešní době jsou typickými monitory LCD, LED, OLED a podobné, proto se zde nebudu zabývat starými CRT monitory. [14]

2.3.1.1 LCD Monitory

Jak plyne z názvu LCD neboli Liquid Crystal Display, tento typ monitoru funguje na základě tekutých krystalů. Tekutý krystal je látka, která dokáže setrvat v kapalném a pevném skupenství a dále je schopna vytvořit krystalickou strukturu. Tyto krystaly jsou vloženy mezi průhledné elektrody a polarizační filtry a jejich stav závisí na elektrickém náboji, který je jim dodáván. Pomocí elektrického náboje dochází také k natočení krystalů, což má za následek prosvícení jednotlivých subpixelů externím zdrojem. Každý pixel je totiž tvořen třemi RGB subpixely, a právě jejich prosvícením dochází k vykreslení všech barev spektra. K odfiltrování nežádoucích barev slouží polarizační filtry. LCD monitory se dále rozdělují na pasivní STN a aktivní TFT displeje.

Výhodou LCD monitorů je nízká spotřeba elektrické energie a dále ostrost a stabilita obrazu. Naopak jejich nevýhodou je méně přesvědčivé zobrazení černé barvy, horší pozorovací úhly a vyšší doba odezvy. [15]

2.3.1.2 OLED Monitory

Monitory OLED jsou ploché počítačové displeje, které se skládají z organických světelných diod. Oproti LCD monitorům tato technologie nepotřebuje žádné podsvícení. Přesný princip technologie OLED spočívá v tom, že pokud mezi katodou a anodou protéká elektrický proud, dojde k osvětlení emisní vrstvy složené z organických molekul, která je uložena mezi elektrodami. Aby byl celý tento proces efektivní, leží mezi emisní vrstvou a anodou vodivá vrstva, jenž je tvořena organickými plastovými molekulami. Anoda jako kladně nabitá elektroda čerpá z vodivé vrstvy elektrony, přičemž vodivá vrstva zanechává kladný náboj, který čerpá elektrony z emisní vrstvy. Poté je světlo emitováno jako vedlejší produkt v procesu známém jako elektrofosforescence. Stejně jako LCD monitory se i tyto dělí na pasivní displeje PMOLED a aktivní displeje AMOLED.

Všechny výše popsané vrstvy jsou extrémně tenké a křehké, a proto musí být podepřeny vrstvou substrátu. Obvykle se jedná o čirý plast, fólii nebo sklo různé tloušťky a musí být průhledný, aby bylo vyzařované světlo na obrazovce vidět. Barva světla závisí na přesném organickém složení molekul emisní vrstvy, protože právě tyto molekuly vytvářejí pixely, které po osvětlení vyzařují danou barvu světla.

Technologie OLED je velkým krokem ve vývoji displeje, protože zcela odstraňuje podsvícení. Doba odezvy a obnovovací frekvence se také výrazně zlepšují i v porovnání s nejlepšími LCD monitory. OLED monitor by teoreticky mohl mít dobu odezvy kolem 0,01 ms a obnovovací frekvenci kolem 1000 Hz. Výrobci také zkoušejí zvyšovat počet emisních vrstev za účelem zvýšení jasů. Při porovnání s LCD monitory je OLED technologie mnohem účinnější při zobrazování černé a tmavé barvy a také umožňuje lepší pozorovací úhly. Celkově tedy obraz na OLED monitoru vypadá mnohem živější s větším jasnem a kontrastem. Důležitou funkcí OLED obrazovek je také to, že mohou být průhledné, což je známé například jako head-up displeje.

Naopak největší nevýhodou u těchto monitorů je rychlejší opotřebení modrých pixelů při porovnání s pixely červenými a zelenými. To by časem mohlo vést k problémům s vyvážením barev obrazu, což je pro počítačové monitory velkým problémem. V ojedinělých případech také může k retenci obrazu neboli „zdvojení obrazu“, což je následkem dlouhého zobrazení statického obrazu. [16]

2.3.2 VR Brýle

Brýle neboli headset pro virtuální realitu je zobrazovací zařízení s head-up displejem, který umožňuje uživatelům interakci se simulovaným prostředím, a to vše z pohledu první osoby. Je nutné zmínit, že displej zobrazuje obraz pro každé oko zvlášť. Cílem těchto brýlí je nahradit přirozené prostředí uživatele obsahem virtuální reality, ať už pro účely 3D simulace či hraní her, a to s možností rozhlížení a otáčení, stejně jako v reálném světě. Důležitým využitím virtuální reality je také při zaučování či zaškolování zaměstnanců. Software pro virtuální realitu obsahuje technologie, jako jsou sledování pohledu, IR senzory k detekci vzdálenosti, gyroskopy a akcelerometry, které přirozeným způsobem musejí měnit úhel pohledu uživatele. Nutným požadavkem na VR brýle je odstranění latence, která způsobuje dezorientaci uživatelů, bolesti hlavy a mnohdy i nevolnost.

Nejznámějšími typy headsetů pro virtuální realitu jsou Oculus Rift a Hololens od společnosti Microsoft. Rift pracuje s technologií určení polohy, která umožňuje uživateli fyzický pohyb ve 3D prostoru a má dotykové ovladače. Druhý zmiňovaný headset Hololens je samostatná náhlavní souprava pro virtuální realitu. Tento systém nabízí 3D prostorový zvuk, Wi-Fi, kameru se 120stupňovým systémem prostorového snímání, mnoho gyroskopů a akcelerometrů a průhlednou obrazovku pro každé oko.

Pro tuto práci jsou však důležitější brýle s vysokým rozlišením, jako jsou HTC VIVE Pro, VRgineers XTAL 5k a 8k, viz Obr. 6 a 7. Vybral jsem tyto brýle, protože slouží zejména pro použití v korporátech a používá je tedy i společnost Škoda Auto. VR brýle VIVE Pro mají rozlišení obou AMOLED displejů 2880 x 1600, což je 1400 x 1600 na každé oko. Důležitou vlastností těchto brýlí je obnovovací frekvence 90 Hz a zorné pole o velikosti 110 stupňů. Výhodou je rovnoměrně rozložení váhy a možnost bezdrátového připojení pomocí Bluetooth adaptéru. [17]

Profesionální VR headsety XTAL od české firmy VRgineers jsou v podstatě jedny z nejlepších na světě. Model XTAL 5K má k dispozici dva 2K OLED displeje s celkovým



Obr. 6 XTAL 8K Headset [18]

rozlišením 5120 x 1440 pixelů, tedy 5K, jak již plyne z názvu. U novějšího modelu XTAL 8K jsou to dva 4K LCD displeje s celkovým rozlišením 7680 x 2160 pixelů. Oba modely mají obnovovací frekvenci 75 Hz a zorné pole 180 stupňů. Jejich další velice užitečnou funkcí je senzor sledující pohyb rukou uživatele, který může interagovat se scénou bez použití ovladačů. Je nezbytné také zmínit, že XTAL headset podporuje softwary, jako jsou Autodesk VRED nebo Unreal Engine a je optimalizován pro profesionální grafické karty NVIDIA Quadro, takže je schopen zvládat vysoce náročné VR projekty, například design aut, kde jen malá nepřesnost může být katastrofální. [18]



Obr. 7 HTC VIVE Pro Headset [17]

2.4 Technologie streamování

Streaming neboli streamování je nepřetržitý přenos zvukových či obrazových souborů ze serveru na klienta. Během tohoto procesu se mediální soubor přehrávaný na straně klienta ukládá na dálku a následně je pomocí internetu během několika sekund přenesen. Jedná se tedy o alternativu ke stahování souborů, což je proces, při kterém uživatel získá celý obsah souboru před jeho sledováním či posloucháním. Streamovatelnými daty nemusí být jen video a audio, ale také živé skryté titulky nebo text v reálném čase, obojí je označeno jako streamovaný text.

Stejně jako u ostatních dat přenášených přes internet, jsou i během streamování data rozdělena do datových paketů. V každém paketu je obsažena malá část souboru a přehrávač na klientském zařízení přebírá tok datových paketů a následně je interpretuje jako audio nebo video. K přenosu datových paketů je potřeba přenosový protokol, konkrétně UDP či TCP. Oba tyto přenosové protokoly se používají s internetovým protokolem IP. Protokol TCP navazuje připojení před přenosem dat a zajišťuje, aby všechny pakety dorazily v pořádku, a proto je považován za spolehlivější přenosový protokol. UDP sice během svého přenosu některé pakety ztrácí, ale výsledkem je rychlejší přenos. Záleží tedy na konkrétním případě použití streamování, pokud se například jedná o videokonferenci, je důležitá interakce uživatele s účastníky v reálném čase, než čekání na doručení každého kousku dat. Pro většinu ostatních případů je však důležitější spolehlivý přenos dat, a proto je vhodnější TCP protokol. [19]

2.4.1 Kódování videa

V počátcích digitálního videa byly všechny ve formátu raw, to znamená, že se jednalo o sbírku statických fotografií. Například video s rychlostí 30 FPS zobrazovalo třicet fotografií za sekundu, celkem tedy 1800 obrázků za minutu. Je tedy patrné, že velikost videosouborů byla obrovská. Proto došlo k vývoji kódování videa, jehož cílem je komprese souborů při zachování kvality videa.

Kódování videa je tedy proces, jehož cílem je proces přeměny nekomprimovaného videosouboru na formu, kterou lze následně uložit a přehrát na různých zařízeních. Celý proces kódování obsahuje dva podprocesy: kompresi a překódování.

Komprese videa se u kódování používá ke snížení počtu bitů potřebných k reprezentaci daného obrázku či videa. Cílem tohoto procesu je tedy zmenšení celkové velikosti souboru digitálního videa. Komprimaci videa nejčastěji provádí program se speciálním algoritmem nebo vzorcem pro určení nejlepšího způsobu redukce dat. Některé algoritmy mohou snížit obsah dat dokonce až tisíckrát. Princip těchto algoritmů funguje na základě určení, které snímky jsou zásadní a které jsou mohou ztratit. Pokud se jedná například o dva totožné snímky, může dojít k odstranění dat jednoho snímky a nahradit jej odkazem na předchozí snímek. S kompresí videa se určitě setkal již každý z nás, protože k ní dochází i na úrovni kamery telefonu, kdy je záznam z kamery zakódován a následně se toto komprimované video nahrává do úložiště telefonu. [20], [21]

Transcoding či překódování má zajistit převod kódovaného streamu z jednoho formátu do druhého, nebo z jedné velikosti do druhé. Zdrojové video může být buď v reálném čase, nebo založené na souborech. Většina transkodérů funguje na základě dvoukrokového procesu dekódování a překódování. První krok slouží k dekódování původních dat do přechodného formátu, někdy zvaný jako mezipatro, druhý krok mění velikost a překóduje video do nového nebo více nových formátů na základě koncového zobrazovacího zařízení. Typické použití překódování je pro služby OTT, kde je zdroj vysoké kvality překódován do mnoha bitratů a rozlišení pro streamovací protokoly, jako HLS a RTMP. Přesně to umožňuje dodávat jeden jediný stream do mnoha typů zobrazovacích zařízení, jako jsou počítače, smartphony a televizory. [20]

Důležitou součástí kódování je kontejner, který obsahuje všechna důležitá data pro přenos streamu. Jedná se o kombinaci video kodeku, zvukového kodeku a metadat, přičemž jsou všechna tato data shromážděna v jednom video souboru. Metadata slouží k tomu, aby byly správně zkoordinované kodeky a mohou také poskytnout další prvky streamu, jako jsou například titulky. Každý kontejner však podporuje jen určitý rozsah video kodeků. Některé kontejnery jsou kompatibilní pouze s jedním typem kodeku a přehrávače videa, což samozřejmě ovlivňuje možnosti přehrání či spuštění streamu. Jiné kontejnery zase fungují s mnoha typy video kodeků a přehrávačů. Je důležité zmínit, že soubor videa lze správně a funkčně přehrát jen v případě, že jsou kodek i kontejner kompatibilní s přehrávačem. [21]

Ke kódování videa se používají kodéry, což jsou zařízení, která převádějí raw video soubory na streamovatelné digitální soubory, jenž lze odesílat přes internet. Přesněji převezmou potřebný formát a převedou jej na kodeky prostřednictvím procesu komprese či dekomprese. Standardní streamovací kodek pro internetové zdroje je H.264. Kodéry videa jsou označovány jako klíčová a požadovaná součást živého vysílání a existují dva typy, hardwarové a softwarové kodéry. [22], [23]

2.4.2 Dekódování videa

Video dekodér je obvod často obsažený v jednom z čipů s integrovaným obvodem, jehož úkolem je převod analogových video signálů na digitální video. Dekodér v podstatě vykonává inverzní funkci kodéru videa, který převádí nezpracované digitální video na analogové.

Přesný proces dekódování zahrnuje tři kroky. Nejprve je analogový signál pomocí převodníku převeden na digitální, aby vznikla digitální surová (raw) data. V případě kompozitního videa musí dojít k oddělení jasu a chrominance, která je následně demodulována tak, aby vznikla video data s barevným rozdílem. Ve druhém kroku jsou data upravena tak, aby se poupravil jas, kontrast, sytost a odstín. Nakonec jsou data transformována převaděčem barevného prostoru, aby generovala data v souladu s některým z několika standardů barevného prostoru, jako je například RGB.

Video data jsou dekódována za účelem zobrazení streamu na daném zobrazovacím zařízení. Dekódován může být mimo jiné i zvuk či jiná metadata, která mohou obsahovat data o formátování videa nebo například titulky videa. [20]

2.4.3 Softwarové kodéry

Jde o programy, které běží na běžných výpočetních zařízeních, jako jsou stolní počítače nebo notebooky. Softwarové kodéry mají několik výhod. Obvykle se mnohem snadněji nastavují a mohou se také měnit či upravit jednotlivé aspekty kodeků k získání požadovaného bitratu a kvality videa. Další výhodou je také možnost snadné aktualizace, když je k dispozici nová verze daného programu.

Softwarovým kódérům však chybí celková rychlost, kterou pro streamování nabízejí kódéry hardwarové. Hlavním důvodem je, že počítač spouští více programů naráz, a proto nemůže věnovat svůj výkon čistě pro kódování.

2.4.3.1 VRED

VRED je profesionální aplikace pro tvorbu produktových 3D vizualizací, virtuálních prototypů a virtuální reality, především v automobilovém průmyslu, od společnosti Autodesk. Umožňuje také tvorbu prezentací výrobků a možnost spolupráce více uživatelů v reálném čase. Produktová řada Autodesk VRED se skládá z následujících aplikací:

- VRED Design – kontrola a ověřování designových nápadů v reálném čase
- VRED Professional – tvorba přesných vizualizací a virtuálních prototypů
- VRED Core – streaming pro jakékoliv zařízení
- VRED Server – rendering a streaming 3D dat na vyžádání
- VRED Presenter – prezentace konfigurací produktu v interaktivním 3D prostředí
- VRED Go – interaktivní prohlížení 3D scény na desktopu nebo ve VR brýlích Oculus, Vive a Varjo

Důležitou funkcí VREDu, zejména pro tuto práci, je možnost streamování scény pomocí ovládacích prvků uživatelského rozhraní. Funkce streamování je umožněna díky integrovanému webovému serveru, který dále nabízí i Python a Web API neboli rozhraní pro programování aplikací. Jako přenosový protokol je pro streamování použit WebSocet, který umožňuje plně duplexní komunikaci. Je nutné zmínit, že celý obsah je streamován do webového prohlížeče, stačí pouze povolit webový server v softwaru a pak už uživatel může přistupovat k funkci VRED Stream. V tomto rozhraní je možné interagovat se scénou, například měnit úhly pohledu a upravovat daný model. Komunikaci s obsahem, respektive pohyb ve scéně je umožněn pomocí HTML. Data streamovaného obrazu jsou kódována jako JPEG nebo H264, přičemž se H264 může zdát přirozenější. Nicméně JPEG vyžaduje sice větší šířku pásma, ale je velmi rychlý, nevyžaduje žádný samostatný kódér pro VRED a nepotřebuje ani žádný speciální dekodér na straně klienta.

Scéna může být mimo jiné také streamována do virtuální reality pomocí editoru médií, kde je následně ovládána pomocí vlastního streamu. Výhoda použití VR v tomto případě je

možná spolupráce více uživatelů, kde lidé současně zkoumají scénu právě ve virtuální realitě. [24]

2.4.3.2 V-Ray Standalone

V-Ray je 3D renderovací software vyvinutý bulharskou společností Chaos Group. Tento renderovací engine využívá algoritmy globálního osvětlení, včetně ray-tracingu, mapování fotonů a přímo vypočítané globální osvětlení, výsledkem jsou následně dokonalé fotorealistické vizualizace. Jeho využití je však jako plugin pro 3D grafické programy, jako jsou Autodesk 3ds max, Maya, Cinema 4D, SketchUp a z automobilového průmyslu je nutné zmínit aplikaci Rhino.

Tento software se od ostatních renderovacích řešení liší tím, že zahrnuje možnost hybridního renderingu, tedy možnost renderování pomocí obou procesorů zároveň – CPU i GPU, což má samozřejmě velký vliv na výpočetní výkon. Při práci s V-Rayem je také možnost využití síťového renderingu. [25]

2.4.3.3 VRUT

Aplikace VRUT vznikla v roce 2007, kdy se na vývoji podílely ve spolupráci se Škoda Auto i vysoké školy. V průběhu dalších let byl software dále rozvíjen na základě požadavků odborných oblastí. Došlo zejména k přidání virtuální reality a později k přechodu na technologii Ray Tracing, a to kvůli zvýšení kvality a fyzikální reality prezentací. Zásadní změnou pro tento software byl rok 2019, kdy se přešlo na verzi VRUT 2.0 s novým uživatelským rozhraním, fyzikálně založenou definicí materiálů a také modul pro virtuální tréninky.

V současné době se jedná o software pro vizualizaci a editaci 3D dat a také nástroj, který zahrnuje rozsáhlou podporu formátů dat, podporu jízdního simulátoru, podporu zobrazení ve VR brýlích a tvorbu virtuálních tréninků. Nyní je VRUT vyvíjen pouze společností Škoda Auto, která je také označována jako výrobce tohoto softwaru.

VRUT 2.0 mimo jiné také podporuje streaming obrazu. Konfigurace je možná dvěma způsoby, dle požadavku uživatele. Prvním způsobem je možnost obsah svého renderovacího

okna posílat pasivním příjemcům, jedná se tedy o vysílání streamu. Tento způsob se využívá, pokud chce uživatel s grafickou stanicí prezentovat 3D data více uživatelům. Je opravdu nezbytné, aby vysílající uživatel měl dostatečně silný počítač, který bude schopen vykreslit data. Pro příjem streamu postačí uživatelům pouze slabý počítač, schopný přehrát video.

Druhou možností je přijímání streamu neboli připojení k výkonnému serveru s možností ovládní scény. Typickým příkladem použití této možnosti je, že chce uživatel pracovat s větší scénou, než jeho počítač zvládne. Práce by měla být přibližně stejně rychlá, jako by uživatel pracoval přímo na serveru, kromě přenosu dat, který je závislý na rychlosti sítě mezi uživatelským počítačem a serverem a mírného zpoždění, které je způsobeno kompresí a dekompresí videa. [26]

2.4.3.4 Unreal Engine

Unreal Engine je převážně znám jako herní Engine, vytvořený firmou Epic Games. Nicméně tento software má využití v mnoha odvětvích, jako je architektura, animace, automobilový průmysl a další. Aktuálně je k dispozici čtvrtá verze a přesný název softwaru je tedy Unreal Engine 4.

Funkce streamování pomocí softwaru Unreal Engine se nazývá Pixel Streaming. Tato funkce umožňuje streamovat video i audio přímo z aplikace Unreal do zařízení klientů v reálném čas, a to pomocí protokolu WebRTC. Obsah je opět streamován do webového prohlížeče. Pomocí API WebRTC je umožněn i příjem řídicích dat, jako jsou vstupy z klávesnice a myši, ze strany klienta. Pixel streaming také umožňuje vývojářům využívat cloudový výpočetní výkon pro vyšší kvalitu. [27]

2.4.4 Hardwarové kodéry

Hardwarové kodéry jsou vhodné pro vysoce kvalitní a ostré live streamy, zejména ve společnostech. Jsou postaveny speciálně pro kódování živých streamů a slouží k přenosu dat s minimální poruchovostí. Na druhou stranu je pravda, že k efektivnímu použití hardwarového kodéru je potřeba vyšší finanční rozpočet a technická znalost. Tato zařízení přicházejí v různých tvarech a velikostech, od malých přenosných boxů až po větší,

objemnější příslušenství. V závislosti na zvoleném kodéru streamování a jeho složitosti mohou mít tato zařízení širokou škálu specifikací. Hardwarové kodéry jsou obecně výkonnější a poskytují lepší kvalitu streamu, zatímco softwarové kodéry jsou flexibilnější a dostupnější.

2.4.4.1 VDI

VDI neboli Virtual Desktop Infrastructure se využívá zpravidla ve velkých podnikových sítích pro vzdálený přístup k virtuální ploše. Přesněji se jedná o formu virtualizace desktopů, protože konkrétní obrazy desktopů běží v rámci virtuálních strojů (VM) a jsou doručovány koncovým klientům přes síť. Těmito koncovými body mohou být počítače nebo jiná zařízení, jako jsou tablety nebo terminály tenkých klientů. V moderních digitálních pracovních prostorech, kde je třeba na vyžádání přistupovat k mnoha aplikacím, umožňuje VDI bezpečný a pohodlný vzdálený přístup, který pomáhá zvýšit produktivitu zaměstnanců.

Virtuální desktopy běží ve virtuálních strojích na centralizovaném serveru a každá virtuální plocha obsahuje obraz operačního systému, nejčastěji Microsoft Windows. Virtuální stroje jsou založené na hostiteli, což znamená, že více jejich instancí může být umístěno na stejném serveru v datovém centru. Koncoví klienti, jako jsou PC, tablety nebo terminály tenkých klientů, musí být neustále připojeni k centrálně spravovanému serveru, aby si mohli zachovat přístup k virtualizovaným desktopům, které hostují.

Zprostředkovatel připojení neboli softwarová vrstva, která funguje jako prostředník mezi uživateli a virtuálními prostředky, najde virtuální plochu v rámci zdrojů pro každého klienta po úspěšném přístupu k prostředí VDI.

Hlavní výhodou VDI je rozhodně vzdálený přístup, protože ke standardizovanému desktopu se lze dostat z téměř jakéhokoli schváleného a kompatibilního koncového bodu v libovolném místě. Pro využití streamování to tedy znamená, že uživatel si je schopen po připojení k virtuální ploše, spustit stream téměř odkudkoli. Výhodou je rozhodně také to, že uživatel nepotřebuje výkonný hardware, protože veškerý výpočetní výkon je použit právě z VDI. [28]

2.4.4.2 NVIDIA Shield

Nvidia Shield TV je digitální přehrávač médií založený na Android TV, který vyrábí společnost Nvidia. Stejně jako všechny ostatní zařízení Android TV může také streamovat obsah z cloudu, počítače a ostatních zařízení. Toto zařízení je vyráběno ve dvou modelech, přičemž se model Shield TV Pro vyznačuje především zvětšeným vnitřním úložištěm.



Obr. 8 NVIDIA Shield [29]



Obr. 9 NVIDIA Shield Pro [29]

Zařízení Shield, viz Obr. 8 využívá procesor NVIDIA Tegra X1 s grafickou kartou s 256 jádry a 2 GB RAM, u verze NVIDIA Shield Pro, které je na Obr. 9, činí paměť RAM 3 GB. Dále nabízí výstup videa v rozlišení 4K HDR při 60 FPS a vylepšení HD videa na 4K pomocí upscalingu na základě umělé inteligence. Pro připojení k internetu podporuje gigabitový Ethernet a Wi-Fi, pro připojení ostatních periférií jsou použity dva USB porty a Bluetooth. Celá konzole je ovládána pomocí bezdrátového dálkového ovladače nebo s využitím hlasového asistenta.

Jedná se tedy o prémiový přehrávač 4K HDR, který sice není nejlevnější, ale pokud je vyžadován výstup ve vysokém rozlišení, je označován jako jeden z nejvýkonnějších. [30], [31]

2.4.4.3 Barco NGS-D320-Lite

Barco je společnost, jenž je globální technologický lídr, který vyvíjí síťová vizualizační řešení pro zábavní, podnikové a zdravotnické trhy. Jejich řešení vizualizace dat pomáhají lidem, ať už v rámci zábavy nebo podpory sdílení znalostí a chytrého rozhodování v organizacích. Jejich produkty mají také značné zastoupení ve zdravotnictví, kde pomáhají nemocnicím poskytovat svým pacientům tu nejlepší možnou zdravotní péči.

Tato společnost má také širokou nabídku hardwarových kodérů/dekodérů a v rámci spolupráce se společností Škoda Auto jsem měl možnost prokonzultovat přímo se zástupcem Barca vhodný hardwarový kodér pro korporátní využití. Konkrétně mi byl doporučen již zmiňovaný kodér NGS-D320 Lite (viz Obr. 10), který je v podstatě jediným řešením pro Streaming.



Obr. 10 Barco NGS-D320 Lite [32]

NGS-D320 Lite je všestranný a výkonný síťový kodér a dekodér H.264, který přichází s nejnovějším obrazovým procesorem Barco, poskytující nejlepší algoritmy škálování a konverze barevného prostoru na současném trhu. Při distribuci grafiky kodér zachovává i ty nejmenší detaily, takže je vhodný pro kódování obrázků, jako jsou tabulky nebo čárové diagramy s jedním pixelem. Zařízení automaticky spustí streamování, kdykoli je připojen platný vstupní signál. Stream je automaticky nastaven pomocí neoptimalnějších nastavení

na základě vstupního rozlišení a šířky pásma. Kromě toho vyhledávací stránka webového rozhraní poskytuje přehled všech dostupných zařízení v síti, což usnadňuje konfiguraci systému.

NGS-D320 Lite je dodáván se vstupem dual link DVI, HDMI 1.4 a DisplayPort 1.1a. Všechny vstupy podporují rozlišení až 4096 x 2160 (4K) a mají aktivní průchozí připojení. Je možné kódování v plné snímkové frekvenci nebo nižší snímkové frekvenci, což vám umožní definovat rovnováhu mezi kvalitou a šířkou pásma. Latence kodéru je nižší než 40 ms, což umožňuje latenci mezi koncovými body nižší než 100 ms. [32]

2.4.5 Kodek

Je hardwarový nebo softwarový nástroj, který slouží ke kódování nejčastěji zvukových a obrazových informací do takového toku pro potřeby jejich uložení, streamování nebo vysílání a pro jejich následné dekódování. Kodeky mohou také obsahovat funkci komprese a šifrování dat. Jejich úkolem je v podstatě odstranit vybraná data, aby se videosoubory zmenšily, a přitom zachovat co největší kvalitu.

Moderní video kodeky používají k redukci velikosti souborů různé matematické metody. Tyto metody detekují, kdy v určitém úseku videa nedochází ke změně ze snímku na snímek, což umožňuje „vyhodit“ určitá data. Jiné metody se zabývají pohybem a používají matematickou predikci ke snížení potřeby ukládat každý pixel. Některé z těchto metod se nazývají kvantování a prostorové či časové převzorkování. [33]

2.4.5.1 H.264

H.264 Advanced Video Coding je průmyslový standard pro kódování videa, ale jde také o oblíbený formát pro kódované video, nebo o sadu nástrojů pro kompresi videa v neustále se vyvíjejícím prostředí digitální video komunikace.

Princip tohoto kodeku spočívá v tom, že video kodér H.264 provádí procesy predikce, transformace a kódování k vytvoření komprimovaného bitového toku H.264. Video dekodér H.264 provádí komplementární procesy dekódování, inverzní transformace a rekonstrukce za účelem vytvoření a dekódování videosekvence. Dekódovaná verze obecně není totožná

s původní sekvencí, protože H.264 je ztrátový kompresní formát, respektive během komprese dochází ke ztrátě určité kvality obrazu. Rámec nebo pole, které se má kódovat, je zpracováno zařízením kompatibilním s H.264 video kodérem. Stejně jako kódování a odesílání rámce jako součásti kódovaného bitového toku nebo kódovaného souboru, kodér rekonstruuje snímek, dojde tedy k vytvoření kopie dekódovaného snímku, který bude nakonec vyprodukován dekodérem. Tato rekonstruovaná kopie může být uložena v kódované podobě obrázkové vyrovnávací paměti a použije se při kódování dalších snímků. Dekodér přijímá kódovaný bitový tok a dekóduje rámec pro zobrazení nebo další zpracování. Ve stejnou dobu, dekodér může uložit kopii snímku do vyrovnávací paměti dekódovaného obrazu, která má být použita během dekódování dalších snímků.

Dnes se jedná o nejlepší a nejběžnější video kodek pro streamování. Jeho finální verze byla vytvořena v roce 2003, jedná se tedy o standard, který funguje již nějakou dobu a v porovnání s předchozími je až o 50% efektivnější. Předností tohoto kodeku je zejména malá velikost souborů, tím pádem nižší přenosová rychlost, nicméně při zachování stejné kvality videa. H.264 se díky své flexibilitě využívá u mnoha druhů aplikací, telekomunikačních systémů a sítí. Zahrnuje řadu profilů a úrovní komprese až do rozlišení 8k UHD s frekvencí 120 snímků za sekundu.

Hlavním důvodem jeho stálého využití je vysoká efektivita a kompatibilita. Téměř každé zařízení v dnešní době podporuje kódování videa právě tímto kodekem. I když trh nabízí účinnější kodeky, žádný z nich není kompatibilní jako H.264. [34]

2.4.5.2 H.265/HEVC

Jiným názvem také HEVC je dalším standardem kódování videa, který pomalu nahrazuje starší verzi H.264. Byl vyvinut s cílem dosažení vyšší účinnosti kódování a lepší kvality videa využitím základních technologií. Hlavní výhodou tohoto formátu je lepší komprese videa při zachování kvality, jejíž výsledkem je menší velikost, a tím pádem menší nárok na přenosovou rychlost.

Kodek H.265 oproti svému předchůdci H.264 snižuje datový tok na polovinu při zachování stejné kvality a podporuje rozlišení 4K a 8K. Další výhodou je také nahrazení

makrobloků z původních 16x16 na makrobloky s velikostí 64x64 a snížení potřebné šířky pásma. Toto všechno má také jednu nevýhodu a tou je náročnost na výpočetní výkon, kdy zpracování H.265 videa je pro procesor až 10x náročnější než zpracování s H.264 kodekem. A to je hlavní důvod, proč je kodek H.264 stále tak populární. [35]

2.4.5.3 H.266/VVC

Nástupcem kodeku H.265 je kodek Versatile Video Coding (VVC) neboli H.266. Tento moderní standard byl vyvinut v roce 2020 týmem expertů JVET ve spolupráci s Fraunhoferovým institutem. Cílem je opět snížení datového toku při zachování stejné kvality jako je to u H.265. Navíc by měl však poskytnout efektivnější kódování videa ve vysokém rozlišení jako je UHD, 4K, 8K a podpořit i 10-bit video.

VVC byl vytvořen pro spolupráci s technologiemi streamování obsahu od rozlišení 4K až po 16K, které je zatím jen otázkou budoucnosti. Dále také nabízí podporu 360stupňových videí, což by mohlo být užitečné pro streamování ve virtuální realitě. Navíc je navržen tak, že může přistupovat k různým oblastem rámce přímo v bitovém toku. Služba pro streamování videa by si tedy mohla vybrat streamování částí, které nejsou ve scéně příliš důležité, v nižším rozlišení, aby byla ušetřena šířka pásma.

Při testování bylo zjištěno, že H.266 dosahuje až o 50 % lepších kompresních poměrů než HEVC, který v současnosti používá společnost Apple v iPhonech. To znamená, že obsah může být streamován s využitím téměř poloviny dat. Dále bylo potvrzeno, že pro streamování stejného videa v rozlišení 4K s délkou 90 minut využívá H.266 5 GB dat pro streamování obsahu, kdežto HEVC používá 10 GB dat.

Přestože je standard H.266 vyvinut už rok, stále se běžně nevyužívá. Hlavním důvodem je to, že H.266 kódování je technicky náročné a většina streamovacího hardwaru není prozatím vybavena pro použití tohoto kodeku. [36]

2.4.6 Streamovací protokoly

Protokol streamování je standardizovaný způsob rozložení videa na části, následné odeslání k divákovi a poté opětovné sestavení. Jinými slovy, je to soubor pravidel, která

regulují, jak jsou data přenášena a také jak zacházet s případnými chybami, které mohou během tohoto procesu nastat. Většina videosouborů nejsou totiž navržena pro streamování, což znamená, že při streamování videa je potřeba nejdříve jeho převedení na streamovatelný soubor. To zahrnuje rozbití na malé kousky, která pak přicházejí postupně a přehrávají se tak, jak jsou přijaty.

Přenos obsahu na koncové zařízení má na starost transportní vrstva. Jak již popisují na začátku kapitoly Technologie streamování, existují dva způsoby přenosu – prostřednictvím protokolu TCP (Transmission Control Protocol) nebo protokolu UDP (User Datagram Protocol). Hlavní rozdíl mezi nimi je ten, že TCP před začátkem přenosu navazuje spojení s koncovým zařízením za účelem přenosu dat, kdežto UDP tento krok ignoruje. Výsledkem je rychlejší přenos pomocí protokolu UDP, nicméně data nejsou přenášena v přesném pořadí a některé pakety mohou být ztraceny úplně. To samozřejmě někdy může vést k problémům s kvalitou videa.

Nejčastěji používané streamovací protokoly s jejich principy fungování a výhody – nevýhody jsou popsány níže. [37]

2.4.6.1 RTMP

RTMP neboli Real-Time Messaging Protocol je obousměrný komunikační protokol pro streamování audia a videa v reálném čase přes internet. Byl vyvinut v počátcích streamování firmou Macromedia a je stále široce používán.

RTMP funguje tak, že vytváří a udržuje komunikační cestu mezi klientem RTMP a serverem RTMP pro rychlý a spolehlivý přenos dat. Protokol v současné době používá video kodek H.264 a audio kodek AAC. RTMP rozděluje multimediální tok na jednotlivé pakety, které mají obvykle 128 b pro video a 64 b pro zvuk. Velikost však nesmí být ani moc velká, ani příliš malá. Velké velikosti paketů mohou způsobit zpoždění přenosu a velmi malé pakety zase více zatěžují procesor.

Hlavní výhodou RTMP je, že udržuje trvalé a stabilní připojení a umožňuje komunikaci s nízkou latencí. Nevýhodou protokolu je možnost přerušení streamu kvůli nízké šířce pásma a v některých případech se nemusí stream ani spustit. [37]

2.4.6.2 HLS

HLS je zkratka pro HTTP Live Streaming, respektive se jedná o protokol pro streamování médií koncovým uživatelům přes internet. Byl vydán společností Apple v roce 2009 a od té doby se stal velice rozšířeným streamovacím protokolem. Pokud jde o funkce, standard HLS také podporuje streamování s adaptivní bitovou rychlostí a dynamicky poskytuje nejlepší možnou kvalitu videa. Díky nedávným aktualizacím nyní tento standard podporuje nejnovější a nejlepší kodek H.265, který poskytuje dvojnásobnou kvalitu videa při stejné velikosti souboru oproti H.264.

Datový proud u HLS pochází ze serveru, kde je buď uložen celý soubor, nebo je datový proud přímo vytvořen. Protože HLS je založeno na HTTP, může stream vytvořit jakýkoli běžný webový server. Na serveru probíhají dva hlavní procesy. Prvním z nich je kódování, kdy jsou data přeformátována tak, aby je jakékoliv zařízení mohlo přehrát. Druhým je segmentace, kdy je video rozděleno do segmentů o délce několika sekund. Délka segmentů se může lišit, i když je nejběžnější délka 6 sekund. Když klientská zařízení požádají o datový proud, zakódované segmenty videa se přesunou na klientská zařízení přes internet. Klientské zařízení je zařízení, které přijímá stream a přehrává video – například notebook nebo počítač uživatele. Klientské zařízení používá indexový soubor jako referenci pro sestavení videa v pořadí a podle potřeby přepíná z vyšší kvality na nižší kvalitu obrazu.

Výhodami tohoto protokolu jsou určitě jeho kompatibilita, zabezpečení a rozhodně vysoká kvalita streamu. Nevýhodou HLS je vysoká latence při streamování, což může občas způsobit zásek videa. [38]

2.4.6.3 WebRTC

Jedná se o open–source standard pro komunikaci v reálném čase, který je podporovaný téměř každým moderním prohlížečem. Podporuje kodeky VP8, VP9 a H.264. Jednou z největších výhod WebRTC je to, že v podstatě transformuje miliony prohlížečů na streamovací terminály, a to bez potřeby instalace dalších pluginů. Dále navíc podporuje sub–sekundovou latenci, což umožňuje průběh streamu bez dalšího zpoždění. Protokol také používá technologii bitové rychlosti, jenž mu umožňuje automaticky upravovat kvalitu videa a zabránit jakémukoli přerušení či poklesu.

Co se týče nevýhod tohoto protokolu, je určitě nutné zmínit, že se jedná o zcela nový protokol, který je ještě ve vývoji. Konkrétní nevýhodou může být použití kodeků, kdy jsou upřednostňovány spíše právě bezplatné kodeky VP8 a VP9, oproti běžnějším, například H.264. [37]

3 Vlastní práce

V této části se pokusím nabídnout řešení streamování, které jsem mohl vyzkoušet právě ve společnosti Škoda Auto. Otestovány budou již výše zmíněné hardwarové a softwarové kodéry. Během testování bude měněno rozlišení streamu a pozorovány jeho vlastnosti. Zejména se pak zaměřím na datové přenosy, vytížení hardwaru a snímkovou frekvenci. Následně budou shrnuty výsledky praktické části.

3.1 Software VRED

Tento software je v současné době ve společnosti Škoda Auto nejvíce používaný pro práci s 3D modely. Streamování ve VREDu je uživateli zobrazeno pomocí rozhraní ve webovém prohlížeči, ke kterému se připojí na základě IP adresy zařízení, které streamuje. Veškerá základní nastavení streamu, jako jsou jeho zapnutí, zadání IP adresy pro přístup ke streamu, anebo také omezení k jeho přístupu na základě nastavení přihlašovacích údajů, je k dispozici přímo v softwaru VRED. Pro zapnutí streamu je potřeba pouze zapnout webový server. Nastavení týkající se kvality videa si uživatel volí přímo v rozhraní webového prohlížeče. K dispozici je volba kodeku, CPU nebo GPU vykreslování, bitrate videa či rozlišení videa.



Obr. 11 Výchozí model pro streamování

K vyrenderování a zpracování obrazu je ve společnosti k dispozici grafický server s názvem Apolo (dále jen Apolo), který má 8 grafických karet Nvidia RTX 8000. Při přímém

připojení zařízení ke grafickému serveru, neboli přenos na základě raw dat se datový přenos pohyboval kolem 5 Gbit/s s 30 FPS. Testování jsem prováděl jak pomocí běžné interní metalické sítě s přenosovou rychlostí 1 Gbit/s, tak i sítě HPC, což je dedikovaná optická síť s přenosovou rychlostí 40 Gbit/s. Pro testování byl zvolen 3D model automobilu (viz Obr. 11), jenž je součástí knihovny softwaru.

Streamování v softwaru VRED jsem testoval třemi následujícími způsoby a je nutné zmínit, že byla nastavena nejvyšší možná kvalita videa, jež byla pro všechny způsoby totožná. Konkrétně GPU ray tracing, limit 60 snímků za sekundu a bitrate 16000 Baudů, které udávají počet možných změn stavu signálu za jednotku času. S rozlišením streamu jsem manipuloval, jak bylo potřeba, nicméně jsem se pohyboval v rozmezí od Full HD rozlišení do 4K.

3.1.1 Streamování z Apola přes interní síť

Tato forma, jak již plyne z názvu funguje na základě streamování grafického serveru, ke kterému se uživatel připojí pomocí interní zaměstnanecké sítě. Výsledky použití jsou k dispozici na Obr. 12 a 13.

Během tohoto testování bylo průběžně měněno rozlišení obrazu z HD na 4K, aby byly znatelné změny obrazu. Při zvyšujícím rozlišení obrazu rostla latence streamu a klesala hodnota FPS a datového přenosu. Na maximálním rozlišení byla latence téměř 4 sekundy, což je pro uživatele, který potřebuje manipulovat se scénou, velice nepříjemné. Přijímaný datový tok byl téměř rovných 10 Mb/s a grafické karty byly průměrně vytíženy na 5 %. Ačkoliv v tomto rozlišení vypadal stream na pohled nejlépe, plynulost obrazu a interakce se scénou byla uživatelsky nepříjemná.



Obr. 12 Stream ve 4K rozlišení

Nejvíce uživatelsky přívětivé nastavení bylo při použití Full HD rozlišení, kdy latence obrazu byla téměř nulová, zároveň také přijatelná hodnota FPS a přijímaný datový tok v rozmezí 18-20 Mb/s. Hodnota FPS je bohužel touto formou neměřitelná, nicméně si troufám říct, že jsme se pohybovali okolo 40 FPS. Co se týče vytížení grafických karet, průměrná hodnota ukazovala 16 % a maximální hodnota 30 %.



Obr. 13 Stream ve Full HD rozlišení

3.1.2 Streamování z Apola přes HPC síť

Jedná se o stejnou formu streamování jako je tomu u předešlého řešení. Tentokrát je však uživatel připojen ke grafickému serveru pomocí HPC sítě s mnohonásobně vyšší přenosovou rychlostí. Změny byly znatelné hlavně v latenci obrazu, kdy byl stream celkově plynulejší. Nicméně i přes nižší latenci výsledný obraz dost kostičkoval.

Při použití rozlišení 4K byla odezva mezi pohybem myši a pohybem modelu přibližně dvě sekundy, což je polovina oproti předešlé formě streamování tímto softwarem. Přijímaný datový tok ukazoval rovných 8 Mb/s a průměrné vytížení grafických karet grafického serveru 15 %, přičemž maximální hodnota dosáhla 39 %. Bohužel je 4K rozlišení stále vysoký požadavek a výsledný stream v tomto rozlišení není z hlediska uživatele přijatelný.

Nejlépších výsledků zde z mého hlediska dosáhlo rozlišení Quad HD (QHD), kdy při manipulaci s modelem nedocházelo téměř k žádné latenci. Výsledný obraz měl přijatelnou kvalitu bez tendence kostičkování. Průměrné vytížení grafických karet bylo 8 % a maximální hodnota dosáhla 24 %. Výsledný stream v této kvalitě je zachycen na Obr. 14.



Obr. 14 Stream ve QHD rozlišení

3.1.3 Streamování ze stanice

Poslední testování probíhalo formou připojení uživatele k počítači, kde byl spuštěn software VRED a v něm stream do webového rozhraní. I v tomto případě byl použit grafický server, tentokrát však pouze pro vyrenderování obrazu streamujícího počítače. Grafický

server tedy neposkytuje stream, ale pouze svůj výpočetní výkon ke zpracování modelu. Uživatel se připojí ke streamu pomocí webového prohlížeče, kam zadá pouze IP adresu streamujícího zařízení. Následně je možná interakce ve scéně a podrobnější nastavení streamu stejné, jako v předešlých případech.

Nejvíce přijatelný stream z hlediska uživatele byl při zvoleném rozlišení 1920 x 1080, respektive Full HD, kdy odezva při interakci s modelem ve scéně byla nulová a hodnota FPS se pohybovala okolo 60 snímků za sekundu. Grafické karty serveru byly průměrně vytíženy na 24 % a přijímaný datový tok na straně uživatele byl rovných 22 Mb/s. Obraz v tomto rozlišení sice nebyl moc kvalitní, nicméně byl velmi plynulý a bez tendence kostičkování.

Při vyšších rozlišeních (QHD a 4K) sice na první pohled obraz vypadal více kvalitní, nicméně narostla také latence, kdy ve 4K činila zhruba tři sekundy. Klesala také hodnota přijímaného datového toku a FPS, což samozřejmě snižuje celkovou plynulost obrazu. Při rychlejším pohybu ve scéně s vyšším rozlišením navíc také docházelo k rozpadávání a kostičkování obrazu, občas i k úplnému zaseknutí streamu, což je samozřejmě pro streamování nepřijatelné.

3.2 Software VRUT

Software VRUT je přímo vyvíjený ve společnosti Škoda Auto a jedná se v podstatě o konkurenci softwaru VRED. Testování v softwaru VRUT probíhalo na stanici, jenž je propojena gigabitovou metalickou sítí s výkonným serverem, respektive clusterem, který poskytl svůj výpočetní výkon ke zpracování obrazu. Konkrétně bylo k dispozici pro testování 800 jader clusteru. Toto je potřeba nastavit přímo v rozhraní softwaru, kde se jako zařízení zpracovávající obraz zvolí právě cluster. Přesněji se jedná o zvolení stream renderera v sekci module connection, kam se zadá IP adresa clusteru a software následně uživatele připojí přímo ke clusteru, odkud přijímá stream, se kterým samozřejmě může interagovat.

Co se týče podrobnějšího nastavení, lze přímo v rozhraní VRUTU nastavit hodnoty kvality streamu, vyhlazování modelu (antialiasing), lámání světla (trace-depth) a rozlišení streamu. Je nutné zmínit, že VRUT využívá CPU raytracing, proto jsou tedy vytěžovány

procesory clusteru, nikoli grafické karty. Model jsem testoval v rozlišeních Full HD, QHD a 4K.

Při zvoleném rozlišení 4K bylo dosaženo velmi kvalitního obrazu, viz Obr. 15. Při pohybu uživatele ve scéně neměl obraz tendenci rozpadu či kostičkování, nicméně docházelo k mírným zásekům obrazu s odhadovanou latencí jedné sekundy. Přijímaný datový tok činil 25 Mb/s. Procesory clusteru dosáhly maximálního vytížení 96 %, s průměrnou hodnotou 94 %. Hodnota FPS se pohybovala kolem hodnoty šest, což je velmi málo a následkem byla samozřejmě horší plynulost streamu.



Obr. 15 VRUT 4K stream

Testování v rozlišení QHD bylo z mého pohledu i přes drobnou latenci nejlepší z hlediska uživatele i kvality obrazu, viz Obr. 16. Plynulost streamu byla dle mého názoru přijatelná i s menší hodnotou FPS, která činila čtrnáct snímků za sekundu. Kvalita obrazu byla na základě menšího rozlišení samozřejmě patrně horší, nicméně i při drobných zásecích se obraz nerozpadal a byl stabilní. S nižším rozlišením klesla také hodnota přijímaného datového toku, a to na hodnotu 20 Mb/s. Dále i vytížení procesorů na průměrnou hodnotu 91 %.



Obr. 16 VRUT QHD stream

Nejnižším testovaným rozlišením bylo již zmíněné Full HD. Při tomto rozlišení byl obraz naprosto plynulý a bez jakýchkoliv záseků nebo latence. I hodnota snímků za sekundu se pohybovala okolo přijatelných dvaceti FPS, což je ale ještě daleko od požadavku. Snížila se také náročnost na datový přenos, kdy přijímaný datový tok činil 17 Mb/s. Nižší rozlišení mělo samozřejmě negativní vliv na kvalitu obrazu, kdy nebyl model tak detailně vykreslen, jako ve vyšších rozlišeních. Vyrenderovaný model ve Full HD rozlišení je zachycen na Obr. 17. Procesory clusteru byly při renderování tohoto modelu vytíženy průměrně z 81 %.



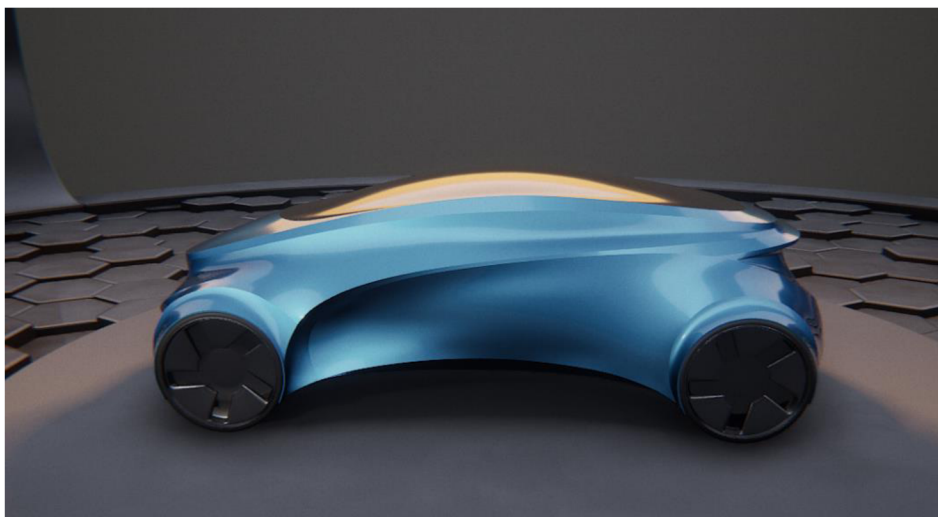
Obr. 17 VRUT Full HD stream

3.3 Software Unreal Engine

Přestože společnost Škoda Auto Unreal Engine běžně používá, během tohoto testování se vyskytly problémy se síťovým zabezpečením, kvůli kterým jsem nemohl software testovat přímo ve společnosti. Nastavení a spuštění streamu bylo zde určitě nejsložitější, a přestože se mi podařilo téměř všechny kroky zprovoznit, zradilo mě síťové zabezpečení společnosti. Konkrétně je potřeba spustit webový server, kde bude spuštěn stream. Tento krok mi bohužel neumožnil proxy server ve společnosti. Nicméně se mi podařilo získat studentskou licenci, a tak jsem mohl pracovat v tomto softwaru doma na svém počítači, kde bylo testování úspěšné.

Menší problém však způsobilo i rozlišení streamu, kdy se mi nepodařilo změnit rozlišení z Full HD. Rozlišení se mi podařilo měnit přímo v softwaru, nicméně ani po nastudování dokumentace k danému softwaru se mi nepodařila změna rozlišení streamu v prohlížeči. Proto jsem testování provedl pouze pro rozlišení Full HD.

Při výchozím rozlišení Full HD dosáhl stream velmi plynulého a kvalitního obrazu, který je k dispozici na Obr. 18. Přijímaný datový tok na straně uživatele činil 10 Mb/s. Hodnota FPS se držela po celou dobu pohybování ve scéně na 60 snímcích za sekundu. Obraz se po celou dobu testování nesekal, ani nerozpadal.



Obr. 18 Unreal Engine Full HD stream

3.4 Software V-Ray Standalone

U softwaru V-Ray Standalone, respektive samotného V-Ray, kdy není součástí jiného 3D programu jako plugin určen pro renderování, se během testování ukázalo, že nepodporuje streamování v reálném čase. Ačkoliv jiné softwary, kde je právě V-Ray použit k renderování, streamování umožňují. Příkladem takového softwaru může být například Autodesk 3ds max, kde je V-Ray použit jako plugin a dá se z něho skutečně streamovat v reálném čase.

Po prostudování dokumentace k verzi Standalone a práci ve stejnojmenném softwaru jsem zjistil, že se jedná čistě jen o renderovací software, který sice umožňuje distribuované či serverové renderování, ale neumí obraz zpracovat a odeslat v reálném čase jako stream. Ačkoliv jsem se tedy snažil při práci s tímto programem najít řešení, nemohl být bohužel pro streaming otestován.

3.5 VDI

Ve společnosti Škoda Auto se pro připojení k VDI používá software Citrix, který umožní připojení na virtuální desktop. K dispozici jsem měl pro testování dva virtuální desktopy. Přestože jsem zvolil výkonnější z této dvojice desktopů, nelze srovnat hardwarový výkon s předchozím testováním u softwarů, kde byl výpočetní výkon mnohem vyšší, zejména při renderování na clusteru. Na tomto virtuálním desktopu byla k dispozici pro GPU renderování grafická karta NVIDIA GRID T4-8Q s 8 GB pamětí. Výpočetní výkon pro vyrenderování modelu tedy v tomto případě poskytuje virtuální desktop a uživatel pouze přijímá zpracovaný stream na své zařízení. Pro načtení a úpravu modelu jsem použil již známý software VRED a k tomu výchozí model automobilu z knihovny softwaru. Nastavení kvality streamu bylo totožné jako u streamování z VREDu, tedy GPU renderování, limit 60 snímků za sekundu a bitrate 16000 Baudů, které udávají počet možných změn stavu signálu za jednotku času. Dále byl zapnut také antialiasing na nejvyšší možnou hodnotu (high). Opět jsem testoval rozlišení Full HD, QHD a 4K, jejichž porovnání je k dispozici níže.

Při rozlišení 4K docházelo k velkým zásekům obrazu, které byly způsobeny zhruba dvou sekundovou latencí. Výhodou však bylo, že se obraz ani přes větší záseky nerozpadal a ani neměl tendenci kostičkování. Nicméně z uživatelského hlediska bylo toto rozlišení nepřijatelné, zejména kvůli malému počtu snímků za sekundu, které ukazovaly hodnotu 3 a způsobovaly tak horší plynulost streamu. Přijímaný datový tok na straně uživatele činil 25 Mb/s, což je víceméně totožné, jako u předešlých kodérů. Vyrenderovaný model v tomto rozlišení je znázorněn na Obr. 19.



Obr. 19 VDI 4K stream

Po snížení rozlišení na QHD byly změny obrazu na první pohled patrné, což je vidět i na Obr. 20. Samozřejmě se snížila kvalita celého streamu, nicméně byl k dispozici uživateli mnohem plynulejší obraz. Hodnota FPS vzrostla na 6 snímků za sekundu, nicméně latence se stále pohybovala kolem sekundy a půl. Přijímaný datový tok byl v rozmezí 15–18 Mb/s, což dle mého názoru nebylo při tomto rozlišení vůbec špatné. Ačkoliv byl obraz plynulejší než u rozlišení 4K, nemyslím si, že s více jak sekundovou latencí by bylo pro uživatele přijatelné a dosti kvalitní pro práci s takovýmto streamem.



Obr. 20 VDI QHD stream

Při nejnižším testovaném rozlišení Full HD opět klesla výrazně kvalita streamu, zároveň však navíc zůstala celkem vysoká latence, která činila jednu sekundu. Dle mého názoru a v porovnání s předchozími kódery je to na tak nízké rozlišení docela vysoká latence, proto si myslím, že ani toto rozlišení by u uživatele neobstálo. Latence měla samozřejmě vliv i na celkovou plynulost streamu, který ukazoval hodnoty 10 FPS a přijímaný datový tok 13 Mb/s. Stream v tomto rozlišení je k dispozici na Obr. 21.



Obr. 21 VDI Full HD stream

3.6 Barco NGS-D320 Lite

Ačkoliv mělo být součástí této práce i testování hardwaru od společnosti Barco, bohužel se ho nepodařilo po celou dobu zpracování diplomové práce sehnat.

Na základě prostudování materiálů k danému produktu a konzultace s odborníkem této společnosti si však myslím, že se jedná o velmi kvalitní kódér, jehož funkce a vlastnosti by mohly naplnit očekávání společnosti Škoda Auto v oblasti streamování. Testování tohoto hardwaru bohužel nebylo možné, zejména z hlediska zdlouhavého procesu dodání, na který měla samozřejmě vliv pandemická situace.

3.7 Výsledky

Zde bych rád přehledněji shrnul přehled testovaných softwarových a hardwarových kodérů společně s jejich vlivem na datové přenosy a hardwarovými nároky. Je nutné zmínit, že téměř u všech testovaných technologií platila úměra, že se zvyšujícím rozlišením streamu, se zvyšovaly nároky na datové přenosy, rostla latence a klesala hodnota FPS neboli snímkové frekvence. Samozřejmě pokud se dalo změřit vyžití hardwaru, ať už grafiky či procesoru, jsou uvedeny i tyto procentuální hodnoty vyžití, které rostly s vyšším rozlišením.

3.7.1 Softwarové kodéry

Co se týče softwarových kodérů, byly celkem testovány čtyři programy: VRED, VRUT, V-Ray Standalone a Unreal Engine. Úspěšné testování se podařilo pouze u třech z nich, protože u softwaru V-Ray jsem během testování zjistil, že se jedná pouze o renderovací software, který neumožňuje streamování v reálném čase, a proto jsem v něm tedy nemohl testovat streamování.

U testování programu VRED hrál významnou roli grafický server s názvem Apolo, na kterém ve dvou případech běžel stream a v posledním testování poskytoval svůj výpočetní výkon streamovací stanici. V prvním případě uživatel přijímal data z Apola přes interní metalickou síť a při rozlišení 4K činil datový přijímaný tok pouze 10 Mb/s. FPS je bohužel v této formě streamování neměřitelná, odhadem jsme se však pohybovali kolem 5 snímků za sekundu, což je velmi málo. Grafické karty serveru byly vyčerpány na 5 % svého výkonu. Hlavní problém byla zejména vysoká latence, která činila téměř 4 sekundy a způsobila tak velké záseky obrazu. U rozlišení QHD jsem dosáhl téměř stejných výsledků, kde se pouze nepatrně zvýšil datový přenos. Z hlediska uživatele se zde nejlépe osvědčilo rozlišení Full HD, kdy latence obrazu byla téměř nulová, zároveň také přijatelná hodnota FPS, jenž byla odhadem okolo 40 FPS. Přijímaný datový tok se pohyboval v rozmezí 18-20 Mb/s, a co se týče vyžití grafických karet, průměrná hodnota ukazovala 16 %, maximální hodnota 30 %. Ve druhém případě byla data z Apola posílána přes dedikovanou optickou síť s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s, přičemž bylo samozřejmě dosaženo lepších výsledků. Při rozlišení 4K činila latence přibližně dvě sekundy, což je polovina oproti přenosu přes metalickou síť. Přijímaný datový tok ukazoval rovných 8 Mb/s a průměrné vyžití

grafických karet grafického serveru 15 %, přičemž maximální hodnota dosáhla 39 %. Bohužel i zde docházelo k velkým zásekům obrazu, následně k jeho kostičkování a někdy i úplnému rozpadu. Lépe zde dopadlo i rozlišení QHD, kdy při manipulaci s modelem nedocházelo téměř k žádné latenci. Výsledný obraz měl přijatelnou kvalitu bez tendence kostičkování. Průměrné vytížení grafických karet bylo 8 % a maximální hodnota dosáhla 24 %. Posledním scénářem testování v softwaru VRED bylo spuštění streamu na stanici, která sice využila také grafický server, tentokrát však pouze pro výpočetní výkon. Zde dopadlo nejlépe rozlišení 1920 x 1080, respektive Full HD, kdy odezva při interakci s modelem ve scéně byla nulová a hodnota FPS se pohybovala okolo 60 snímků za sekundu. Grafické karty serveru byly průměrně vytíženy na 24 % a přijímaný datový tok na straně uživatele byl rovných 22 Mb/s. Obraz v tomto rozlišení sice nebyl moc kvalitní, nicméně byl velmi plynulý a bez tendence kostičkování. Při rozlišeních QHD a 4K sice na první pohled obraz vypadal více kvalitní, nicméně narostla také latence, kdy ve 4K činila zhruba tři sekundy. Klesala také hodnota přijímaného datového toku a FPS, což samozřejmě snižuje celkovou plynulost obrazu. Při rychlejším pohybu ve scéně s vyšším rozlišením navíc také docházelo k rozpadávání a kostičkování obrazu, občas i k úplnému zaseknutí streamu, což je samozřejmě pro streamování nepřijatelné.

Testování v softwaru VRUT probíhalo na stanici, která měla k dispozici výpočetní výkon z výkonného serveru, respektive clusteru. Při zvoleném rozlišení 4K bylo dosaženo velmi kvalitního obrazu, který se ani přes sekundovou latenci nerozpadal či nekostičkoval. Přijímaný datový tok činil 25 Mb/s a procesory clusteru dosáhly maximálního vytížení 96 %, s průměrnou hodnotou 94 %. Hodnota snímkové frekvence se pohybovala pouze kolem hodnoty šest, což mělo za následek horší plynulost streamu. Dalším testovaným rozlišením bylo QHD, kdy plynulost streamu byla dle mého názoru přijatelná i s menšími hodnotami FPS, která činila čtrnáct snímků za sekundu. S nižším rozlišením klesly také hodnoty přijímaného datového toku na 20 Mb/s a vytížení procesorů na průměrnou hodnotu 91 %. U rozlišení Full HD byl obraz méně kvalitní, zároveň naprosto plynulý a bez jakýchkoliv záseků nebo latence. I hodnota snímků za sekundu se pohybovala okolo přijatelných dvaceti FPS a přijímaný datový tok činil 17 Mb/s.

Software Unreal Engine se jevil jako velice kvalitní kódér, bohužel se mi ale ani dle pokynů z dokumentace softwaru nepodařilo změnit rozlišení streamu. Proto jsem mohl

testovat pouze výchozí rozlišení Full HD. Výsledkem však byl velmi kvalitní a plynulý obraz, bez jakýchkoliv záseků a latence. Přijímaný datový tok na straně uživatele činil 10 Mb/s a snímková frekvence se držela na 60 snímcích za sekundu.

3.7.2 Hardwarové kodéry

Hardwarových kodérů bylo značně méně a otestovat se podařilo pouze jeden z nich. Ačkoliv bylo v plánu otestovat i streamovací hardware od společnosti Barco, po celou dobu zpracování této práce se ho nepodařilo sehnat. Testoval jsem tedy pouze stream s využitím VDI, respektive vzdáleného připojení k ploše.

U testování VDI při rozlišení 4K docházelo k velkým zásekům obrazu, které byly způsobeny zhruba dvou sekundovou latencí. Přijímaný datový tok činil 25 Mb/s a snímková frekvence se pohybovala kolem třech snímků za sekundu. Výhodou bylo, že se obraz i přes větší záseky a špatnou plynulost nerozpadal, ani neměl tendenci kostičkování. Po snížení rozlišení na QHD bylo na první pohled patrné zhoršení kvality obrazu, na druhou stranu zvýšení plynulosti. Hodnota FPS se zvýšila na 6 snímků za sekundu, nicméně latence se stále pohybovala kolem sekundy a půl. Přijímaný datový tok byl v rozmezí 15–18 Mb/s, což při tomto rozlišení není vůbec špatné. Ačkoliv byl obraz plynulejší než u předešlého rozlišení, nemyslím si, že by pro uživatele bylo přijatelné pracovat ve scéně s více jak sekundovými záseky. Ani u nejnižšího rozlišení Full HD nebylo dle mého názoru dosaženo dobrých výsledků. Při znatelně horší kvalitě obrazu se totiž stále držela sekundová latence, která u ostatních případů v tomto rozlišení zmizela. Datový přenos se pohyboval okolo 13 Mb/s a neobstála zde ani snímková frekvence, která ukazovala pouhých 10 snímků za sekundu.

Z otestovaných kodérů dle mého názoru dosáhl nejlepších výsledků softwarový kodér VRUT, kde víceméně všechna rozlišení byla uživatelsky přijatelná. Nejhuře si vedlo streamování s využitím VDI, při kterém u všech testovaných rozlišeních docházelo k latenci a zásekům obrazu.

4 Závěr

V běžném životě je technologie streamování velice vyspělá a díky svému stálému technologickému pokroku se stále více stává součástí našich každodenních životů. V současné době je již na internetu spousta společností, které poskytují možnost sledování živého vysílání, nebo možnost přehrání multimédií z archivu. Technologie streamování zažila největší vývoj v devadesátých letech, kdy se v oblasti informačních technologií začaly vyvíjet potřebné formáty a kodeky, které umožňují přenos audiovizuálních dat.

Tato práce se však zabývá streamováním v korporátním prostředí Škoda Auto, kde klienti potřebují denně pracovat s 3D modely v reálném čase a vysokém rozlišení. Nicméně si nemyslím, že je v současné době možné vyjít vstříc požadavkům klientů a nahradit tak přenos raw dat streamováním. Požadavky, jako je vyrenderování obrazu ve 4K či 8K rozlišení při zachování kvality obrazu a nulové latenci, jsou příliš vysoké a neodpovídají současným možnostem technologie streamování ve společnosti. Proto si myslím, že ještě nějakou dobu bude trvat, než se nahradí přenos raw dat streamováním. Dle mého názoru by v současné době pro společnost Škoda Auto mohlo být nejdostupnější cestou připojení VDI ke clusteru, což by následně mohlo dosáhnout stejných výsledků jako u softwaru VRED. Navíc je již VDI ve společnosti velice rozsáhlé a používané, takže by to neměl být problém ani pro klienty.

Výsledky této práce však ukázaly, že streamování skutečně mnohonásobně snižuje nároky zejména na datové přenosy v porovnání s raw daty. Při měření datového přenosu na základě raw dat u softwaru VRED se datový tok pohyboval okolo 5 Gbit/s. Všechny streamovací kodéry pak činily datový tok v rozmezí 10–30 Mb/s, což je mnohonásobně méně. Rozlišení 4K se prozatím ukázalo jako velice náročný požadavek a u všech kodérů, kde bylo toto rozlišení testováno docházelo k velkým zásekům obrazu, vysoké latenci a někdy dokonce ke kostičkování či úplnému rozpadu obrazu. Lépe obstály rozlišení QHD a Full HD, které je dle mého názoru již možno používat, nicméně se jedná o příliš nízká rozlišení, která nesplňují požadavky klientů. Nejlepších výsledků dosáhl softwarový kodér VRUT, který byl testován s využitím výpočetního výkonu clusteru. Při rozlišení 4K měl stream pouze sekundovou latenci a jemné záseky, přes které se ale obraz nerozpadal.

Přijímaný datový tok činil 25 Mb/s a jádra clusteru byla průměrně vytižena na 94%. Proto si myslím, že by VRUT mohl být v současné době nejlepší volbou pro využití streamování.

Zejména kvůli vysokým požadavkům na datové přenosy a hardware, bude do budoucna však potřeba nahradit velký obsah raw dat streamovaný obrazem. Uživatelé by tak mohli postačit téměř jakékoliv zobrazovací zařízení s běžně dostupným připojením k internetu. Nebude tedy potřeba internetových připojení s přenosovou rychlostí v řádech Gigabitů za sekundu. Stream také umožní připojení více klientů k jednomu streamu (UI streamu) a nejlépe i z jiné než lokální sítě společnosti Škoda Auto.

Tato diplomová práce popisuje digitalizaci a zpracování obrazu, definuje renderování obrazu, jeho metody a rozdíl mezi renderováním grafickým procesorem a renderováním hlavním procesorem. Dále samozřejmě popisuje technologie streamování, kde jsou uvedeny softwarové a hardwarové kodéry, které se již ve společnosti využívají nebo by pro společnost v oblasti streamování mohly mít přínos. V praktické části jsou tyto kodéry otestovány a na základě změn rozlišení streamu shrnuty jejich výsledky. Testovaná rozlišení byla Full HD, QHD a 4K. Bohužel se nepodařilo otestovat všechny kodéry. Například hardwarový kodér od společnosti Barco se nepodařilo po celou dobu zpracování této práce sehnat.

Cílem této práce bylo popsat a otestovat všechny dostupné softwarové a hardwarové technologie pro streamování obrazu ve vysokém rozlišení, které jsou používány ve společnosti Škoda Auto nebo by mohly být pro společnost v oblasti streamování přínosné. Cíl práce byl tedy splněn.

5 Seznam použitých zdrojů

- 1) ŠONKA, Milan a Václav HLAVÁČ. Počítačové vidění: první česká kniha o zpracování digitalizovaných obrazů ; rozpoznávání objektů v obrazech ; analýza trojrozměrných a pohybujících se objektů ; příklady aplikací počítačového vidění. Praha: Grada, 1992. Nestůjte za dveřmi (Grada).
- 2) HLAVÁČ, Václav a Miloš SEDLÁČEK. Zpracování signálů a obrazů. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04442-1.
- 3) Rendering [online]. Techopedia, 2019 [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/9163/rendering>
- 4) CPU versus GPU rendering – CPU versus GPU renderování [online]. 2022 [cit. 2021-09-30]. Dostupné z: <https://vray.cadzone.cz/cpu-gpu>.
- 5) CPU vs. GPU Rendering: Which Is Best for Your Studio Projects? [online]. Render Pool, 2022 [cit. 2021-09-30]. Dostupné z: <https://renderpool.net/blog/cpu-vs-gpu-rendering/>
- 6) Ray Tracing, Your Questions Answered: Types of Ray Tracing, Performance On GeForce GPUs, and More [online]. UNITED KINGDOM: NVIDIA, 2019 [cit. 2021-10-05]. Dostupné z: <https://www.nvidia.com/en-gb/geforce/news/geforce-gtx-dxr-ray-tracing-available-now/>
- 7) What is ray tracing? The games, the graphics cards and everything else you need to know: The holy grail of gaming graphics has arrived [online]. Techradar, 2019 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <https://www.techradar.com/news/ray-tracing>
- 8) What's the Difference Between Ray Tracing and Rasterization? [online]. NVIDIA, 2018 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <https://blogs.nvidia.com/blog/2018/03/19/whats-difference-between-ray-tracing-rasterization/>
- 9) Radiosity [online]. [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://solidthinking.com/tutorials/2014-tutorials/windows/help/radiosity.htm>
- 10) SILLION, François X.; PEUCH, Claude. Radiosity & global illumination. 1994.
- 11) What is 4K? The basics of Ultra HD explained: 4K resolution is now the standard for new TVs, but what actually is it? [online]. Techradar, 2022 [cit. 2021-10-27]. Dostupné z: <https://www.techradar.com/news/what-is-4k-resolution-ultra-hd>
- 12) The 8K (UHD-2) resolution [online]. DELOCK, 2020 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: https://www.delock.com/infothek/8K/8K_e.html
- 13) 8K Resolution: What Does This Bring TV Users and PC Players? [online]. Alzashop, 2018 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.alzashop.com/what-is-8k-resolution?fbclid=IwAR14zdLDBd-iHwva1xjc3OkalwpDoD-BllcPI3491i7yjm-F8gS8vMPCw8s>
- 14) Monitor (obrazovka) [online]. Wikipedia, 2021 [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Monitor_\(obrazovka\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Monitor_(obrazovka))

- 15) LCD a jejich technologie 1 - jak to funguje [online]. NOTEBOOK.cz, 2013 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://notebook.cz/clanky/technologie/2013/LCD-1>
- 16) OLED Monitors [online]. PC Monitors, 2022 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://pcmonitors.info/articles/oled-monitors/>
- 17) CROSSING REALITIES [online]. VIVE, 2022 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.vive.com/eu/product/vive-pro/>
- 18) XTAL: The World's Most Advanced Virtual & Mixed Reality Headset for Professionals [online]. vrgineers, 2022 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.xtal.pro/>
- 19) What is streaming? | How video streaming works [online]. Cloudflare, 2022 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.cloudflare.com/learning/video/what-is-streaming/>
- 20) The Beginner's Guide to Video Encoding, Decoding, and Transcoding [online]. Haivision, 2022 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.haivision.com/blog/all/the-beginners-guide-to-video-encoding-decoding-and-transcoding/>
- 21) What are video encoding formats? | Video formats [online]. Cloudflare, 2022 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.cloudflare.com/learning/video/video-encoding-formats/>
- 22) Video Encoding: The Definitive Guide [Updated for 2022] [online]. dacast, 2021 [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: <https://www.dacast.com/blog/what-is-video-encoding/?fbclid=IwAR1QQVbO75cQhvNjud7hmNBin82fikIttD2onY3qv6WASMwo5jyQLlwTqG4>
- 23) Video Encoder Options: Hardware vs. Software [online]. Switchboard, 2019 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://switchboard.live/blog/video-encoder-options-hardware-vs-software/?fbclid=IwAR2hqPmuju56Rgj8kIxzqT7si3PRj6IR0bkyNkbznkueT78NeIqUjdzbmUo>
- 24) VRED Products: Support and learning [online]. AUTODESK, 2022 [cit. 2021-12-15].
- 25) What is V-Ray? [online]. Chaos, 2020 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.chaos.com/3d-rendering-software>
- 26) VRUT 2.0. GROUP WIKI [online]. 2022 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://group-wiki.wob.vw.vwg/wikis/display/VT/VRUT+2.0>
- 27) SHANNON, Tom. Unreal Engine 4 for design visualization: developing stunning interactive visualizations, animations, and renderings. Boston: Addison-Wesley, [2018]. ISBN 0134680707.

- 28) What is virtual desktop infrastructure (VDI)? [online]. CITRIX, 2022 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.citrix.com/solutions/vdi-and-daas/what-is-vdi-virtual-desktop-infrastructure.html>
- 29) POSTUP NA NOVOU ÚROVEŇ. ZAŽIJ VÍCE.: Rychlejší. Chytřejší. Dolby Vision™ a Dolby Atmos®. Upscaling vylepšený umělou inteligencí. Hraní v cloudu s GeForce NOW. A s integrovaným Asistentem Google. [online]. NVIDIA, 2022 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: https://www.nvidia.com/cs-cz/shield/?fbclid=IwAR2pOaYo8PkuYJiW-S3RDAM9zgotWQSmZNAH6DFXmyfaLpONuddp_0iV-QM
- 30) Nvidia Shield (2019) review [online]. Techradar, 2019 [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: <https://www.techradar.com/reviews/gaming/games-consoles/nvidia-shield-1287106/review>
- 31) Bezproblémové streamování her, rychlé načítání 4K HDR obsahu a ambiciózní AI upscaling [online]. NVIDIA, 2022 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.techradar.com/reviews/gaming/games-consoles/nvidia-shield-1287106/review>
- 32) Company information [online]. BARCO, 2021 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.citrix.com/solutions/vdi-and-daas/what-is-vdi-virtual-desktop-infrastructure.html>
- 33) What is the Best Video Codec for Web Streaming? [2021 Update] [online]. dacast, 2021 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.dacast.com/blog/best-video-codec/>
- 34) RICHARDSON, Lain E. H.264 Advanced Video Compression Standard. 1. United Kingdom: Wiley-Blackwell, 2010. ISBN 9780470516928.
- 35) H.265 vs H.264: Which Video Compression Format Is Better to Use? [online]. Digiarty, 2021 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.winxdvd.com/resource/h265-vs-h264.htm>
- 36) Fraunhofer HHI is proud to present the new state-of-the-art in global video coding: H.266/VVC brings video transmission to new spee [online]. Fraunhofer, 2020 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://newsletter.fraunhofer.de/-viewonline2/17386/465/11/14SHcBTt/V44RELLZBp/1>
- 37) Video streaming protocols explained: RTMP, WebRTC, FTL, SRT [online]. Restream, 2020 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://restream.io/blog/streaming-protocols/>
- 38) What is HLS Streaming and When Should You Use It? [2022 Update] [online]. London: dacast, 2022 [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: https://www.dacast.com/blog/hls-streaming-protocol/#anchor_0