

PRAKTIKUM IM GROSSEN STUDIENPROJEKT
**VERTEILTES SYSTEM ZUR BERECHNUNG DER
MANDELBROTMENGE**

IM WINTERSEMESTER 2020/21
BEI PROF. DR. PETER STURM

UNIVERSITÄT TRIER

LARS KLEE, 1288210
RANDY STOPPE, 1390338
JOSUA KIRSCH, 1293138

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemstellung	1
1.3	Zielsetzung	1
1.4	Gliederung	1
2	Android Client	2
2.1	Verwendete Technologie	2
2.2	Bedienungsanleitung	2
2.2.1	Starten der Anwendung	2
2.2.2	UI-Erklärung	4
2.3	Entwicklung und Probleme	7
3	CUDA Client	12
3.1	Verwendete Technologie	12
3.2	Bedienungsanleitung	12
3.3	Entwicklung und Probleme	12
4	JavaScript Client	12
4.1	Verwendete Technologie	12
4.2	Bedienungsanleitung	14
4.2.1	Vorbereitung des Browsers	14
4.2.2	Verwendung des Clients	14
4.3	Entwicklung und Probleme	14
5	Server	20
5.1	Funktionsweise	20
5.2	UI-Erklärung	20
6	Reflexion	21

1 Einleitung

Diese Arbeit entsteht im Rahmen des großen Studienprojektes bei der Professur Systemsoftware und Verteilte Systeme der Universität Trier.

1.1 Motivation

1.2 Problemstellung

Die Mandelbrotmenge ist die Menge der komplexen Zahlen c , für die die durch die Iteration

$$\begin{aligned} z_0 &= 0 \\ z_{n+1} &= z_n^2 + c \end{aligned}$$

definierte Folge $(z_n)_{n \in \mathbb{N}}$ beschränkt ist. Diese lässt sich auf der komplexen Ebene geometrisch interpretieren und bildet ein Fraktal. Wird jedem Punkt auf der komplexen Ebene ein Pixel mit dem entsprechenden Wert von c zugewiesen, ergibt sich eine graphische Darstellung der Mandelbrotmenge. Liegt ein Punkt in der Mandelbrotmenge, so wird ein Pixel schwarz gefärbt, liegt er nicht in ihr, so hängt seine Farbe davon ab, wie schnell die Folge mit dem betreffenden c gegen Unendlich strebt. Diese Berechnung ist äußerst rechenintensiv, jedoch kann jeder einzelne Pixel unabhängig voneinander berechnet werden. Somit bietet sich eine Berechnung der Mandelbrotmenge durch ein verteiltes System an.

1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein verteiltes System zu entwickeln, welches in der Lage ist, die Mandelbrotmenge und dessen Zoomstufen performant zu berechnen. Zu diesem Zweck wird ein Server in Java programmiert, zu dem sich Clients verbinden und Rechenaufträge zur Berechnung der Mandelbrotmenge erhalten können. Der Server selbst rechnet dabei keinen einzigen Punkt der Mandelbrotmenge aus, sondern empfängt die errechneten Ergebnisse der Clients und stellt diese daraufhin graphisch dar. Über die Nutzeroberfläche kann in die Mandelbrotmenge herein- und herausgezoomt werden, wodurch neue Rechenaufträge verteilt werden.

Die verschiedenen Clients werden jeweils unter unterschiedlichen Technologien programmiert. So wird der erste Client als Android-Anwendung entwickelt, der zweite Client als CUDA-Anwendung unter Zuhilfenahme des Grafikprozessors und der dritte Client als browserbasierte Anwendung mit JavaScript und WebAssembly.

1.4 Gliederung

Die folgenden drei Kapitel beschreiben jeweils einen der entwickelten Clients und enthalten jeweils Unterkapitel, die die zugrundeliegenden Technologien, die Bedienung und

letztlich die Entwicklung der Clients sowie der Probleme, die in dieser auftreten, beschreiben. Darauf folgt eine Dokumentation des Servers, die dessen Funktionsweise näher erläutert. Schlussendlich erfolgt eine Reflexion, in der sich damit auseinandergesetzt wird, inwiefern die Zielsetzung erfüllt werden konnte und ob die Verwendung der jeweiligen Technologien sich als Vorteil erwiesen hat oder nicht.

2 Android Client

2.1 Verwendete Technologie

Bei der App-Programmierung kann zwischen Kotlin, Java und C++ als Programmiersprachen gewählt werden. Hier wird C++ zur Berechnung der Mandelbrotmenge und Java für die Server-Client-Kommunikation, Button-Listener und zur Überprüfung der WLAN-Verbindung verwendet. Das eigentliche Hauptproblem bei Android oder im Allgemeinen bei Smartphones ist, dass diese, im Gegensatz zu PCs, beschränkte Ressourcen vorweisen, sei es CPU-Leistung, RAM, Speicherplatz oder Batterielaufzeit. Auch wenn diese Beschränkungen mit neuen Modellen und Technologien immer weiter abnehmen, sollte dennoch dafür gesorgt werden, dass die App möglichst Ressourcen schonend programmiert wird. Außerdem muss bei der App-Programmierung dafür gesorgt werden, dass der main-Thread, auch UI-Thread genannt, möglichst wenig Arbeit auszuführen hat, da dieser, wie der Name bereits andeutet, dafür verantwortlich ist, dass die UI weiterhin auf Eingaben reagieren kann. Wenn dieser Thread zu viel Arbeit verrichten muss, dann kann es nach einer gewissen Zeit zu einer ANR-Meldung (Application Not Responding) kommen, dann bekommt der Nutzer die Möglichkeit die App zu beenden oder zu warten, bis die Aufgabe beendet wurde und die UI auf eine Eingabe reagieren kann. Deswegen ist es in der App-Programmierung wichtig, so wenig wie möglich auf dem UI-Thread laufen zu lassen. Dies war zu Beginn des Projekts ein Problem, da immer wieder dem UI-Thread zu viele Aufgaben gegeben wurde und die App regelmäßig abstürzte. Es muss sehr viel in neue Threads ausgelagert werden, wie zum Beispiel der Verbindungsaufbau zum Server, aber auch das Verschicken einer einzelnen Nachricht, da sonst die App mit der Fehlermeldung „NetworkOnMainThreadException“ abstürzt.

2.2 Bedienungsanleitung

2.2.1 Starten der Anwendung

1. starte Android Studio
2. öffne Android Projekt (Studienprojekt_Android)
3. wähle Gerät aus [Smartphone (a), Emulator (b) oder mehrere Geräte (c)]
 - a) Smartphone vorbereiten (Entwickleroptionen aktivieren)
 1. Einstellungen öffnen und auf „Telefoninfo“ tippen
 2. auf Softwareinformation tippen

3. mehrmals auf Schaltfläche „Buildnummer“ tippen
4. gebe Smartphone Pin ein
5. Nachricht „Der Entwicklermodus wurde aktiviert“ erscheint
6. in Einstellungen erscheint Schaltfläche „Entwickleroptionen“
7. auf Entwickleroptionen tippen
8. aktiviere USB-Debugging
9. tippe auf OK
10. Smartphone mit USB-Kabel an PC anschließen
 - Entwickleroptionen deaktivieren (nach erfolgreicher Installation der App)
 1. Einstellungen öffnen
 2. auf Entwickleroptionen tippen
 3. in ersten Zeile auf Regler tippen
- b) wenn Emulator noch nicht erstellt
 1. wähle „AVD Manager“
 2. wähle „create virtual device“
 3. wähle beliebiges virtuelles Smartphone
 4. klicke „next“
 5. wähle, falls vorhanden, aktuellstes Betriebssystem, ansonsten downloade es
 6. klicke „next“
 7. klicke „finish“
- c) falls gewünscht kann mithilfe von „Run on Multiple Devices“ die App auf mehreren Geräten gleichzeitig gestartet werden
 1. auf „Run on Multiple Devices“ klicken
 2. alle gewünschten Geräte auswählen
 3. auf „run“ klicken (App wird installiert und öffnet automatisch)
 - Schritt 4 entfällt somit
4. starte App (App wird installiert und öffnet automatisch)

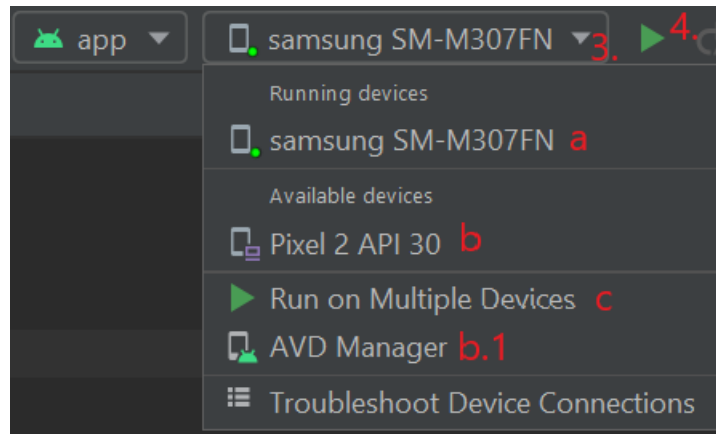


Abb. 1: zu finden oben in der Mitte von Android Studio

Falls beim öffnen folgender Fehler auftritt:

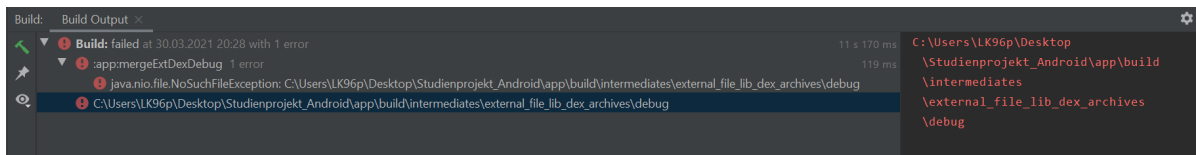


Abb. 2: Build failed

Dann mache folgendes und klicke wieder auf App starten:

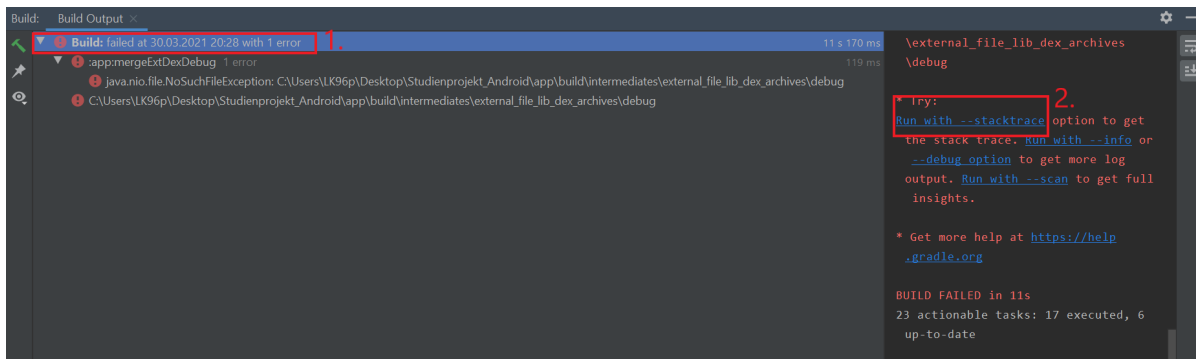


Abb. 3: Fehlerbehebung von Build failed

Falls Fehler „Invalid Gradle JDK configuration found“ auftritt. dann klicke auf „Use JDK from project structure“:

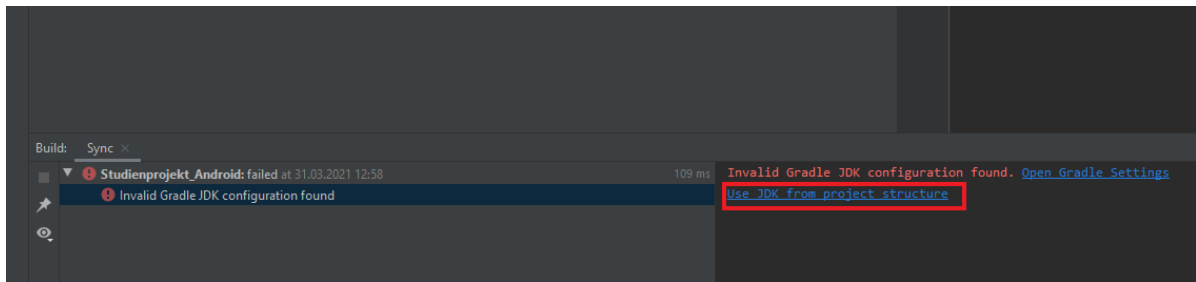


Abb. 4: Invalid Gradle JDK configuration found

2.2.2 UI-Erklärung

Wenn die App gestartet wird und der Startbildschirm (Abb.5) einzusehen ist, dann hat der User die Möglichkeit am oberen Bildschirmrand einen Namen (Abb.5 a) für das Gerät einzugeben, dieser wird mit an den Server geschickt und der Androidsocketthread erhält dann diesen Namen um besser erkennen zu können bei welchem Client die Verbindung beendet wurde. Darunter besteht die Möglichkeit die gewünschte IP-Adresse (Abb.5 b) sowie den Port (Abb.5 c) des Servers einzugeben. Entsprechen die Eingaben den Wünschen so kann mit einem Klick auf Connect (Abb.5 d) versucht werden eine Verbindung zum Server herzustellen, wenn dies nicht gelingt so bekommt der User eine Rückmeldung per Toast-Nachricht woran es gelegen hat (Server nicht erreichbar, keine WLAN-/Internetverbindung, ungültige IP/Port). Wenn der User alle Eingaben verwerfen will, so besteht die Möglichkeit mit einem Klick auf den Delete-Button (Abb.5 e) dies zu ermöglichen.

Wenn eine Verbindung zum Server aufgebaut werden konnte so wechselt die Ansicht zum Berechnungsbildschirm (Abb.6). Dort kann der User am oberen Bildschirmrand die CPU-Usage (Abb.6 a) sowie die Memory-Usage (Abb.6 b) einsehen. In der Mitte des Bildschirms kann die Network-Usage (Abb.6 c) eingesehen werden. Diese zeigt an wie viele kb/s gesendet bzw. empfangen werden, daran lässt sich erkennen ob gerade ein Datenaustausch zwischen Client und Server stattfindet. Über den Buttons wird der zuvor auf der Startseite eingegebene Gerätenamen angezeigt (Abb.6 d). Im unteren Drittel des Bildschirms werden die Buttons dargestellt (Abb.6 e). Am unteren Ende des Bildschirms hat der User die Möglichkeit den aktuellen Status, ob eine Berechnung läuft oder pausiert ist, einzusehen (Abb.6 f). Mit einem Tippen auf Start fragt der User den ersten Auftrag an und wird berechnet daraufhin, bis pausiert oder beendet wird, die Mandelbrotmenge, außerdem wechselt der Text auf dem Button zu „Running...“ (Abb.7). Mit einem Klick auf Pause wird die aktuell laufende Berechnung beendet und an den Server geschickt, aber kein neuer Auftrag angefordert, dies kann wieder fortgesetzt werden wenn der User wieder auf den Start-Button, der jetzt die Beschriftung „Resume“ hat, klickt. Der Pause-Button wechselt, nachdem er geklickt wurde, seine Beschriftung von „Pause“ auf „Paused“ (Abb.8). Wenn die Berechnung wieder fortgesetzt werden möchte, dann genügt ein Klick auf den Start-Button, der jetzt die Beschriftung Resume hat, anschließend wird die Berechnung der Mandelbrotmenge fortgeführt (Abb.9). Mit einem Klick auf „Quit“ wird die Verbindung zum Server getrennt, falls eine Berechnung laufen sollte,

dann wird der User gefragt ob er die laufende Berechnung unterbrechen will oder nicht (Abb.10). Wenn der User auf „Quit“ klickt und gegebenenfalls die Berechnung beendet, dann wechselt die Ansicht wieder zum Startbildschirm.

Anwendungshinweis:

Es wird nicht empfohlen den Darkmode des Smartphones, während die App läuft, zu ändern, da ansonsten eine eventuell laufende Berechnung beendet wird und zwischen Client und Server keine Kommunikation mehr möglich ist.

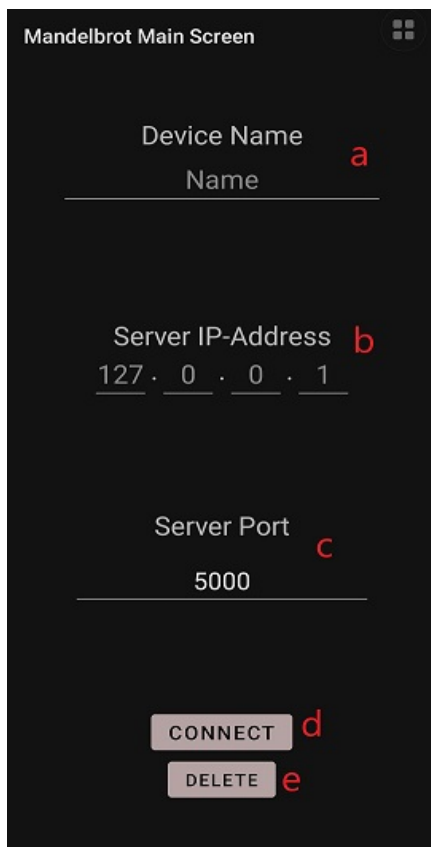


Abb. 5: Startbildschirm

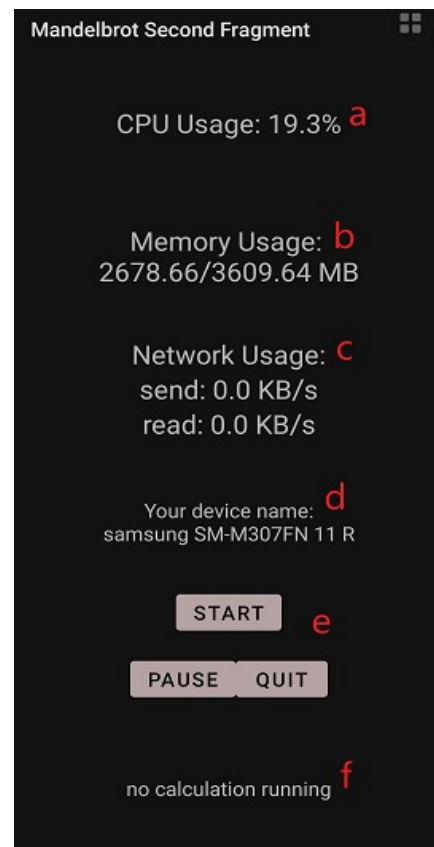


Abb. 6: Berechnungsbildschirm

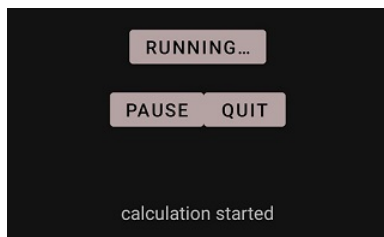


Abb. 7: Berechnung gestartet

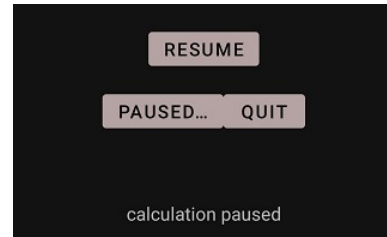


Abb. 8: Berechnung pausiert

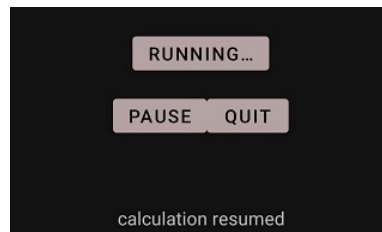


Abb. 9: Berechnung fortgesetzt

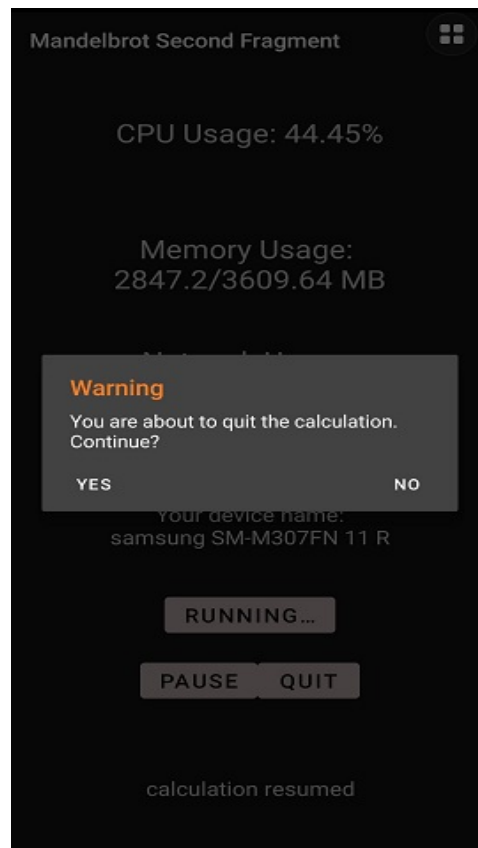


Abb. 10: laufende Berechnung beenden

2.3 Entwicklung und Probleme

Zu Beginn sollte die App nur den von der App selbst benutzten RAM anzeigen lassen, dies erwies sich schwieriger als gedacht, denn jede App bekommt vom System eine bestimmte Menge an RAM zur alleinigen Verfügung gestellt, allerdings benutzen die Apps auch sogenannten „shared Memory“ und dieser wird von mehreren Apps benutzt, was die Bestimmung der Menge des benutzten RAMs für eine bestimmte App erschwert. Aus diesem Grund wird die Gesamtmenge an belegtem RAM angezeigt um so dann ableiten zu können ob die App richtig arbeitet.

Um die CPU-Usage auslesen zu können hätte nach ersten Recherchen das Smartphone „gerootet“ werden müssen um die benötigten Informationen auslesen zu können, damit die CPU-Usage ausgelesen und somit angezeigt werden kann. Dies ist allerdings nicht zu empfehlen, da nach diesem Vorgang im schlimmsten Falle das Smartphone nicht mehr benutzbar ist. Außerdem können integrierte Sicherheitssysteme nach dem Root-Vorgang nicht mehr aktiviert werden und dadurch wird das Smartphone anfälliger für Virus- oder Malware-Angriffe. Aus diesen Gründen wurde zunächst auf das Rooten und auf das Anzeigen der CPU-Usage verzichtet. Nach weiteren Recherchen wurde eine Lösung, ohne das Smartphone rooten zu müssen, auf den folgenden Internetseiten gefunden:

- <http://www.java2s.com/Code/Android/Hardware/GetCPUFrequencyCurrent.htm>
- <http://www.java2s.com/Code/Android/Hardware/GetCPUFrequencyMin.htm>
- <http://www.java2s.com/Code/Android/Hardware/GetCPUFrequencyMax.htm>

Aus diesen drei Links wurde dann die gewünschte Lösung abgeleitet (siehe „CpuInfo.java“).

Das Anzeigen der Network-Usage hat von Beginn an zufriedenstellend funktioniert und dient dazu um zu überprüfen ob eine Kommunikation zwischen dem Client und dem Server stattfindet.

Nachdem das Anzeigen der Auslastungen jetzt zufriedenstellend funktioniert und der Verbindungsaufbau vom Client zum Server in einen extra Thread ausgelagert worden ist und somit eine Verbindung hergestellt werden kann, konnte sich nun der Berechnung der Mandelbrotmenge und der Versendung der Ergebnisse an den Server gewidmet werden. Die Kommunikation zwischen Client und Server geschieht mittels TCP.

Kommunikation zwischen Client und Server (Version 1.0): Der Client hat zu Berechnung alle benötigten Variablen vom Server erhalten (wie genau siehe Dokumentation zu Server-Version 1.0). Anschließend hat der Client mit einem Klick auf den Start-Button die Berechnung gestartet. In Version 1.0 hat der Client allerdings jeden Pixel des Bildes einzeln an den Server geschickt, dies führte zu einer langen Laufzeit um nur das Startbild zu berechnen und auf der Serverseite darzustellen.

Mit dem Wechsel zu Server-Version 2.0 sind diese Probleme behoben, da jetzt eine komplette Zeile zunächst auf der Clientseite berechnet wird und dann anschließend an den Server verschickt wird und somit eine Zeile auf der Serverseite dargestellt werden kann. Bei Version 2.0 berechnet jetzt ein Client nicht mehr einen bestimmten Bereich des Bildes, sondern fragt jetzt immer nach einer berechneten Zeile eine neue Auftrag an.

Dies hat dafür gesorgt, dass die Zeitdauer um das Startbild darzustellen verkürzt wurde (mehr zur Zeitdauer weiter unten). Beim Erhalten der Auftragswerte kam es allerdings auf Clientseite zunächst zu Problemen, da die Werte vom Server als Byte-Array mittels `DataOutputStream` verschickt wurden aber auf Clientseite mithilfe eines `BufferedReader` als String eingelesen wurden und dann bei der Umwandlung von String in Byte-Array Fehler auftraten wie zum Beispiel, dass das Empfangene Byte-Array eine falsche Länge aufwies und somit konnte der übermittelte Wert nicht aus dem Array generiert werden. Die Lösung dieses Problems ist es nach dem Erhalt der „task“-Nachricht, welche dem Client signalisiert, dass die nächsten Nachrichten, die geschickt werden, die Werte sind, die benötigt werden um eine Zeile der Mandelbrotmenge zu berechnen, mithilfe eines `DataInputStream` die Nachrichten einzulesen. Außerdem werden die Werte vom Server nicht mehr als Byte-Array, sondern als `int` für den `x`- und `itr`-Wert bzw. als `double` für den `xMove`-, `yMove`- und `zoom`-Wert verschickt und auf Clientseite mit `readInt()` bzw. `readDouble()` vom `DataInputStream` eingelesen. Nun kann die Mandelbrotmenge erfolgreich berechnet werden, allerdings kam es zunächst zu Problemen, da die Übermittlung der in C++ berechneten Punkte, also einer ganzen Zeile, zu Java nicht richtig funktioniert hatte, dies wurde behoben indem zunächst die `initializePackage`-Methode in `Reader.java` angepasst wurde. Diese Methode wurde in C++ aufgerufen und es wurden der `x`-, `y`- und `itr`-Wert nach jedem `for`-Schleifendurchlauf übergeben und in `Reader.java` zu einem String zusammengefasst. Diese Methode wurde im späteren Verlauf durch die `format`-Methode in C++ ersetzt, nun wird nur das komplette Paket von C++ an Java übergeben. Nachdem ein Paket jetzt erfolgreich erstellt und an den Server geschickt wird, warf der Server eine `NoSuchElementException`, dies lag daran, dass die letzten beiden Zeilen eines Paktes wie folgt aussahen:

```
...
„\n“
„\ntick“
```

Die Exception wurde geworfen als der Server den Zeilenumbruch eingelesen hatte. Dieses Problem konnte gelöst werden, in dem „\n“ entfernt wurde. Solange der Pause-Button nicht geklickt wurde, wird an jedes Paket eine Zeile mit dem Inhalt „\ntask“ angefügt. Diese sorgt dafür, dass der Server dem Client einen neuen Auftrag zuschickt.

Jetzt kann der Client erfolgreich Aufträge entgegennehmen, diese berechnen und an den Server zurückschicken und dieser kann die Pakete dann erfolgreich darstellen. Jedoch warf der Server jetzt eine `StackOverflowException`, dies lag daran, dass bei der `sendTask`-Methode des Servers nach dem Verschicken des Iterationswerts nochmal `receiveMessage()` aufgerufen wurde obwohl dies allerdings unnötig war und somit gelöscht werden konnte und das Problem löst.

Die `Check`-Klasse sorgt dafür, wenn die Internetverbindung abbricht oder zu schwach ist, dass dann die Verbindung zum Server getrennt wird und die Ansicht auf dem Bildschirm wieder zum Startbildschirm wechselt. Zunächst wechselte die Ansicht nicht zum Startbildschirm zurück, wenn die WLAN-Verbindung unterbrochen wurde, da bei der Überprüfung welches Fragment, also welcher Ansicht, gerade aktiv ist, ein Fehler unterlaufen ist. Mithilfe des „`FragmentManager`“ konnte dieses Problem gelöst werden, denn „`fragmentManager.getPrimaryNavigationFragment()`“ liefert das aktuelle aktive Frag-

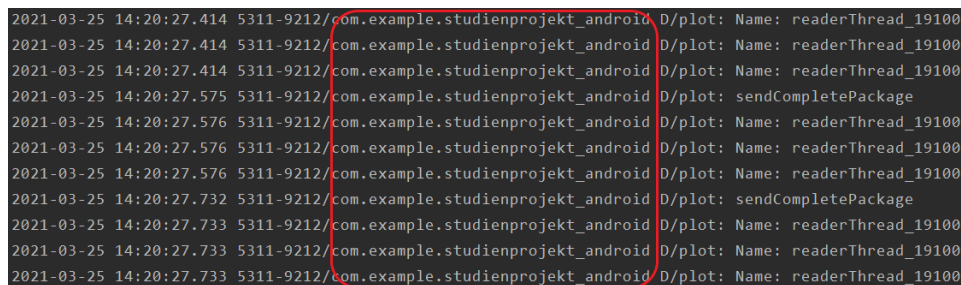
ment und somit kann der Befehl

```
„NavHostFragment.findNavController(Objects.requireNonNull(fragmentManager  
.getPrimaryNavigationFragment()))).navigate(R.id.action_secondFragment_to  
_firstFragment)“
```

erfolgreich ausgeführt werden. Das gleiche Problem trat auch beim Tippen auf den Quit-Button auf und konnte genauso gelöst werden.

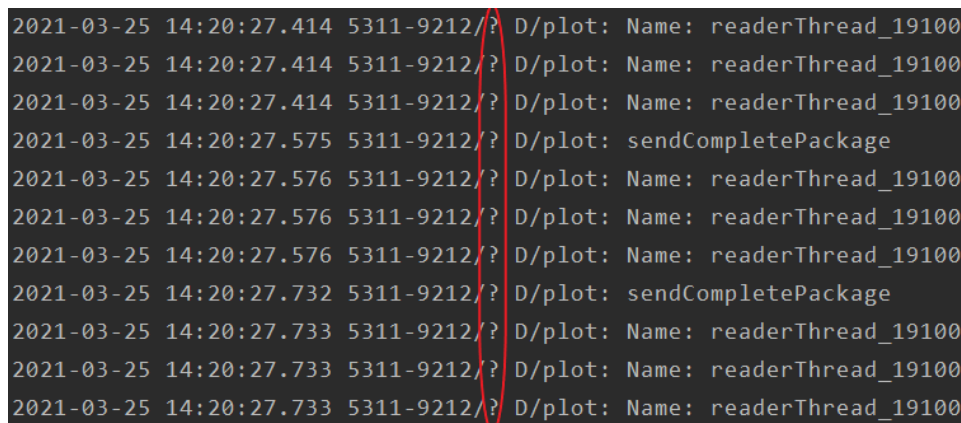
Durch Zufall fiel auf, dass im Logcat, wenn zur zweiten Ansicht gewechselt wird, zwischen 30 und 40 Frames jede Sekunde übersprungen werden, da der UI-Thread zu viel Arbeit verrichtet. Das liegt vermutlich daran, dass jede Sekunde die CPU-Usage, Memory-Usage sowie die Network-Usage aktualisiert werden und dieser Vorgang muss auf dem UI-Thread laufen, da dieser der einzige ist der die UI aktualisieren kann. Die Benutzeroberfläche reagiert allerdings noch auf jede Eingabe und dies stellt somit kein schwerwiegendes Problem dar und kann ignoriert werden.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass, nachdem die App beendet wird und das Smartphone mit dem PC mit einem USB-Kabel wieder verbunden wird sowie Android Studio neugestartet wird, weiterhin Ausgaben im Logcat stattfinden. Es können allerdings keine neuen Berechnungen sein, da der Zeitstempel, wie in den beiden folgenden Bildern zu erkennen, identisch ist.



```
2021-03-25 14:20:27.414 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.414 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.414 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.575 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: sendCompletePackage
2021-03-25 14:20:27.576 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.576 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.576 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.732 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: sendCompletePackage
2021-03-25 14:20:27.733 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.733 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.733 5311-9212/com.example.studienprojekt_android D/plot: Name: readerThread_19100
```

Abb. 11: Logcatausgabe bei laufender App



```
2021-03-25 14:20:27.414 5311-9212/? D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.414 5311-9212/? D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.414 5311-9212/? D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.575 5311-9212/? D/plot: sendCompletePackage
2021-03-25 14:20:27.576 5311-9212/? D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.576 5311-9212/? D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.576 5311-9212/? D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.732 5311-9212/? D/plot: sendCompletePackage
2021-03-25 14:20:27.733 5311-9212/? D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.733 5311-9212/? D/plot: Name: readerThread_19100
2021-03-25 14:20:27.733 5311-9212/? D/plot: Name: readerThread_19100
```

Abb. 12: Logcatausgabe bei nicht laufender App

Dieses Problem kann nicht daran liegen, dass der „readerThread“ nicht richtig beendet wird, wenn die App geschlossen wird, da ein Aufruf von „readerThread.interrupt()“ nicht hilft. Wenn die App deinstalliert und das Smartphone neu gestartet wird, dann wird bei Android Studio in Logcat nichts mehr ausgegeben. Deswegen wird empfohlen, wenn die App auf dem eigenen Smartphone ausgeführt wird, nach der Deinstallation das Smartphone neu zu starten.

Berechnungsdauer (Startbild) via Internet:

Server-Version 1.0	Server-Version 2.0
Auflösung: 1260x625 Iterations: 50 Anzahl Clients: 1 Client-Typ: Android Messung 1	
ca. 300 Sekunden	ca. 210 Sekunden
Auflösung: 500x500 Iterations: 50 Anzahl Clients: 1 Client-Typ: Android Messung 2	
nicht gemessen	ca. 70 Sekunden
Auflösung: 500x500 Iterations: 200 Anzahl Clients: 1 Client-Typ: Android Messung 3	
nicht gemessen	ca. 80 Sekunden
Auflösung: 1000x1000 Iterations: 200 Anzahl Clients: 1 Client-Typ: Android Messung 4	
nicht gemessen	ca. 165 Sekunden

Messungen 2, 3 und 4 konnten bei der Server-Version 1.0 nicht gemessen werden, da die Auflösung nicht angepasst werden konnte. Es ist allerdings gut erkennbar, dass die benötigte Zeit von Server-Version 1.0 zu 2.0 stark reduziert wurde. Des Weiteren ist gut zuerkennen, dass die Erhöhung der Iterations keinen drastischen Einfluss auf die Berechnungsdauer hat (Messungen 2 und 3), denn die benötigte Zeit hat sich im Gegensatz zur Iteration nicht vervierfacht. Einen viel größeren Einfluss auf die Zeit nimmt hingegen die Größe der Auflösung (Messungen 3 und 4). Hier wurde jeweils die Höhe und Breite verdoppelt, die Fläche wurde also vervierfacht, die benötigte Zeit hat sich circa verdoppelt.

3 CUDA Client

3.1 Verwendete Technologie

Compute Unified Device Architecture (CUDA) ist eine im Jahr 2007 von NVIDIA entwickelte Architektur zur parallelen Berechnung auf hauseigenen Grafikkarten. Diese wird bis heute von allen Grafikprozessoren der Generation G80 und aufwärts unterstützt und stetig weiterentwickelt. Mit CUDA verfolgt NVIDIA das Ziel, das Feld der "general-purpose computing on graphics processing units" (GPGPU) voranzutreiben und Softwareentwicklern ohne speziellem Hintergrundwissen in der Grafikkartenprogrammierung zu ermöglichen, die enorme parallele Rechenleistung der Grafikkarte für computergrafikberechnungsferne Anwendungen nutzen zu können.

Das Schreiben erster sogenannter CUDA-Kernels gestaltet sich für Entwickler mit C/C++ Hingrund als besonders angenehm, da mit „CUDA for C/C++“ eine sehr machtvoll API zur Verfügung steht, die die bekannte C/C++ Syntax nur um einige wenige Schlüsselwörter ergänzt.

Erste Kernels lassen sich anhand der umfangreichen Dokumentation von NVIDIA schnell umsetzen. Um allerdings wirklich effiziente Programme für Grafikprozessoren zu schreiben, sollte ein grundlegendes Verständnis des Aufbaus der „CUDA-enabled“ Grafikprozessoren vorhanden sein und das Management von globalem, geteiltem und konstantem Speicher verstanden werden.

CUDA folgt einer hierarchischen Struktur. Oberste Ebene bildet das sogenannte „Grid“, das mehrere Threadblöcke zusammenfasst. Ein Threadblock umfasst seit 2019 bis zu 1024 Threads. Ein beispielhafter Kernelaufruf

```
kernel_function<<<Anzahl Blöcke, Anzahl Threads pro Block>>>(A, B, C)
```

legt ein entsprechendes „Grid“ mit der entsprechenden Anzahl an entsprechend dimensionierten Threadblöcken an und übergibt die Parameter A, B und C. Die Parameter sind fortan im lokalen Speicher jedes Threads verfügbar. Da zwischen Host und Device Speicher hin- und hergewechselt werden muss, sollte mindestens einer der übergebenen Parameter ein entsprechender Pointer auf ein zuvor über „cudaMalloc“ alloziertes Gerätespeichersegment sein, in dem die Ergebnisse der GPU abgelegt werden. Dieses Speichersegment wird dann nach Beendigung des Kernels in ein entsprechend großes Speichersegment des Hosts kopiert. Diese Transfers sollten allerdings mit bedacht durchgeführt werden, da sie äußerst kostspielig sind.

Alle Blöcke eines „Grids“ führen immer denselben Kernel aus. Zudem gilt es zu beachten, dass Threadblöcke auf der Hardwareseite von CUDA-fähigen GPUs in sogenannten „Warps“ organisiert sind. Ein „Warp“ ist eine Menge von 32 Threads, die pro Clockzyklus immer die selbe Instruktion ausführen müssen. Daher gilt es „Warp“-Divergenz zu vermeiden, also Bedingungen im Code, die einen unterschiedlichen Programmablauf innerhalb eines „Warps“ verursachen können. Wenn ein Teil des Warps den einen Pfad gehen muss und der andere Teil einen anderen, so werden die Instruktionen nicht mehr parallel, sondern sequentiell ausgeführt.

Der Aufbau eines „CUDA for C/C++“ Programms ist nahezu identisch zu einer normalen C/C++-Datei. Das gilt für Header- als auch für Sourcedateien. Die einzigen Unterschiede sind die Dateierweiterung (.cu statt .c bzw. .cuh statt .h) und die Verwendung der folgenden Schlüsselwörter

- `__host__` (kennzeichnet Code der auf der CPU läuft und nur von dieser aufgerufen werden kann)
- `__global__` (kennzeichnet Kernelmethoden, die durch den Host gestartet werden können)
- `__device__` (kennzeichnet Code der auf der GPU läuft und nur durch Kernel- bzw. andere Devicemethoden aufgerufen werden kann)
- `__shared__` markiert Variablen, die in den geteilten Speicher geladen werden sollen.

Zusätzlich werden Kernelfunktionsaufrufe, wie zuvor bereits gesehen, durch ein `<<< ... >>>` markiert, in welchem die Launchkonfigurationen des Kernels übergeben werden, also Anzahl der Blöcke, Anzahl der Threads pro Block und optional kann eine Menge an dynamischen geteilten Speicher übergeben werden.

Damit CUDA verwendet werden kann werden das NVIDIA CUDA Toolkit , eine entsprechende NVIDIA Grafikkarte und der *nvcc*-Compiler benötigt.

3.2 Bedienungsanleitung

Das abgegebene GitHub-Repository beinhaltet eine Microsoft Visual Studio Projektmappe. Diese kann bequem aus der „Mandelbrotprojekt.sln“ Datei erzeugt werden und beinhaltet 3 Projekte mit den Namen

- CPU Mandelbrot
- CUDA MultiThread
- CUDA SingleThread

Der Sourcecode ist explizit für das Windowssystem geschrieben worden und verwendet unter anderem die Winsocket-Bibliothek für die Server-Client-Kommunikation. Vor erstmaliger Nutzung sind folgende Schritte durchzuführen:

1. Installation der Microsoft Visual Studio 2019 IDE.
2. Installation des NVIDIA CUDA Toolkits Version 11.2.1.
3. Öffnen der Projektmappe durch die „Mandelbrotprojekt.sln“ Datei.
4. Auswahl des auszuführenden Projekts durch Rechtsklick auf Projektname → Als Startprojekt festlegen.

Die Clients sind nicht dazu gedacht Eingaben durch den User anzunehmen, sondern als reine Rechenmaschinerie vorgesehen. Aus diesem Grund handelt es sich um „Konsolenapplikationen“, die lediglich Fehlermeldungen bzw. Erfolgsnachrichten und die tatsächliche Berechnungsdauer pro Aufgabe auf Clientseite ausgeben. Daher verfügt die Klasse „Client.cpp“ über die beiden Makros PORT und IP. In diesen sollten dann, jenachdem unter welcher IP-v4-Adresse und unter welchem Port der Server gestartet wurde, die entsprechenden Werte eingetragen werden. Solange der Sourcecode des Servers nicht verändert wird, ist der Port standardmäßig auf 5000 gesetzt und muss nicht angepasst werden.

3.3 Entwicklung und Probleme

Die Entwicklung der CUDA-Clients erfolgte nahezu reibungslos. Wie in 3.1 beschrieben ergänzt die CUDA API die C/C++ Syntax nur um wenige Schlüsselwörter und ansonsten handelt es sich um beinahe native C/C++ Programmierung. Zunächst wurde die Client-Klasse, die in allen 3 abgegeben Versionen identisch ist, geschrieben. Die Kommunikation zwischen Java Server und C/C++ Winsockets erfolgte problemlos, was nicht sonderlich überrascht, da Java und C/C++ beide denselben Standard (IEEE 754) benutzen. Das Auslesen der Werte in den vom Server übermittelten Aufgaben erfolgte entsprechend ohne Probleme. Die Berechnungen müssen als Stringpakete an den Server zurückgesendet werden, da dieser, bedingt durch die Funktionsweise der anderen beiden Clients, nur solche annehmen und auswerten kann. Das erzeugt einen entsprechenden Overhead, der sowohl die CPU-Version als auch die CUDA-Versionen in der Realität stärker drosselt, als nötig wäre. Hinzu kommt der Overhead durch die TCP-Kommunikation an sich. Obwohl die Berechnung der ersten Zoomstufen der Mandelbrotmenge nur Bruchteile einer Sekunde dauern, beträgt die reale Darstellungszeit des fertigen Bildes durch die CPU-Version – verwendet wurde ein Intel Core i5-8400 – bei einer Auflösung von 500x500 ca. 1,6 Sekunden und bei der CUDA-Multithread-Version – verwendet wurde eine GTX 1060 – ca. 0,5 Sekunden. Die Messdaten sind nur stellvertretend für lokale TCP-Verbindungen und gelten für das „default“ Bild der Mandelbrotmenge. Die CUDA-Single-Thread Version, die ursprünglich vorgesehen war, erwies sich als äußerst nutzlos, da ein einzelner CUDA-Core nicht schneller ist als ein CPU-Core und das Kopieren der Aufgaben in den Device-Speicher einen Overhead erzeugt. Gleichzeitig sollte keine hochperformante parallelisierte CUDA Anwendung geschrieben werden, weswegen in der CUDA-Multithread-Version als Mittelweg ein einzelner Threadblock mit bis zu 1024 Threads genutzt wird. Die Anzahl der genutzten Threads hängt dabei vom gewählten Breitenwert des Bildes ab, wodurch die Multithreadvariante nur bis zu entsprechenden Auflösungen mit einem Breitenwert von 1024 genutzt werden kann. Eine kleine Herausforderung ist dadurch entstanden, dass die Kommunikation mit dem Server auf Strings basiert. Da CUDA keine Strings kennt und es wenig sinnvoll wäre die Ergebnisse jedes Threads zunächst auf die CPU zu kopieren und dann umzuwandeln, mussten die Ergebnisse von den CUDA-Thread selbst in ASCII Zeichen konvertiert und in der richtigen Reihenfolge in das Ergebnispaket geschrieben werden. Das erforderte eine kleine Spielerei mit den Offsets der parallelen Pointerzugriffe des Ergebnissbuffers. Nachdem diese erste

kleine Hürde gelöst war, lief der CUDA-Client lokal am Schnellsten und da insbesondere der Websocketclient bis zuletzt Probleme verursachte, war eine Optimierung des Codes bezüglich der Speicherzugriffe bzw. eine noch stärker parallelisierte Version nicht mehr vorgesehen.

4 JavaScript Client

4.1 Verwendete Technologie

Die eigentliche Berechnung der Mandelbrotmenge erfolgt im Javascript Client nicht durch JavaScript selbst, sondern durch WebAssembly, ein Format binärer Anweisungen für Stack-basierte virtuelle Maschinen. Als Ziel der portablen Kompilierung höherer Programmiersprachen ermöglicht es den Einsatz dieser in Webanwendungen. Auf dieses Projekt bezogen bedeutet das also, dass die Mandelbrotmenge in einer Funktion berechnet wird, die ursprünglich in C++ geschrieben wurde, jedoch im Browser ausgeführt werden kann, was wiederum zu einer schnelleren Ausführung als unter einer Berechnung in JavaScript selbst führt. Dazu muss die Datei „mandelbrot.cpp“, welche die benötigte Funktion „plot“ beinhaltet, in das WebAssembly-Format übersetzt werden. Zu diesem Zweck wird das online Tool „WebAssembly Explorer“ verwendet, welches die C++ Datei zunächst in das .wat-Textformat kompiliert und schließlich in die benötigte .wasm-Datei im Byteformat konvertiert.

Der damit gewonnene WebAssembly-Code wird im Client daraufhin über die fetch-API geladen und kompiliert. Anschließend wird eine ausführbare Instanz aus dem geladenen WebAssembly-Modul erstellt, aus der die Funktion „plot“ mit den benötigten Parametern in eine JavaScript-Variable exportiert werden kann. Diese Variable beinhaltet also die Instanz mit der exportierten Funktion, die von nun an durch JavaScript im Browser ausgeführt werden kann. Der Rest des Clients läuft auf Basis von JavaScript, was dementsprechend den Verbindungsaufbau mit dem Server sowie die Kommunikation mit diesem beinhaltet. Für diesen Zweck folgt der Client dem WebSocket-Protokoll, ein auf TCP basierendes Netzwerkprotokoll, welches eine Vollduplex-Verbindung zwischen dem Client und dem Server, welcher ebenfalls das WebSocket-Protokoll erfüllen muss, ermöglicht.

Zu Beginn der Verbindung müssen Client und Server einen sogenannten Handshake durchführen. Dazu sendet der Client eine Anfrage an den Server, die Verbindung zu einer WebSocket-Verbindung zu erweitern. Eine solche Anfrage sieht beispielsweise folgendermaßen aus:

```
GET / HTTP/1.1
Host: 169.254.108.186:5000
Accept: */*
Accept-Language: de,en-US;q=0.7,en;q=0.3
Accept-Encoding: gzip, deflate
Sec-WebSocket-Version: 13
```

Sec-WebSocket-Extensions: permessage-deflate
Sec-WebSocket-Key: gc4QSLz27bBKbb9AG28/Yg==
Connection: keep-alive, Upgrade
Upgrade: websocket

Die wichtigsten Bestandteile dieser Anfrage sind der zufällig generierte Sec-WebSocket-Key und die Forderung, auf das WebSocket-Protokoll umzusteigen. Erreicht die Anfrage nun den Server, muss dieser eine Antwort in einem festgelegten Format versenden. Dafür liest der Server den Sec-WebSocket-Key aus der Anfrage und fügt den Globally Unique Identifier 258EFAF5-E914-47DA-95CA-C5AB0DC85B11 an diesen an. Aus dem dabei entstandene Schlüssel wird daraufhin der SHA-1 Hash berechnet, welcher anschließend Base64-codiert wird. Der resultierende String wird daraufhin dem Sec-WebSocket-Accept Header hinzugefügt, wodurch die Antwort des Servers beispielsweise so aussehen würde:

HTTP/1.1 101 Switching Protocols
Connection: Upgrade
Upgrade: websocket
Sec-WebSocket-Accept: YzNjMGJlYjBmMDRjZDFmZGE5NGI1ZjgwNGU3NDAxZjc4N2RjZThmNA==

Mit Versand dieser Antwort ist eine Verbindung zwischen Client und Server aufgebaut und der eigentliche Datenaustausch kann beginnen. Die Nachrichten, die zwischen Client und Server verschickt werden, sind jedoch codiert und müssen vom Server vor dem Lesen und Schreiben entsprechend decodiert, beziehungsweise codiert werden. Von besonderer Bedeutung sind bei dieser Codierung die Bits, die die Länge der Nutzdaten angeben, der Markierungsschlüssel und die Bits, die die Nutzdaten selbst beinhalten.

Um die Länge der Nachricht zu ermitteln, liest der Server die Bits 9-15 und interpretiert diese als unsigned integer. Ist diese Zahl kleiner gleich 125, so ist sie die Länge der Nachricht. Ist sie 126, so müssen die nächsten 16 Bit als unsigned integer interpretiert werden, um die Länge zu ermitteln, und ist sie 127, so sind es die nächsten 64 Bit. Auf die Länge folgen nun 32 Bit, in denen sich der Maskierungsschlüssel befindet. Anhand dieser Informationen kann die Nachricht nun decodiert werden, indem Byte für Byte durch die codierte Nachricht iteriert und auf diese den XOR-Operator mit dem Byte des Maskierungsschlüssel an der Stelle ($i\%4$) angewendet wird. Analog zu diesem Verfahren codiert der Server Nachrichten, bevor er sie an den Client verschickt, und er somit das WebSocket-Protokoll vollständig umsetzt, wodurch eine Kommunikation mit WebSocket-Clients möglich ist.

4.2 Bedienungsanleitung

4.2.1 Vorbereitung des Browsers

Da es im Browser zu einem Cross-Origin Ressource Sharing (CORS) Error führen kann, wenn der JavaScript Client versucht, das WebAssembly-Modul zu laden, müssen zu dessen Ausführung Einstellungen geändert werden. Getestet wurde der Client in dem Browser Mozilla Firefox, in dem folgende Schritte durchgeführt werden müssen:

1. In die Suchleiste des Browsers „about:config“ eingeben und bestätigen.
2. Den Knopf „Risiko akzeptieren und fortfahren“ anklicken.
3. In die Suchleiste „origin“ eingeben.
4. Den Eintrag „privacy.file_unique_origin“ von true auf false setzen.
5. Den Browser schließen und neustarten.

Da hiermit Einstellungen verändert werden, empfiehlt es sich, nach Beenden der Berechnung diese wieder zu reversieren.

4.2.2 Verwendung des Clients

1. Sicherstellen, dass die Dateien „js_client.html“ und „mandelbrot.wasm“ im selben Verzeichnis liegen.
2. Den Server starten und die auf der Konsole ausgegebene IP und den Port kopieren.
3. Die Datei „js_client.html“ mit einem Textbearbeitungsprogramm öffnen, die Variablen „ip“ und „port“ in den Zeilen 25 und 26 anpassen und die Datei speichern.
4. Die Datei „js_client.html“ im Browser öffnen.
5. Gegebenenfalls die Konsole öffnen und überprüfen, ob der Client Aufträge entgegen genommen hat. Wenn nicht, die Seite neu laden, bis Aufträge erfolgreich entgegen genommen werden, und die Konsole schließen.

4.3 Entwicklung und Probleme

Als erster Schritt, um die Funktionsweise von WebAssembly besser nachvollziehen zu können, entsteht zunächst ein kurzes Programm in C++, welches die Fakultät einer übergebenen Zahl berechnet und in den Client eingebunden wird.

Über Konsoleneingaben und -ausgaben wird die Funktionalität erfolgreich getestet. Da die spätere Einbindung einer Funktion, die die Mandelbrotmenge berechnen soll, analog geschehen würde, ist die Verbindung zwischen Server und Client der nächste Schritt in der Entwicklung.

Der erste Punkt, der sich jedoch als Problem herausstellt, ist die Tatsache, dass normale TCP Sockets, wie sie beispielsweise in dem Client unter Android oder CUDA verwendet werden, mit JavaScript nicht kompatibel sind. Daher muss eine Verbindung

unter den oben genannten WebSocket geschehen, einer Technologie, in die sich ebenfalls zuerst eingelesen werden musste. Da am Anfang noch kein gemeinsamer Server besteht, auf den alle drei verschiedenen Arten von Clients zugreifen können, erfolgt der erste Verbindungstest mit einem kleinen Testserver, der in Node.js geschrieben ist. Die Wahl fällt dabei auf Node.js, da der Server somit genau wie der Client in JavaScript geschrieben werden kann und somit ohne Einbindung externer Bibliotheken von sich aus das WebSocket-Protokoll unterstützt. Zu Testzwecken werden Zahlen vom Testserver an den Client geschickt, der aus diesen mithilfe des eingebundenen WebAssembly-Moduls die Fakultät berechnet und sie daraufhin an den Server zurück sendet. Damit ist sichergestellt, dass der Client sich sowohl mit einem WebSocket-kompatiblen Server verbinden kann als auch Daten von diesem empfangen, die Daten per WebAssembly-Funktionen verarbeiten und sie an den Server zurück schicken kann.

Im nächsten Schritt beginnt die Entwicklung des eigentlichen Servers für das Projekt, für den sich auf Java als Programmiersprache geeinigt wurde. Da Java von sich aus WebSocket-Verbindungen nicht ohne weiteres unterstützt, wurde zunächst nach einer Bibliothek oder API für Java gesucht, die eine solche Verbindung ermöglichen könnte. Allerdings existieren lediglich APIs, die die Verwendung von Jakarta EE voraussetzen, weswegen die manuelle Umsetzung des WebSocket-Protokolls für den gemeinsamen Server, der in der Java Platform, Standard Edition geschrieben ist, von Nöten ist.

Um die Verbindung zwischen WebSocket-Client und Server überhaupt erst ermöglichen zu können, muss der Server in der Lage sein, eine eingehende Anfrage für einen Handshake zu erkennen und daraus die Verbindung zu genau diesem Client, der die Anfrage geschickt hat, zu einer WebSocket-Verbindung zu erweitern. Zwar erweist sich der eigentliche Vorgang des Handshakes und der Antwort auf diesen als relativ unkompliziert, so führt es aber zu einem Problem, wenn die Art des sich zu verbindenden Clients nicht vor Ausführung des Handshakes ermittelt wird. So wird bei erfolgreicher Ausführung des Handshakes zwar eine erfolgreiche Verbindung zwischen dem Server und dem auf WebSockets basierendem Client aufgebaut, erfolgt der Handshake allerdings bedingungslos für jeden Client, so sind die Clients, die auf regulären TCP-Sockets basieren, daraufhin nicht mehr in der Lage, Nachrichten mit dem Server auszutauschen. Eine Erkennung des Client-Typen ist also zwingend erforderlich.

Die erste Idee ist es, dass jeder Client nach Aufbau der Verbindung als erste Nachricht seinen eigenen Typen an den Server sendet. So soll nur im Fall der Nachricht „type/.WebSocket“ der Handshake und damit die Aufwertung auf eine WebSocket-Verbindung erfolgen, die anderen beiden Typen von Clients bleiben damit also unberührt. Diese Umsetzung scheitert an der Tatsache, dass ein WebSocket-Client keine Nachrichten mit dem Server austauscht, ehe der Handshake getätigt wurde. Die erste Nachricht, die der Server von einem WebSocket-Client erhält, ist also „GET / HTTP/1.1“, die erste Zeile der Handshake-Anfrage. Stattdessen überprüft der Server daher, ob ein Client eine Nachricht gesendet hat, die auf „type“ beginnt und falls nicht, werden die restlichen Zeilen der Handshake-Anfrage eingelesen, an die erste Zeile gegangen und der Handshake erfolgreich durchgeführt. Ab diesem Punkt sind sowohl TCP-basierte Clients als auch WebSocket-Clients in der Lage, eine Verbindung zum Server aufzubauen.

Mit einer erfolgreichen Verbindung zum Server kann der Client nun beginnen, Nach-

richten an den Server zu schicken. Mit der ersten verschickten Nachricht offenbart sich bereits aber das nächste Problem. Die vermeintlichen Nachrichten vom Client, die der Server ausgibt, bestehen vollständig aus Unicode Ersetzungszeichen. Da sämtliche Nachrichten, die der WebSocket-Client nach Abschluss des Handshakes an den Server sendet, codiert sind, genügt es demnach nicht, auf Seite des Servers den InputStream zu lesen und die dort eingehenden Zeichen als einen vollständigen String zu interpretieren.

Stattdessen handelt es sich um Bytes, die nach oben genannter Vorgehensweise decodiert werden müssen. Der Server liest die Länge der Nachricht und den Maskierungsschlüssel aus den Bytes und verwendet diese Informationen, um aus den darauf folgenden Bytes die eigentliche Nachricht zu decodieren. Die erste Implementierung berücksichtigt zunächst keine Nachrichten, die über mehrere Lesevorgänge verteilt sind, was bei langen Nachrichten zu Problemen führt, da sie zum Teil nicht vollständig decodiert werden und es zu Formatierungsfehlern kommt, wenn diese zum Beispiel in einen int-Wert konvertiert werden sollen. Zu diesem Zweck überprüft der Server, ob die Zahl der gelesenen Bytes tatsächlich denen der vorgesehen Länge entsprechen und falls nicht, wird im nächsten Lesevorgang die Nachricht an entsprechender Stelle erweitert. Dennoch werden nicht unter allen Umständen sämtliche Nachrichten korrekt gelesen. Unter einer hohen Anzahl an eingehenden Nachrichten geschieht es, dass einige von ihnen als leerer String interpretiert werden.

Aufgrund der Notwendigkeit der Codierung unter WebSockets tritt beim Verschicken von Nachrichten vom Server zum Client ein sehr ähnliches Problem auf. Anstatt nicht entzifferbarer Ersetzungszeichen erreichen den Client jedoch gar keine Nachrichten. Demensprechend müssen die Nachrichten, die der Server an den Client schickt, zuvor ebenfalls codiert werden. Nach einer Codierung als Byte-Array gemäß dem WebSocket-Protokoll, können die Nachrichten durch einen DataOutputStream an den Client verschickt werden. Die Art des OutputStreams ist daher von Bedeutung, da unter Verwendung eines gewöhnlichen OutputStreams keine Nachrichten vom Client erkannt werden, als seien sie nicht codiert worden.

Mit der funktionierenden Kommunikation zwischen Server und Client kann der Server nun Aufträge an den WebSocket-Client versenden und unter Verwendung von WebAssembly das Ergebnis der Mandelbrotmenge für diese Aufträge errechnen und zurücksenden. Da in sämtlichen dieser Schritte Strings verarbeitet werden und der Umgang mit diesen grundsätzlich langsamer ist als das Verschicken und Verarbeiten von Byte-Arrays, erfolgt ein Versuch, die Aufträge als Byte-Arrays zu übergeben. Dieser Versuch scheitert an zwei Problemen: Sämtliche Nachrichten werden bereits als Byte-Arrays verschickt, die Codierung ist aber auf Strings als Ergebnis ausgedacht, sodass der Client von den Aufträgen fast ausschließlich Ersetzungszeichen erhält. Zudem kommt es zu einem Verbindungsabbruch von Seiten des Clients, auf den der Server aber nicht reagiert. Das führt zu einem SocketWriteError, da nur einseitig die Verbindung getrennt wird und der Server versucht, über einen nicht mehr belegten Socket wiederholt „noTask“-Nachrichten zu versenden. Aufgrund dieser Probleme verarbeiten sowohl Client als auch Server weiterhin Strings, auch wenn das einen potenziellen Zeitverlust bedeutet.

Die Einbindung eines funktionierenden WebAssembly-Moduls zur Berechnung der Mandelbrotmenge erweist sich als unproblematisch, jedoch zeigen sich bei der Art und

Weise, wie die berechneten Ergebnisse an den Server gesendet werden, weitere Probleme. So verschickt der Client in der ersten Version für jeden abgearbeiteten Bildpunkt eine „plot“-Nachricht, um den Server darauf hinzuweisen, dass als nächstes die errechneten Werte folgen, in drei separaten Nachrichten den x-Wert, den y-Wert und den errechneten Iterationswert und anschließend an die vollständige Berechnung des Auftrags jeweils eine „tick“-Nachricht, um den Server aufzufordern, das Bild zu rendern, und eine „task“-Nachricht, um den nächsten Auftrag anzufordern. Bei einer Bildbreite von 500 Pixeln ergibt das also 2002 Nachrichten pro berechneten Auftrag.

Da der Server diese Anzahl an Nachrichten nicht korrekt decodieren kann, ist die zuvor genannte Anpassung, dass Nachrichten über mehrere Lesevorgänge eingelesen werden müssen notwendig. Zwar werden mit dieser Variante keine falschen Zeichen mehr ausgegeben, jedoch werden Nachrichten zufällig als leerer String interpretiert, was einen Informationsverlust bedeutet, der zu schwarzen Flecken auf der gerenderten Mandelbrotmenge führt.

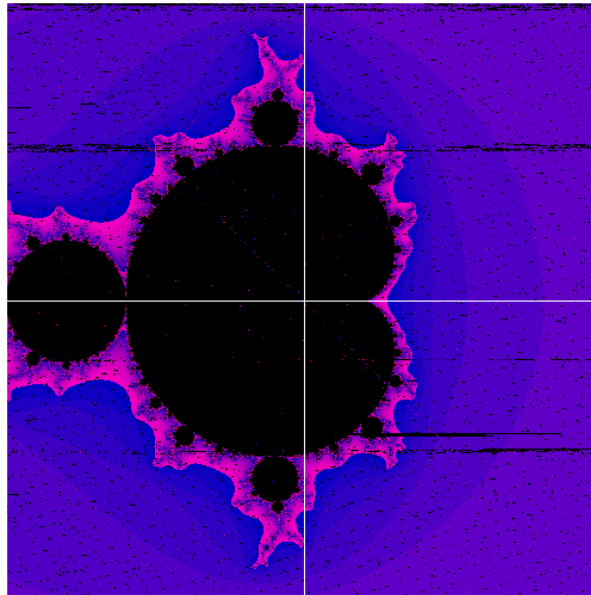


Abb. 13: Mandelbrotmenge bei separatem Versand jedes einzelnen Wertes

Um überhaupt das Bild rendern zu können, werden leere Nachrichten ignoriert und stattdessen versucht, mithilfe von vorhandenen Informationen wie dem fortlaufenden x-Wert oder dem y-Wert der berechneten Werte, der sich bei einem Auftrag nicht mehr ändert, diese zu rekonstruieren. Der verlorene Iterationswert hingegen kann aus diesen Daten nicht erfasst werden und soll durch den zuvor berechneten Iterationswert ersetzt werden. Da es sich dabei also nicht für jeden Punkt um den korrekt berechneten Iterationswert handelt, ist das entstehende Bild lediglich eine Approximation der Mandelbrotmenge. Dennoch entstehen eine Vielzahl an schwarzen Flecken auf der Graphik sowie falsch gesetzte Ersatzpixel. Das ist damit zu erklären, dass es nicht garantiert ist, dass auf eine verlorene Nachricht wieder eine korrekt erfasste Nachricht folgt. Somit können

mehrere Nachrichten hintereinander verloren gehen, worauf dieser Ausgleichmechanismus nicht ausgelegt ist.

Ebenfalls erweist sich die Zeiterfassung für diese Methode der Datenübertragung als schwer. Der Client beendet seine Berechnung scheinbar wahllos und muss neu gestartet werden, um weiterhin Bildpunkte zu berechnen. Erst mit einer Konsolenausgabe, dass ein Auftrag fertig berechnet wurde, zeigt sich, dass der Client immer nach Beenden eines Auftrages anhält und keine weiteren Aufträge mehr erhält. Das lässt sich damit erklären, dass auch die Nachricht, mit der der Client neue Aufträge anfordert, vom Server als leerer String interpretiert werden kann und die Berechnung somit zum Halt kommt. Lädt man den Client neu, sobald er aufhört, Punkte zu berechnen, dauert die gesamte Darstellung der Mandelbrotmenge lokal ca. 4 Minuten; ein Wert der aufgrund des wiederholten, manuellen Ladens des Clients ungenau ist.

Der Versuch, sämtliche berechneten Punkte durch Zeilenumbrüche getrennt in einer Nachricht zu verschicken, scheitert daran, dass die Nachricht zwar korrekt vom Server gelesen wird, jedoch in der Funktion, in die der String übergeben wird, als null-String ausgegeben wird. Daher ist der nächste Schritt, diese Zeilen einzeln zu versenden. So werden x-Wert, y-Wert und die berechnete Iteration eines jeden Bildpunkts jeweils mit einem Trennzeichen zwischen aneinander gekettet und verschickt.

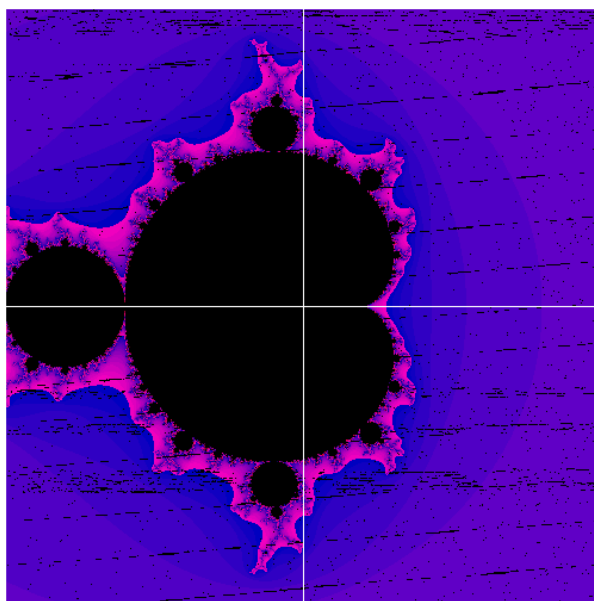


Abb. 14: Mandelbrotmenge bei separatem Versand jedes einzelnen Punkts

Da auch auf die „plot“-Nachricht vor dem Versenden der Ergebnisse verzichtet werden kann, reduziert sich die Anzahl der Nachrichten damit bei einer Bildbreite von 500 Pixeln also von 2002 Nachrichten auf 502 Nachrichten.

Doch auch bei dieser Variante werden Nachrichten vom Server als leere Strings interpretiert und schwarze Punkte auf der Graphik gesetzt. Erneut erweist sich die Zeiterfassung als schwierig, da die Auftragsanfrage ebenfalls vom Server fehlinterpretiert werden kann, wenn auch seltener als in der zuvor verwendeten Version. Mit diesem ungenauen,

manuellen Wiederverbinden des Clients einbegriffen dauert die Darstellung der Mandelbrotmenge bei dieser Variante lokal ca. 70 Sekunden, was im Vergleich zu der ersten Variante einen Geschwindigkeitsgewinn darstellt. Ebenfalls lässt sich eine gewisse Regelmäßigkeit im Vergleich zu den schwarzen Punkten der ersten Variante feststellen. So scheinen die schwarzen Punkte beim zeilenweisen Versenden der Ergebnisse diagonale Linien auf der Graphik zu ziehen. Die irregulären Anhäufungen von schwarzen Punkten geschehen hingegen immer dann, wenn der Client neugeladen werden muss.

Da der Server mit 502 Nachrichten pro Auftrag noch nicht in der Lage ist, sämtliche eingehende Nachrichten korrekt zu decodieren, gleichzeitig aber auch keine 500 Zeilenumbrüche in einem String verarbeiten kann, werden die Ergebnisse in der finalen Version alle in einem String pro Auftrag verschickt. Das reduziert die Anzahl der versendeten Nachrichten pro Auftrag unabhängig von der Bildbreite auf 3: eine „plot“-Nachricht, die Ergebnisse und eine Aufforderung, das Bild zu rendern. Um zu verhindern, dass keine Aufträge mehr verschickt werden und die Berechnung anhält, verschickt der Server nun selbstständig einen neuen Auftrag an den Client, sobald dieser einen abgearbeitet hat. Auf diese Weise werden keine Nachrichten mehr als leere Strings interpretiert und somit die Mandelbrotmenge vollständig angezeigt. Lokal berechnet dauert das Darstellen der Startkonfiguration in der finalen Variante bei den Maßen 500 x 500 durchschnittlich 2.4 Sekunden.

Doch auch in der finalen Variante kann es dazu kommen, dass Nachrichten vom Server als fehlerhafte Zeichen interpretiert werden, was zu einer `NullPointerException` führt. In diesem Fall wird der Auftrag, für den die Ergebnisse erwartet werden, zurück in die Liste der Aufträge geschrieben und ein neuer Auftrag an den Client vergeben. Wenn jedoch mehrere Nachrichten und damit mehrere Reihen hintereinander vom Server als eine einzige Nachricht fehlinterpretiert werden und damit nur der erste Auftrag zurück in die Liste geschrieben wird, können vollständige Reihen in der Graphik verloren gehen. Während dieser Fehler bei der lokalen Verwendung des Clients bei den Standardmaßen extrem selten ist, wird er bei großer Breite des Bildes häufiger und tritt bei der Verbindung zu einem nicht-lokalen Server stets auf.

Die anfängliche Erwartung, dass die Integration von WebAssembly der komplizierteste Aspekt der Entwicklung des JavaScript Clients ist, erfüllt sich nicht. Diese läuft ohne Komplikationen ab und WebAssembly erweist sich als unkompliziert und verlässlich. Stattdessen ist es die Kommunikation zwischen Server und Client, die unter JavaScript deutlich mehr Probleme verursacht. Es muss nicht nur das WebSocket-Protokoll eigenhändig umgesetzt werden, sondern es treten dennoch zusätzlich einige Fehler in der Kommunikation auf, sodass Nachrichten fehlinterpretiert werden und berechnete Informationen verloren gehen. Daher empfiehlt eine Berechnung unter JavaScript bzw. WebAssembly nur, wenn für den Server eine Plattform gewählt wird, die das WebSocket-Protokoll unterstützt, ohne dass die Kodierung und Dekodierung einer manuellen Umsetzung bedürfen.

5 Server

5.1 Funktionsweise

Bei der ersten Version des Servers wurden jedem Client die Größe des Panels, welches die Mandelbrotmenge darstellt, der Iterations-Wert sowie eine für jeden Client einmalige Nummer zugewiesen. Mit diesen Kennwerten hat jetzt jeder Client einen gleichgroßen Bereich der Mandelbrotmenge berechnet. Dies wurde mit dem Wechsel zu Server Version 2.0 abgeändert. Jetzt fragt jeder Client einen Auftrag an. Mit einem solchen Auftrag erhält der Client den y-Wert, also welche Zeile er berechnet soll, den xMove- und yMove-Wert, diese geben an wie weit sich die Mandelbrotmenge bewegt hat, den zoom-Wert, dieser gibt an wie Tief hineingezoomt wurde und den aktuellen Iterations-Wert. Dies hat zur Folge, dass jetzt kein Client mehr einen bestimmten Bereich der Mandelbrotmenge berechnet, sondern nur eine Zeile pro erhaltener Nachricht.

Server Version 2.0 stellt die UI mittels Swing dar und die Server-Client-Kommunikation wird abhängig vom Clienttypen mithilfe von TCP bzw. des WebSocket-Protokolls realisiert, also genauso wie es bei der ersten Version war. Die Abfrage nach dem Clienttypen wurde ebenfalls nicht geändert.

Wenn sich ein Client mit dem Server verbindet, dann wird mithilfe der ersten Nachricht ermittelt um welchen Clienttypen es sich handelt und dann der entsprechende Thread gestartet. Nun kann ein Rechenauftrag vom Server angefordert und dieser vom Client berechnet werden. Sollte die Verbindung zum Client unterbrochen werden bevor das Ergebnis des Auftrags an den Server geschickt wird, dann wird dieser Auftrag an das Ende der Aufgabenliste, welche alle verbleibenden Aufgaben enthält, angefügt und kann somit von einem anderem Client angefordert und berechnet werden.

5.2 UI-Erklärung

Bevor der Server gestartet wird, wird der User gefragt, welche Auflösung das Mandelbrotpanel haben soll. Wenn für Breite und Höhe gültige Werte (>0) eingegeben werden, startet der Server. Wenn er gestartet wird und der Port bereits belegt oder benutzt ist, dann öffnet sich ein JOptionPane und fragt den Nutzer, ob der Server neu gestartet oder ob der Vorgang beendet werden soll. Nachdem der Server erfolgreich gestartet wurde, öffnet sich die UI und die Komponenten sind zu sehen.

Auf der schwarzen Fläche auf der linken Seite der UI wird die berechnete Mandelbrotmenge dargestellt. Das weiße Kreuz dient dazu, die Stelle in die hineingezoomt wird, zu zentrieren.

Auf der rechten Seite sind die Anzahl an verbundenen Clients sowie den aktuellen Iterations-Wert einsehbar. Des Weiteren wird angezeigt, wie hoch die Anzahl der Clients der verschiedenen Typen ist.

Am unteren Rand sind die Buttons zur Navigation zu finden. Diese führen genau das aus, was auf ihnen steht. Der Restart-Button sorgt dafür, dass alle Variablen auf die Default-Werte zurückgesetzt werden und das Startbild berechnet wird. Zoom-In bzw. Zoom-Out zoomt das Bild um einen bestimmten Faktor herein- bzw. hinaus. Left, Up,

Down, Right bewegen das Kreuz in die entsprechende Richtung um einen entsprechenden Faktor über das Bild. Zusätzlich kann mithilfe der Tastatur herein- (Plustaste), hinausgezoomt (Minustaste) werden und mit den entsprechenden Pfeiltasten kann das Kreuz nach links, rechts, oben und unten bewegt werden. Außerdem kann mithilfe der Escapetaste die Berechnung neugestartet und mit dem Mausekranz herein- bzw. hinausgezoomt werden.

Der Nutzer hat außerdem die Möglichkeit, mithilfe der Maus ein Rechteck über einen bestimmten Bereich zu ziehen, um in diesen hineinzuzoomen. Dabei hilft dem Nutzer ein kleines Kreuz in der Mitte des Rechtecks, um den gewünschten Bereich zu zentrieren. Um das Rechteck zu zeichnen, muss der Nutzer die linke Maustaste klicken und gedrückt halten. Wenn diese losgelassen wird, dann wird in das Bild hineingezoomt und neu berechnet. Falls das Rechteck an der falschen Stelle angesetzt wurde, kann die rechte Maustaste geklickt werden und der Vorgang wird abgebrochen.

6 Reflexion

Ziel dieses Praktikums im Großen Studienprojekt war es, ein verteiltes System zur performanten Berechnung der Mandelbrotmenge zu entwickeln und diese zu visualisieren. Zwecks dessen wurden ein Server, der Rechenaufträge verteilt, sowie Clients, die unter Verwendung verschiedener Technologien diese Rechenaufträge annehmen und berechnen, programmiert. Während sich die Visualisierung der Mandelbrotmenge als unkompliziert erwies, ist der Faktor der Performanz deutlich hinter den Erwartungen zurück geblieben. Aufgrund der Einschränkungen durch die Pandemie konnte das verteilte System immer nur lokal getestet werden. Die Rechenleistung der Clients entsprang demnach stets nur einem System. Ein Hosten über das Internet war nicht möglich. Ein Hosten des Servers über eine Remote-Verbindung auf einem Rechner des Universitätsnetzwerks und eine anschließende Verbindung der Clients über VPN erzeugte einen massiven Overhead, dessen Gründe nicht bekannt sind, wodurch die Latenz zur Darstellung eines Bildes in den Minutenbereich anstieg.

Auch lokal verursachte die TCP-Verbindung einen kleinen Overhead. Die Berechnungsdauer der Mandelbrotmenge im Bereich der 64 Bit double-precision ist aber niedriger als der erzeugte Overhead, sodass es im Nachhinein betrachtet nicht sinnvoll erscheint, ein verteiltes System für diese Genauigkeit zu verwenden. Falls dieses Projekt erneut angeboten werden sollte, würde es sich empfehlen, mathematische Bibliotheken zu verwenden, die eine Berechnung über die 64 Bit double-precision ermöglichen, da dort erst die rechenintensive Berechnungen verursacht durch hohe Iterationszahlen entstehen. Hinzu kommen die Erkenntnisse, dass die manuelle Umsetzung des WebSocket-Protokolls zu fehlerhafter Kommunikation mit dem entsprechenden Client führen kann und dass CUDA [].

Die Arbeit auf Distanz erwies sich als besondere Herausforderung. Da nicht jedes Gruppenmitglied über die benötigte Hardware verfügt, um den CUDA Client ausführen zu können, fiel ein Testen dessen schwer. Ein solches Problem hätte umgangen werden können, wäre der Zugang zu den Rechnern an der Universität möglich gewesen. Das An-

legen und Verwenden des gemeinsamen GitHub Repositorys fiel zu Beginn des Projekts noch schwer, jedoch nahmen die anfänglichen Probleme mit voranschreitender Zeit des Projekts ab, sodass sich GitHub als Versionskontrolle für das Projekt als nützlich erwies.