Untersuchung der Skalierbarkeit von parallelem Sortieren auf einem Multicore-Prozessor

Bachelorarbeit

Studiengang: Informatik

Bearbeiter: Leon Zoerner

10. Dezember 2025

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ziel dieser Arbeit ist es, die Grenzen von Threads und Parallelisierung aufzuzeigen. Dabei soll insbesondere untersucht werden, wie groß der Overhead durch Threads ist und welchen Performanceunterschied es macht, bereits initialisierte Workerthreads zu verwenden, im Vergleich zur Erstellung neuer Threads. Da sich für diese Untersuchungen ein geeigneter, leicht verständlicher und programmierbarer Anwendungsfall anbietet, habe ich mich für Sortieralgorithmen entschieden, die sich zudem sehr gut parallelisieren lassen.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

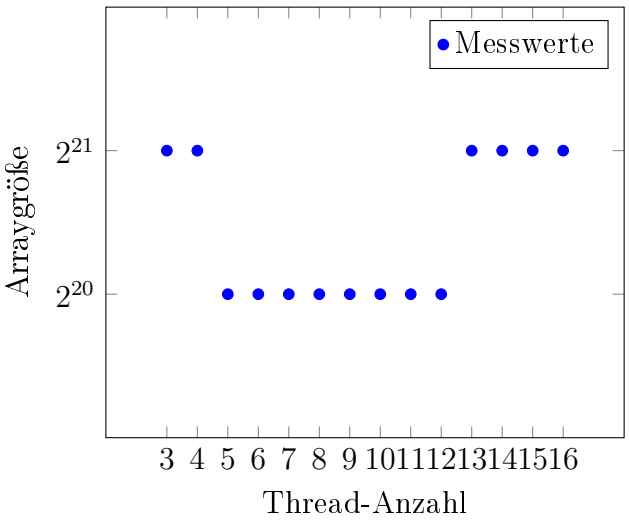
Ziel dieser Bachelorarbeit ist die systematische Analyse der Laufzeitentwicklung paralleler Sortierverfahren. Dabei soll untersucht werden, wie sich parallele Implementierungen von Quicksort und Mergesort im Vergleich zu ihren sequentiellen Varianten verhalten. Im Fokus stehen insbesondere folgende Punkte:

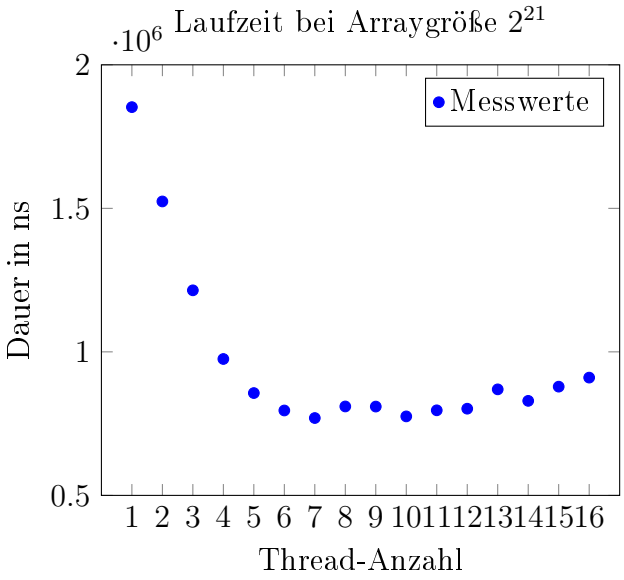
- der Einfluss verschiedener Threadingstrategien auf die Laufzeit,
- die Frage, ab welcher Eingangsgröße und bei welcher Anzahl von Threads ein messbarer Geschwindigkeitsvorteil entsteht,
- sowie die Identifikation von Thread-Management-Techniken, die für Sortieralgorithmen die besten Laufzeiten erzielen.

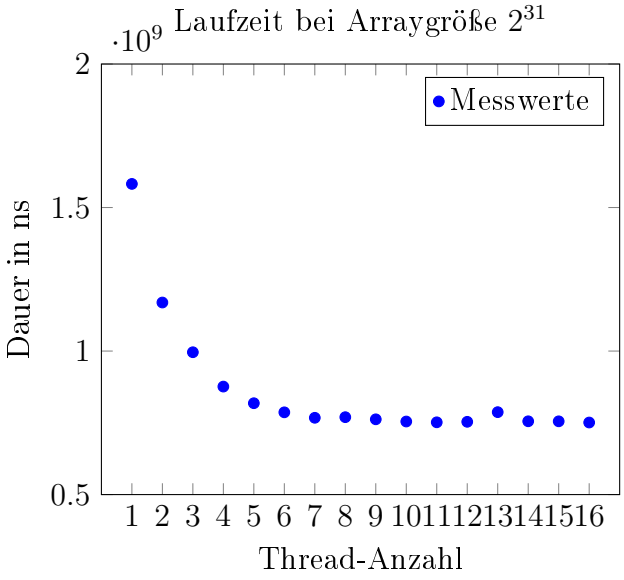
Aus diesen Aspekten ergibt sich die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit:
Unter welchen Bedingungen liefern parallele Sortieralgorithmen anhand von Quicksort und Mergesort einen signifikanten Laufzeitvorteil gegenüber der sequentiellen Ausführung, und welche Threadingstrategien führen dabei zur besten Laufzeit?

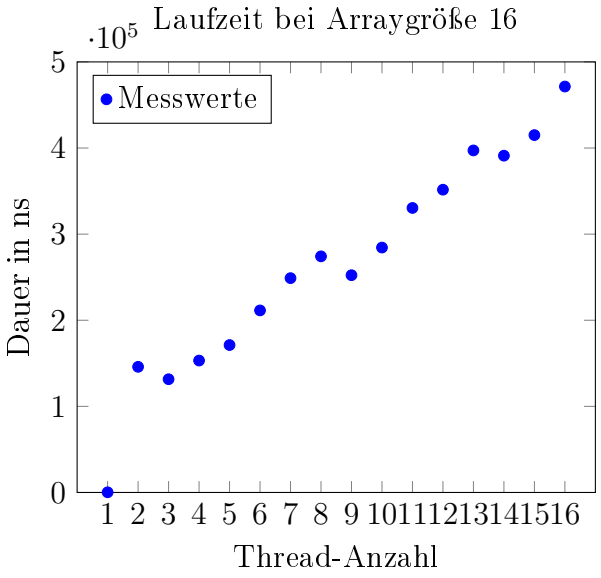
1.3 Threading anhand des einfachen Beispiels Inkrement-Array erklärt

Zeitpunkt der 50% Geschwindigkeitssteigerung (incAray)




Laufzeit bei Arraygröße 2^{21}
$\cdot 10^6$
2
1.5
1
0.5
Dauer in ns
Messwerte
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
Thread-Anzahl


Laufzeit bei Arraygröße 2^{31}
$\cdot 10^9$
2
1.5
1
0.5
Dauer in ns
Messwerte
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
Thread-Anzahl


Laufzeit bei Arraygröße 16
$\cdot 10^5$
5
4
3
2
1
0
Dauer in ns
Messwerte
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
Thread-Anzahl

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Sortieralgorithmen: Quicksort und Mergesort

2.2 Grundlagen der Parallelisierung

2.3 Thread-Modelle, Overheads und Skalierungsgrenzen

3 Methodik und Versuchsaufbau

3.1 Messumgebung und Hardware

3.2 Implementierungsvarianten

3.3 Messmethodik

4 Ergebnisse und Analyse

4.1 Grundlegende Laufzeiten abhängig von der Arraygröße

4.1.1 Messziel

4.1.2 Erwartung

4.1.3 Diagramm

4.1.4 Analyse und Interpretation

4.2 Einfluss des Listentyps

4.2.1 Messziel

4.2.2 Erwartung

4.2.3 Diagramm

4.2.4 Analyse und Interpretation

4.3 Einfluss der Arraygröße im Detail

4.3.1 Messziel

4.3.2 Erwartung

4.3.3 Diagramm

4.3.4 Analyse und Interpretation

4.4 Tiefenbasierte Thread-Erzeugung

4.4.1 Messziel

4.4.2 Erwartung

4.4.3 Diagramm

4.4.4 Analyse und Interpretation

4.5 Workerthreads

4.5.1 Messziel

4.5.2 Erwartung

4.5.3 Diagramm

4.5.4 Analyse und Interpretation

4.6 Vergleich der Threading-Methoden

4.6.1 Messziel

4.6.2 Erwartung

4.6.3 Diagramm

4.6.4 Analyse und Interpretation

4.7 Einfluss des Datentyps der Liste

4.7.1 Messziel

4.7.2 Erwartung

4.7.3 Diagramm

4.7.4 Analyse und Interpretation

5 Diskussion und Fazit

5.1 Interpretation aller Ergebnisse

5.2 Beantwortung der Forschungsfrage

5.3 Zusammenfassung

6 Anhang

6.1 Hardware-Spezifikationen

Zur besseren Einordnung der Leistungsfähigkeit der verwendeten Hardware befindet sich unter folgendem Link ein Benchmark:
https://www.userbenchmark.com/UserRun/70984567
Ich liste aber jetzt hier auch nochmal die relevanten Hardwarekomponenten auf.
CPU: AMD Ryzen 7 5800X, 8C/16T, 3.80-4.70GHz
CPU Kühler: be quiet! Dark Rock Pro 4)
RAM: G.Skill Aegis UDIMM 16GB Kit, DDR4-3200, CL16-18-18-38 (2 Kits, insgesamt 4x8 GB = 32 GB)
Betriebssystem: Windows 10 Version 22H2

6.2 Code

Der gesamte Quellcode dieser Arbeit ist öffentlich unter folgendem Link verfügbar:
https://github.com/Leon333M/Sortierverfahren

Listing 1: Quicksort

```cpp
// Quicksort.cpp
#include "Quicksort.h"
#include "WorkerPool.h"
#include <chrono>
#include <thread>
#include <vector>

Quicksort::Quicksort() {};

void Quicksort::sortG(int *liste, int lange) {
    int links = 0;
    int rechts = lange - 1;
    quicksort(liste, links, rechts);
};

void Quicksort::sortM(int *liste, int lange, int messEbene) {
    int links = 0;
    int rechts = lange - 1;
    quicksort(liste, links, rechts, 1, messEbene);
};

void Quicksort::sortP(int *liste, int lange, int
   neueThreadsBisEbene) {
    int links = 0;
    int rechts = lange - 1;
    // int neueThreadsBisEbene = static_cast<int>(std::ceil(
       std::log2(static_cast<double>(anzahlThreads) + 1.0)));
    quicksortP(liste, links, rechts, 1, neueThreadsBisEbene);
};

```

```
29 void Quicksort::sortPM(int *liste, int lange, int
       neueThreadsBisEbene, int messEbene) {
30     int links = 0;
31     int rechts = lange - 1;
32     quicksortP(liste, links, rechts, 1, neueThreadsBisEbene,
           messEbene);
33 };
34
35 void Quicksort::sortW(int *liste, const int lange, const int
       workerThreads) {
36     int links = 0;
37     int rechts = lange - 1;
38     quicksortW(liste, links, rechts, workerThreads);
39 };
40
41 void Quicksort::quicksort(int *liste, const int links, const
       int rechts) {
42     if (links < rechts) {
43         int ml, mr;
44         partitioniere(liste, links, rechts, ml, mr);
45         quicksort(liste, links, ml);
46         quicksort(liste, mr, rechts);
47     }
48 };
49
50 void Quicksort::quicksort(int *liste, const int links, const
       int rechts, const int aktuelleEbene, const int messEbene) {
51     if (aktuelleEbene == messEbene) {
52         quicksortM(liste, links, rechts, aktuelleEbene);
53     } else {
54         if (links < rechts) {
55             int ml, mr;
56             partitioniere(liste, links, rechts, ml, mr);
57             quicksort(liste, links, ml, aktuelleEbene + 1,
                   messEbene);
58             quicksort(liste, mr, rechts, aktuelleEbene + 1,
                   messEbene);
59         }
60     }
61 };
62
63 void Quicksort::quicksortM(int *liste, const int links, const
       int rechts, const int aktuelleEbene) {
64     Messdaten *pos = new Messdaten();
65     pos->start1 = std::chrono::high_resolution_clock::now();
66     if (links < rechts) {
67         int ml, mr;
68         partitioniere(liste, links, rechts, ml, mr);
69         pos->start2 = std::chrono::high_resolution_clock::now
               ();
70         quicksort(liste, links, ml);
```

```
71          quicksort(liste, mr, rechts);
72          pos->ende2 = std::chrono::high_resolution_clock::now()
                ;
73      }
74      pos->ende1 = std::chrono::high_resolution_clock::now();
75      Messdaten::addMessDaten(aktuelleEbene, pos);
76  };
77
78  void Quicksort::quicksortP(int *liste, const int links, const
        int rechts, const int aktuelleEbene, const int
        neueThreadsBisEbene) {
79      if (aktuelleEbene < neueThreadsBisEbene) {
80          if (links < rechts) {
81              int ml, mr;
82              partitioniere(liste, links, rechts, ml, mr);
83              // quicksort(liste, links, ml);
84              std::thread thread(static_cast<void (*)(int *,
                    const int, const int, const int, const int)>(&
                    Quicksort::quicksortP),
85                                 liste, links, ml, aktuelleEbene
                                       + 1, neueThreadsBisEbene);
86              // quicksort(liste, mr, rechts);
87              quicksortP(liste, mr, rechts, aktuelleEbene + 1,
                    neueThreadsBisEbene);
88              thread.join();
89          }
90      } else {
91          quicksort(liste, links, rechts);
92      }
93  };
94
95  void Quicksort::quicksortP(int *liste, const int links, const
        int rechts, const int aktuelleEbene, const int
        neueThreadsBisEbene, const int messEbene) {
96      if (aktuelleEbene < neueThreadsBisEbene) {
97          if (aktuelleEbene == messEbene) {
98              quicksortPM(liste, links, rechts, aktuelleEbene,
                    neueThreadsBisEbene);
99          } else {
100             if (links < rechts) {
101                 int ml, mr;
102                 partitioniere(liste, links, rechts, ml, mr);
103                 // quicksort(liste, links, ml);
104                 std::thread thread(
105                     static_cast<void (*)(int *, const int,
                            const int, const int, const int, const
                            int)>(&Quicksort::quicksortP),
106                     liste, links, ml, aktuelleEbene + 1,
                            neueThreadsBisEbene, messEbene);
107                 // quicksort(liste, mr, rechts);
108                 quicksortP(liste, mr, rechts, aktuelleEbene +
```

```
                    1, neueThreadsBisEbene, messEbene);
109                 thread.join();
110             }
111         }
112     } else {
113         quicksort(liste, links, rechts, aktuelleEbene,
                messEbene);
114     }
115 };
116
117 void Quicksort::quicksortPM(int *liste, const int links, const
        int rechts, const int aktuelleEbene, const int
    neueThreadsBisEbene) {
118     Messdaten *pos = new Messdaten();
119     pos->start1 = std::chrono::high_resolution_clock::now();
120     if (links < rechts) {
121         int ml, mr;
122         partitioniere(liste, links, rechts, ml, mr);
123         // quicksort(liste, links, ml);
124         pos->start2 = std::chrono::high_resolution_clock::now
                ();
125         std::thread thread(
126             static_cast<void (*)(int *, const int, const int,
                    const int, const int)>(&Quicksort::quicksortP),
127             liste, links, ml, aktuelleEbene + 1,
                    neueThreadsBisEbene);
128         ;
129         // quicksort(liste, mr, rechts);
130         quicksortP(liste, mr, rechts, aktuelleEbene + 1,
                neueThreadsBisEbene);
131         thread.join();
132         pos->ende2 = std::chrono::high_resolution_clock::now()
                ;
133     }
134     pos->ende1 = std::chrono::high_resolution_clock::now();
135     Messdaten::addMessDaten(aktuelleEbene, pos);
136 };
137
138 void Quicksort::quicksortW(int *liste, int links, int rechts,
    int workerThreads) {
139     WorkerPool pool(workerThreads);
140
141     pool.taskHandler = [](int *liste, int links, int rechts,
            WorkerPool &pool) {
142         if (links < rechts) {
143             if (rechts - links < Sortierverfaren::mindestLange
                    ) {
144                 quicksort(liste, links, rechts);
145             } else {
146                 int ml, mr;
147                 Quicksort::partitioniere(liste, links, rechts,
```

```
                    ml, mr);
148                 pool.addTask({liste, links, ml});
149                 pool.taskHandler(liste, mr, rechts, pool);
150             }
151         }
152     };
153
154     pool.addTask({liste, links, rechts});
155     pool.waitUntilDone();
156 }
157
158 void Quicksort::partitioniere(int *liste, const int links,
    const int rechts, int &ml, int &mr) {
159     int i = links;
160     int j = rechts;
161     int mitte = links + ((rechts - links) / 2);
162     int p = liste[mitte];
163     while (i <= j) {
164         while (liste[i] < p) {
165             i++;
166         }
167         while (liste[j] > p) {
168             j--;
169         }
170         if (i <= j) {
171             vertausche(liste, i, j);
172             i++;
173             j--;
174         }
175     };
176     ml = j;
177     mr = i;
178 };
179
180 void Quicksort::vertausche(int *liste, const int a, const int
    b) {
181     int temp = liste[a];
182     liste[a] = liste[b];
183     liste[b] = temp;
184 };
```

Listing 2: Quicksort WorkerPool

```
1 // WorkerPool.h
2 #include <atomic>
3 #include <condition_variable>
4 #include <functional>
5 #include <mutex>
6 #include <queue>
7 #include <thread>
8 #include <vector>
9
```

```
10 struct Task {
11     int *liste;
12     int links;
13     int rechts;
14 };
15
16 class WorkerPool {
17 private:
18     std::vector<std::thread> threads;
19     std::queue<Task> taskQueue;
20     std::mutex mutex;
21     std::condition_variable cv;
22     std::atomic<int> activeTasks;
23     bool finished;
24
25 public:
26     std::function<void(int *, int, int, WorkerPool &)>
          taskHandler;
27
28 public:
29     WorkerPool(int numThreads) : finished(false), activeTasks
          (0) {
30         for (int i = 0; i < numThreads; ++i)
31             threads.emplace_back(&WorkerPool::worker, this);
32     }
33
34     ~WorkerPool() {
35         {
36             std::lock_guard<std::mutex> lock(mutex);
37             finished = true;
38         }
39         cv.notify_all();
40         for (auto &t : threads)
41             t.join();
42     }
43
44     void addTask(const Task &task) {
45         {
46             std::lock_guard<std::mutex> lock(mutex);
47             taskQueue.push(task);
48             activeTasks++;
49         }
50         cv.notify_one();
51     }
52
53     void waitUntilDone() {
54         std::unique_lock<std::mutex> lock(mutex);
55         cv.wait(lock, [this] { return activeTasks == 0; });
56     }
57
58 private:
```

```
59      void worker() {
60          while (true) {
61              Task task;
62              {
63                  std::unique_lock<std::mutex> lock(mutex);
64                  cv.wait(lock, [this] { return finished || !
                        taskQueue.empty(); });
65
66                  if (finished && taskQueue.empty())
67                      return;
68                  if (taskQueue.empty())
69                      continue;
70
71                  task = taskQueue.front();
72                  taskQueue.pop();
73              }
74
75              // Task bearbeiten
76              if (taskHandler) {
77                  taskHandler(task.liste, task.links, task.
                        rechts, *this);
78              }
79
80              activeTasks--;
81              cv.notify_all();
82          }
83      }
84  };
```

Listing 3: Mergesort

```
1   // Mergesort.cpp
2   #include "Mergesort.h"
3   #include "MergeWorkerPool.h"
4   #include <memory>
5   #include <thread>
6   #include <vector>
7
8   Mergesort::Mergesort() {};
9
10  void Mergesort::sortG(int *liste, int lange) {
11      int links = 0;
12      int rechts = lange - 1;
13      mergesort(liste, links, rechts);
14  };
15
16  void Mergesort::sortM(int *liste, int lange, int messEbene) {
17      int links = 0;
18      int rechts = lange - 1;
19      mergesort(liste, links, rechts, 1, messEbene);
20  };
21
```

```
22 void Mergesort::sortP(int *liste, int lange, int
       neueThreadsBisEbene) {
23     int links = 0;
24     int rechts = lange - 1;
25     mergesortP(liste, links, rechts, 1, neueThreadsBisEbene);
26 };
27
28 void Mergesort::sortPM(int *liste, int lange, int
       neueThreadsBisEbene, int messEbene) {
29     int links = 0;
30     int rechts = lange - 1;
31     mergesortP(liste, links, rechts, 1, neueThreadsBisEbene,
           messEbene);
32 };
33
34 void Mergesort::sortW(int *liste, int lange, int workerThreads
       ) {
35     int links = 0;
36     int rechts = lange - 1;
37     mergesortW(liste, links, rechts, workerThreads);
38 };
39
40 void Mergesort::mergesort(int *liste, const int links, const
       int rechts) {
41     int lange = rechts - links + 1;
42     if (lange > 1) {
43         int mitte = links + ((rechts - links) / 2);
44         mergesort(liste, links, mitte);      // A
45         mergesort(liste, mitte + 1, rechts); // B
46         mischen(liste, links, mitte, rechts, lange);
47     }
48 };
49
50 void Mergesort::mergesort(int *liste, const int links, const
       int rechts, const int aktuelleEbene, const int messEbene) {
51     if (aktuelleEbene == messEbene) {
52         mergesortM(liste, links, rechts, aktuelleEbene);
53     } else {
54         int lange = rechts - links + 1;
55         if (lange > 1) {
56             int mitte = links + ((rechts - links) / 2);
57             mergesort(liste, links, mitte, aktuelleEbene + 1,
                   messEbene);
58             mergesort(liste, mitte + 1, rechts, aktuelleEbene
                   + 1, messEbene);
59             mischen(liste, links, mitte, rechts, lange);
60         }
61     }
62 };
63
64 void Mergesort::mergesortM(int *liste, const int links, const
```

```
    int rechts, const int aktuelleEbene) {
65   Messdaten *pos = new Messdaten();
66   pos->start1 = std::chrono::high_resolution_clock::now();
67   int lange = rechts - links + 1;
68   if (lange > 1) {
69       int mitte = links + ((rechts - links) / 2);
70       pos->start2 = std::chrono::high_resolution_clock::now
         ();
71       mergesort(liste, links, mitte);
72       mergesort(liste, mitte + 1, rechts);
73       pos->ende2 = std::chrono::high_resolution_clock::now()
         ;
74       mischen(liste, links, mitte, rechts, lange);
75   }
76   pos->ende1 = std::chrono::high_resolution_clock::now();
77   Messdaten::addMessDaten(aktuelleEbene, pos);
78 };
79
80 void Mergesort::mergesortP(int *liste, const int links, const
    int rechts, const int aktuelleEbene, const int
    neueThreadsBisEbene) {
81   if (aktuelleEbene < neueThreadsBisEbene) {
82       int lange = rechts - links + 1;
83       if (lange > 1) {
84           int mitte = links + ((rechts - links) / 2);
85           // mergesort(liste, links, mitte);
86           std::thread thread(
87               static_cast<void (*)(int *, const int, const
                    int, const int, const int)>(&Mergesort::
                    mergesortP),
88               liste, links, mitte, aktuelleEbene + 1,
                    neueThreadsBisEbene);
89           // mergesort(liste, mitte + 1, rechts);
90           mergesortP(liste, mitte + 1, rechts, aktuelleEbene
                + 1, neueThreadsBisEbene);
91           thread.join();
92           mischen(liste, links, mitte, rechts, lange);
93       }
94   } else {
95       mergesort(liste, links, rechts);
96   }
97 };
98
99 void Mergesort::mergesortP(int *liste, const int links, const
    int rechts, const int aktuelleEbene, const int
    neueThreadsBisEbene, const int messEbene) {
100  if (aktuelleEbene < neueThreadsBisEbene) {
101      if (aktuelleEbene == messEbene) {
102          mergesortPM(liste, links, rechts, aktuelleEbene,
                neueThreadsBisEbene);
103      } else {
```

```
104             int lange = rechts - links + 1;
105             if (lange > 1) {
106                 int mitte = links + ((rechts - links) / 2);
107                 // mergesort(liste, links, mitte);
108                 std::thread thread(
109                     static_cast<void (*)(int *, const int,
                        const int, const int, const int, const
                        int)>(&Mergesort::mergesortP),
110                     liste, links, mitte, aktuelleEbene + 1,
                        neueThreadsBisEbene, messEbene);
111                 // mergesort(liste, mitte + 1, rechts);
112                 mergesortP(liste, mitte + 1, rechts,
                    aktuelleEbene + 1, neueThreadsBisEbene,
                    messEbene);
113                 thread.join();
114                 mischen(liste, links, mitte, rechts, lange);
115             }
116         }
117     } else {
118         mergesort(liste, links, rechts, aktuelleEbene,
            messEbene);
119     }
120 };
121
122 void Mergesort::mergesortPM(int *liste, const int links, const
    int rechts, const int aktuelleEbene, const int
    neueThreadsBisEbene) {
123     Messdaten *pos = new Messdaten();
124     pos->start1 = std::chrono::high_resolution_clock::now();
125     int lange = rechts - links + 1;
126     if (lange > 1) {
127         int mitte = links + ((rechts - links) / 2);
128         pos->start2 = std::chrono::high_resolution_clock::now
            ();
129         // mergesort(liste, links, mitte);
130         std::thread thread(
131             static_cast<void (*)(int *, const int, const int,
                const int, const int)>(&Mergesort::mergesortP),
132             liste, links, mitte, aktuelleEbene + 1,
                neueThreadsBisEbene);
133         // mergesort(liste, mitte + 1, rechts);
134         Mergesort::mergesortP(liste, mitte + 1, rechts,
            aktuelleEbene + 1, neueThreadsBisEbene);
135         thread.join();
136         pos->ende2 = std::chrono::high_resolution_clock::now()
            ;
137         mischen(liste, links, mitte, rechts, lange);
138     }
139     pos->ende1 = std::chrono::high_resolution_clock::now();
140     Messdaten::addMessDaten(aktuelleEbene, pos);
141 };
```

```
142
143 void Mergesort::mergesortW(int *liste, int links, int rechts,
    int workerThreads) {
144     MergeWorkerPool pool(workerThreads);
145
146     pool.taskHandler = [&](int *liste, int links, int rechts,
        MergeWorkerPool &pool) {
147         if (links < rechts) {
148             int lange = rechts - links + 1;
149             if (lange < Sortierverfaren::mindestLange) {
150                 mergesort(liste, links, rechts);
151             } else {
152                 int mitte = links + ((rechts - links) / 2);
153                 auto leftHandle = pool.addTaskSmart({liste,
                    links, mitte});
154                 pool.taskHandler(liste, mitte + 1, rechts,
                    pool);
155                 leftHandle.wait();
156                 mischen(liste, links, mitte, rechts, lange);
157             }
158         }
159     };
160
161     // Starttask
162     pool.taskHandler(liste, links, rechts, pool);
163 }
164
165 void Mergesort::mischen(int *liste, int links, const int mitte
    , const int rechts, const int lange) {
166     int *listeB = new int[lange];
167
168     // Kopiere nach listeB
169     for (int i = links; i < mitte + 1; i++) {
170         listeB[i - links] = liste[i];
171     }
172     for (int i = mitte + 1; i < rechts + 1; i++) {
173         listeB[lange - 1 + mitte + 1 - i] = liste[i];
174     }
175
176     // Sortiere liste
177     int i = 0;          // links
178     int j = lange - 1; // rechts
179     int k = links;      // links
180     while (i < j) {
181         if (listeB[i] < listeB[j]) {
182             liste[k] = listeB[i];
183             i++;
184         } else {
185             liste[k] = listeB[j];
186             j--;
187         }
```

```
188             k++;
189         }
190         liste[rechts] = listeB[i];
191
192         delete[] listeB;
193     };
```

Listing 4: Mergesort WorkerPool

```
1   // MergeWorkerPool.h
2   #pragma once
3   #include <atomic>
4   #include <condition_variable>
5   #include <functional>
6   #include <mutex>
7   #include <queue>
8   #include <thread>
9   #include <vector>
10
11  struct MergeTask {
12      int *liste;
13      int links;
14      int rechts;
15  };
16
17  class MergeTaskHandle {
18  public:
19      std::shared_ptr<std::atomic<bool>> done;
20      void wait() const {
21          while (!done->load(std::memory_order_acquire)) {
22              std::this_thread::yield();
23          }
24      }
25  };
26
27  class MergeWorkerPool {
28  private:
29      std::vector<std::thread> threads;
30      std::queue<MergeTask> taskQueue;
31      std::queue<std::shared_ptr<std::atomic<bool>>> doneFlags;
32
33      std::mutex mutex;
34      std::condition_variable cv;
35
36      std::atomic<int> activeTasks;
37      bool finished;
38
39  public:
40      std::function<void(int *, int, int, MergeWorkerPool &)>
            taskHandler;
41
42  public:
```

```
43      MergeWorkerPool(int numThreads) : activeTasks(0), finished
            (false) {
44          for (int i = 0; i < numThreads; ++i) {
45              threads.emplace_back(&MergeWorkerPool::worker,
                    this);
46          }
47      }
48
49      ~MergeWorkerPool() {
50          {
51              std::lock_guard<std::mutex> lock(mutex);
52              finished = true;
53          }
54          cv.notify_all();
55          for (auto &t : threads)
56              t.join();
57      }
58
59      // intelligente Task-Anmeldung
60      MergeTaskHandle addTaskSmart(const MergeTask &task) {
61          std::unique_lock<std::mutex> lock(mutex);
62
63          // Kein freier Thread selber ausfuhren
64          if (activeTasks >= threads.size()) {
65              lock.unlock();
66              taskHandler(task.liste, task.links, task.rechts, *
                    this);
67
68              MergeTaskHandle h;
69              h.done = std::make_shared<std::atomic<bool>>(true)
                    ;
70              return h;
71          }
72
73          // Worker frei -> auf Queue legen
74          MergeTaskHandle h;
75          h.done = std::make_shared<std::atomic<bool>>(false);
76          taskQueue.push(task);
77          doneFlags.push(h.done);
78
79          activeTasks++;
80          lock.unlock();
81          cv.notify_one();
82          return h;
83      }
84
85  private:
86      void worker() {
87          while (true) {
88              MergeTask task;
89              std::shared_ptr<std::atomic<bool>> doneFlag;
```

```
90
91              {
92                  std::unique_lock<std::mutex> lock(mutex);
93                  cv.wait(lock, [this] { return finished || !
                        taskQueue.empty(); });
94
95                  if (finished && taskQueue.empty())
96                      return;
97
98                  task = taskQueue.front();
99                  taskQueue.pop();
100                 doneFlag = doneFlags.front();
101                 doneFlags.pop();
102             }
103
104             if (taskHandler)
105                 taskHandler(task.liste, task.links, task.
                        rechts, *this);
106
107             doneFlag->store(true, std::memory_order_release);
108
109             activeTasks--;
110             cv.notify_all();
111         }
112     }
113 };
```

Listing 5: Mergesort WorkerPool

```
1  // Listenersteler.cpp
2  #include "Listenersteler.h"
3  #include "Messdaten.h"
4  #include <algorithm>
5  #include <random>
6
7  Listenersteler::Listenersteler() {};
8
9  int *Listenersteler::erstelleListe(char listeVariante, int
       lange) {
10     Messdaten::arrayArt = "int";
11     int *liste;
12     switch (listeVariante) {
13         case 'z':
14             liste = erstelleZufallsListe(lange);
15             break;
16         case 's':
17             liste = erstelleSortierteListe(lange);
18             break;
19         case 'i':
20             liste = erstelleInvertierteListe(lange);
21             break;
22         case 'f':
```

```
23              liste = erstelleFastSortierteListe(lange);
24              break;
25          case 'd':
26              liste = erstelleDuplizierteListe(lange);
27              break;
28          default:
29              liste = erstelleZufallsListe(lange);
30      }
31      return liste;
32  };
33
34  int *Listenersteler::erstelleZufallsListe(int lange) {
35      listenLange = lange;
36      liste = std::make_unique<int[]>(listenLange);
37
38      // Zufallsgenerator vorbereiten
39      // std::random_device rd;
40      // std::mt19937 gen(rd());
41      std::mt19937 gen(seed);
42      std::uniform_int_distribution<> dis(std::numeric_limits<
            int>::min(), std::numeric_limits<int>::max());
43      // std::uniform_int_distribution<> dis(0, 9);
44
45      std::generate_n(liste.get(), lange, [&]() { return dis(gen
            ); });
46
47      Messdaten::arrayTyp = "Zufall";
48      Messdaten::arrayLange = lange;
49
50      return liste.get();
51  }
52
53  int *Listenersteler::erstelleSortierteListe(int lange) {
54      listenLange = lange;
55      liste = std::make_unique<int[]>(listenLange);
56
57      for (int i = 0; i < lange; i++) {
58          liste[i] = i;
59      }
60
61      Messdaten::arrayTyp = "Sortiert";
62      Messdaten::arrayLange = lange;
63
64      return liste.get();
65  }
66
67  int *Listenersteler::erstelleInvertierteListe(int lange) {
68      listenLange = lange;
69      liste = std::make_unique<int[]>(listenLange);
70
71      for (int i = 0; i < lange; i++) {
```

```
72          liste[i] = lange - i;
73      }
74
75      Messdaten::arrayTyp = "InvertSortiert";
76      Messdaten::arrayLange = lange;
77
78      return liste.get();
79  }
80
81  int *Listenersteler::erstelleFastSortierteListe(int lange, int
        swaps) {
82      listenLange = lange;
83      liste = std::make_unique<int[]>(listenLange);
84
85      // Erst sortierte Liste erzeugen
86      for (int i = 0; i < lange; i++) {
87          liste[i] = i;
88      }
89
90      // Reproduzierbare Zufallsvertauschungen
91      std::mt19937 gen(seed);
92      std::uniform_int_distribution<> dis(0, lange - 1);
93
94      for (int i = 0; i < swaps; i++) {
95          int a = dis(gen);
96          int b = dis(gen);
97          std::swap(liste[a], liste[b]);
98      }
99
100     Messdaten::arrayTyp = "FastSortiert";
101     Messdaten::arrayLange = lange;
102
103     return liste.get();
104 }
105
106 int *Listenersteler::erstelleDuplizierteListe(int lange, int
        uniqueValues) {
107     listenLange = lange;
108     liste = std::make_unique<int[]>(listenLange);
109
110     std::mt19937 gen(seed);
111     std::uniform_int_distribution<> dis(0, uniqueValues - 1);
112
113     std::generate_n(liste.get(), lange, [&]() { return dis(gen
            ); });
114
115     Messdaten::arrayTyp = "Dupliziert";
116     Messdaten::arrayLange = lange;
117
118     return liste.get();
119 }
```

```
120
121 bool Listenersteler::istSortiert() const {
122     return std::is_sorted(liste.get(), liste.get() +
        listenLange);
123 }
```