

Facharbeit im Grundkurs Informatik

Implementation des Gauß-Algorithmus

Georg-Büchner-Gymnasium

Joel Mantik

Pablo Sonnauer

März 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Lineare Gleichungssysteme	3
2.2	Gaußsches Eliminationsverfahren	4
3	Erläuterung des Quellcodes	5
4	Abwägungen	8
4.1	Vorteile des Algorithmus	8
4.2	Nachteile des Algorithmus	9
5	Anwendungsbereiche des Gaußschen-Eliminationsverfahrens in der Informatik	10
5.1	Kryptografie	10
5.2	Computergrafik	11
6	Fazit	11

Kapitel 1

Einleitung

”The simplest model in applied mathematics is a system of linear equations. It is also by far the most important.”

GILBERT STRANG

Der Gauß-Algorithmus ist eins der wichtigsten Lösungsverfahren zum Lösen linearer Gleichungssysteme. Er spielt eine tragende Rolle in vielen Bereichen der Mathematik und ist dennoch recht unkompliziert. Aufgrund der Wichtigkeit, habe ich dazu entschieden, den Algorithmus in dieser Facharbeit zu implementieren, zu analysieren, und Anwendungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Der Gauß-Algorithmus ist ein Algorithmus, welcher beim Lösen von linearen Gleichungssystemen zum Einsatz kommt. Im folgenden Kapitel wird die mathematische Theorie erläutert und die Definitionen genannt, welche die Grundlage

für die spätere Implementierung sind.

2.1 Lineare Gleichungssysteme

Ein lineares Gleichungssystem ist eine Sammlung von Gleichungen, in denen jede Unbekannte mit höchstens dem ersten Grad vorkommt. Es kann in der Form $Ax = b$ geschrieben werden, wobei A eine $m \times n$ Matrix ist, x ein n -dimensionaler Vektor von Unbekannten und b ein m -dimensionaler Vektor von Konstanten ist. Ein allgemeines lineares Gleichungssystem lässt sich wie folgt definieren.: [Gra21]

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m \end{aligned} \quad (2.1)$$

Das Ziel eines solchen linearen Gleichungssystems ist es, eine Lösung für x zu finden, die alle Gleichungen erfüllt. Hierbei gibt es drei Arten von Lösungen:

1. Das Gleichungssystem hat genau *eine* Lösung; es gibt genau eine Lösung, welche alle Gleichungen im System erfüllt. Die Lösungsmenge ist z. B. : $\mathbb{L} = \{(x, y, z) | (1, 2, 3)\}$.
2. Das Gleichungssystem hat *keine* Lösung, wenn es keine Lösung gibt, die alle Gleichungen erfüllt. Die Lösungsmenge ist eine leere Menge: $\mathbb{L} = \emptyset$.
3. Das Gleichungssystem hat *unendlich viele* Lösungen, wenn es mehrere Lösungen gibt die alle Gleichungen im System erfüllen. Hierbei sind die verschiedenen Variablen voneinander abhängig. Die Lösungsmenge sieht beispielsweise wie folgt aus:

$$\mathbb{L} = \{(x, y, z) | (x = ay + z, y \in \mathbb{R}, z \in \mathbb{R})\}.$$

2.2 Gaußsches Eliminationsverfahren

Gegeben sei das Allgemeine Lineare Gleichungssystem 2.1. Gesucht ist nun die Menge der $(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, die alle Gleichungen erfüllen. Dies erreicht man, indem man folgendermaßen vorgeht.:

1. Die erweiterte Koeffizientenmatrix (A, b) aufschreiben. [Fis14]:

$$(A, b) := \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

2. A durch elementare Zeilentransformationen, also Vertauschen von Zeilen, Multiplikation einer Zeile mit einer Zahl $\neq 0$ oder Addition des Vielfachen von einer Zeile zu einer anderen Zeile auf Zeilenstufenform bringen. Eine $m \times n$ -Matrix A heißt in *Zeilenstufenform*, wenn sie von der folgenden Form ist:

$$\left(\begin{array}{cccccccccccccccc|c} 0 & \dots & 0 & 1 & * & \dots & * & 0 & * & \dots & * & 0 & * & \dots & * & 0 & * & \dots & * \\ & & & & & & & 1 & * & \dots & * & 0 & * & \dots & * & 0 & * & \dots & * \\ & & & & & & & & & & & 1 & * & \dots & * & 0 & * & \dots & * \\ & & & & & & \ominus & & & & & & & & & 1 & * & \dots & * \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & \ddots & \vdots \end{array} \right)$$

Dabei steht der Stern für eine beliebige Zahl, und die freien Plätze sind alle mit Nullen besetzt. Der erste von Null verschiedene Eintrag in jeder Zeile ist 1. Dieser Eintrag wird das Pivot-Element der Zeile genannt. Das Pivot-Element der $(i + 1)$ -ten Zeile steht immer rechts des Pivot-Elements der i -ten Zeile, und alle Einträge oberhalb eines Pivot-Elements sind gleich Null. [Zwe22]

3. Nun lassen sich durch Rücksubstitution die Werte für die Variablen ermitteln. Man teilt die letzte Spalte durch den Wert des Koeffizienten, so

dass die Variable alleine steht. Der gefundene Wert wird dann in die nächst höhere Zeile eingesetzt, dann wird analog zum ersten Schritt vorgegangen.

Kapitel 3

Erläuterung des Quellcodes

Für die im Folgenden dargelegte Implementation und Analyse des Algorithmus wurde die Programmiersprache "Java" verwendet.

Der grundlegende Aufbau des Programms lässt sich an folgendem Implementationsdiagramm erkennen.:

Gauss
<ul style="list-style-type: none">- datei:String- koeff: double[][]- solMatrix: double[][]- zeilenElemente: String[]- countSpalten: int- countZeilen: int- SONDERFALL: boolean- NORMALFALL: boolean
<ul style="list-style-type: none">- main(args: String[]): void- einlesen(): void- ausgabe(): void- gaussAlgo(): void- multiplyAndAdd(lineOne: int, lineTwo: int, factor: double): void- checkWievielnNullZeilen(): boolean-checkObNull(zeile: int): boolean

Die Namen der Methoden wurden so gewählt, dass die Grundfunktion dieser klar sind. In der Main Methode des Programms wird ein Parameter übernommen, welcher die Datei mit der Koeffizientenmatrix annimmt. Außerdem werden in dieser die Methoden `einlesen()`, `ausgabe()` und `gaussAlgo()` ausgeführt. Die Methode `ausgabe()` gibt in der Main Methode sowohl die Eingangsmatrix als auch die Lösungsmatrix aus.

Die Methode `einlesen()` liest die Koeffizientenmatrix aus der Datei ein, dabei wird eine Liste erstellt, in welcher alle Zeilen der eingelesenen Datei gespeichert werden. Dann werden durch eine For-Schleife alle Leerzeichen und Kommentare entfernt. Des Weiteren werden die Kommata zu Punkten gemacht, um das Funktionieren des Algorithmus auch auf anderen Systemen zu gewährleisten. Weiterhin wird die Anzahl der Spalten in der Variable `countSpalten`, und die Anzahl der Zeilen in `countZeilen` gespeichert und im Zuge dessen auch die *Eingangsmatrix* `koeff[][]` und die *Lösungsmatrix* `solMatrix[][]` initialisiert. Die Methode `ausgabe()` nimmt zwei Parameter an, den zweidimensionalen Array `double mx` und den String `matrixName`. Beide werden durch eine For-Schleife auf der Konsole ausgegeben. Die Methode `multiplyAndAdd()`, welche die Parameter `lineOne`, `lineTwo` (`Integer`) und den `double factor` annimmt, wird verwendet um, die Koeffizienten zu einer Null zu machen. Dabei wird durch eine For-Schleife über die Spalten der Matrix iteriert und dabei der Koeffizient an der Stelle von `lineTwo` und `spalten` auf den Wert Null gebracht. Dies geschieht, indem die Matrix an der Stelle `lineOne` und `spalten` mit dem Parameter `factor` multipliziert und zu dem zu verändernden Koeffizienten addiert. Weiter gibt es die Methode `checkObNull()`, welche den Parameter `zeile` (`Integer`) annimmt und über die Eingangsmatrix iteriert und prüft ob ein Koeffizient den Wert Null hat, wenn es einen solchen Fall gibt wird `true` zurückgegeben, andernfalls `false`. Diese Methode wird später für die Sonderbehandlung von nicht normalen Matrizes verwendet. Anknüpfend gibt es noch die Methode `checkWievielNullZeilen()`. Diese iteriert, ausgehend von der dritten Zeile, über die Zeilen und prüft für jede, ob die Koeffizienten in der Zeile gleich null sind. Für jede gefundene Null-Zeile

wird, ein Counter `nullCounter` erhöht. Wenn diese Zählvariable am Ende der Iteration ungleich Null ist, wird die Konstante `SONDERFALL` zurückgegeben und die Anzahl der Null-Zeilen auf der Konsole ausgegeben, andernfalls wird die Konstante `NORMALFALL` zurückgegeben. Wenn die Matrix an jeder Stelle eine Null hat, wird ebenfalls interveniert und die Fehlermeldung auf der Konsole ausgegeben. Die Methode arbeitet sehr effektiv, denn durch die Pivotisierung kann, wie bereits erwähnt, von hinten iteriert werden, denn wenn es Null-Zeilen gibt so sind diese am Ende.

Die Methode `gaussAlgo()` ist die Methode in der eigentliche Algorithmus passiert. Als Erstes wird die Eingangsmatrix also `koef[] []`, durch eine For-Schleife, in die Lösungsmatrix `solMatrix[] []` kopiert, damit am Ende beide ausgegeben werden können. Anschließend findet die Pivotisierung der Matrix statt. Dies geschieht, indem zuerst, eine Variable `maxZeile (Integer)` erzeugt und mit der Zählvariable `zeile` initialisiert wird. Diese wird verwendet, um die Zeile mit dem größten Koeffizienten zu finden. In der darauf folgenden for-Schleife findet die eigentliche Pivotisierung statt. Sie sucht in der aktuellen Spalte nach dem Element mit dem größten, absoluten Wert und speichert diesen, wenn der größere Wert in der Zeile unter der aktuellen Zeile ist in der Variable `maxZeile`. Anschließend folgt eine If-Bedingung: Wenn die zuvor initialisierte `maxZeile` ungleich dem Wert der Variable `zeile` ist, werden die Zeilen mithilfe einer temporären Variable getauscht, sodass am Ende die Zahl mit dem größten Koeffizienten oben steht. Die nächste For-Schleife berechnet den Faktor `factor`, indem die Lösungsmatrix mit negativem Vorzeichen an der Stelle der Zählvariable `i` und `zeile` (die Zählvariable der ersten for-Schleife), durch die Lösungsmatrix an der Stelle `zeile`, `zeile` geteilt wird. Dieser Faktor wird dann an die Methode `multiplyAndAdd` zusammen mit `zeile`, `i` als Parameter übergeben, nachdem die For-Schleife durchgelaufen ist, wird die hergestellte triangularisierte Matrix ausgegeben. Anschließend prüft der Algorithmus die triangularisierte Matrix indem durch eine If-Bedingung abgefragt wird, ob die Methode `checkWievielenNullZeilen` auf die Matrix angewendet wird, wenn sie ein Sonderfall zurückgibt, bricht der Algorithmus ab. Der letzte

Schritt, wird verwendet, um die Matrix durch Rücksubstitution zu lösen. Eine For-Schleife läuft von der letzten Spalte bis zur ersten. Zuerst wird in dieser Schleife eine Variable `double diagonale` erstellt, in welcher das aktuelle Diagonalelement gespeichert wird. In der nächsten Zeile iteriert eine weitere For-Schleife über die Matrix und teilt bei jeder Iteration den Wert des aktuellen Koeffizienten durch den Wert in `diagonale`. Dadurch entsteht die Dreiecksform, bei welcher jedes Element in dieser den Wert Eins haben soll. Weitergehend wird der Wert des Tupels in der Variable `double result` gespeichert. Durch eine weitere For-Schleife wird die über alle Zeilen unter der aktuellen iteriert, bei jeder Iteration wird der Wert der rechten Zeile um das Produkt aus dem Wert von `result` und dem Wert des Elements aus der aktuellen Spalte der Zeile subtrahiert. Als Letztes wird noch der Wert der aktuellen Zeile auf null gesetzt, damit das Gleichungssystem in der Dreiecksform bleibt.

Kapitel 4

Abwägungen

4.1 Vorteile des Algorithmus

Der Gauß-Algorithmus hat klar den Vorteil das er bei Gleichungssystemen mit wenig Koeffizienten sehr effektiv ist, d.h er kann die Lösung schnell und einfach berechnen. Auch ist der Algorithmus in der Programmierung relativ leicht umzusetzen, da er nach einfachen Schemata funktioniert, bei welchem wenige Schritte benötigt werden.

4.2 Nachteile des Algorithmus

Zum einen kann es durch die Verwendung vom Datentyp Double und die mehrfache Rechnung mit denselben Werten zu Rundungsfehlern kommen. Zum anderen hat der Algorithmus bei komplizierten Matrizen mit vielen Zeilen und Spalten eine große Laufzeit, die Worstcase Laufzeit würde aufgrund von doppelten For-Schleifen $O(n^2)$ betragen. Nachteile des Algorithmus sind zum einen, dass bei schlecht konditionierten Gleichungssystemen Rundungsfehler auftreten können. Dies sieht man auch in der vorliegenden Implementation, wobei durch die Verwendung vom Datentyp double und dem rechnen mit denselben gerundeten Zahlen noch größere Rundungsfehler entstehen können. Außerdem kann der Algorithmus bei vielen Koeffizienten eine sehr hohe Rechenleistung in Anspruch nehmen.

Kapitel 5

Anwendungsbereiche des Gaußschen- Eliminationsverfahrens in der Informatik

Der Algorithmus spielt in der Informatik aufgrund seiner Simplität eine tragende Rolle in vielen Teilbereichen, wie der Kryptografie, der Computergrafik oder der Datenanalyse. Die Anwendungsmöglichkeiten, in diesen werden im Folgenden umrissen.

5.1 Kryptografie

Das Gauß'sche Eliminationsverfahren kann verwendet werden, um modulare Gleichungen zu lösen, die in der Kryptografie häufig auftreten. Zum Beispiel wird das Verfahren bei der Berechnung von Schlüsseln in asymmetrischen Kryptosystemen wie RSA eingesetzt. Hierbei wird mit dem Gauß-Algorithmus eine Primfaktorzerlegung durchgeführt, die dann verwendet, um Schlüssel in asymmetrischen Kryptosystemen zu verwenden. Mehr Informationen in [KK10] vgl. Kapitel 11.4.3.

5.2 Computergrafik

In der 3D-Computergrafik werden 4x4-Matrizen verwendet, um Objekte im Raum zu transformieren. Diese Matrizen enthalten Informationen über Translationen, Rotationen und Skalierungen von Objekten. Das Gauß'sche Eliminationsverfahren wird verwendet, um die inverse Matrix zu berechnen, die dann verwendet wird, um die Transformationsoperationen umzukehren. Die inverse Matrix wird auch dazu verwendet, um Normale von 3D-Objekten zu transformieren, um sie in eine konsistente Richtung zu bringen, was wichtig ist für Beleuchtungs- und Schattierungsberechnungen.

Kapitel 6

Fazit

Anhang

```
1  /**
2   * @author Joel Mantik
3   */
4  import java.nio.charset.StandardCharsets;
5  import java.nio.file.Files;
6  import java.nio.file.Path;
7  import java.nio.file.Paths;
8  import java.io.IOException;
9  import java.util.List;
10
11
12  public class Gauss {
13      static String datei; // der Parameter der Datei
14      static double[][] koeff; // Initialisierung der erweiterten Koeffizienten Matrix
15      static double[][] solMatrix; // Initialisierung der Loesungsmatrix
16      static String[] zeilenElemente;
17      static int countSpalten = 0;
18      static int countZeilen;
19      static final boolean SONDERFALL = true;
20      static final boolean NORMALFALL = false;
21
22      /**
23       * main Methode in welcher alle Methoden ausgefuehrt werden
24       * @param args liest die Datei mit der Matrix ein
25       */
26      public static void main(String[] args) throws IOException {
27          /**
28           * Hier wird der Dateiname als Parameter eingelesen
29           */
30          if (args.length < 1) {
31              System.out.println("Bitte Dateiname als Parameter uebergeben!");
32              return;
33          } else {
34              datei = args[0];
35          }
36
37          einlesen();
38          ausgabe(koeff, "Eingangsmatrix");
39          gaussAlgol();
40          ausgabe(solMatrix, "Loesungsmatrix");
41      }
42
43      /**
44       * Diese Methode liest die Koeffizienten aus der Datei ein
45       */
46      private static void einlesen() throws IOException {
47
48          List<String> f = Files.readAllLines(Paths.get(datei));
```

```

49     int zeilenIndex = 0;
50
51     for (int i = 0; i < f.size(); i++) {
52         String zeile = f.get(i);
53         // Kommentare und Whitespaces der input Datei werden ignoriert
54         if (zeile.isEmpty() || zeile.charAt(0) == '#') {
55             continue;
56         }
57
58         zeilenElemente = zeile.replace(',', '.', '\\s+').split("\\s+"); // Kommata werden zu Punkten
59         // Speichert Spaltenanzahl
60         if (countSpalten == 0){
61             countSpalten = zeilenElemente.length;
62             koefff      = new double[countSpalten - 1][countSpalten];
63             solMatrix = new double[countSpalten - 1][countSpalten];
64         }
65         for (int spaltenIndex = 0; spaltenIndex < countSpalten; spaltenIndex++) {
66             String element = zeilenElemente[spaltenIndex];
67             double wert = Double.parseDouble(element);
68             // Der Koeffizientenmatrix werden die double Werte zugewiesen, welche in wert gespeichert
        wurden
69             koefff[zeilenIndex][spaltenIndex] = wert;
70
71         }
72
73         zeilenIndex++;
74     }
75     /*double[][] hilfMat = koefff;
76     if(hilfMat.length != countSpalten){
77         System.out.println("Falsche Matrix!");
78         return;
79     }*/
80
81     // Speichert Zeilenanzahl
82     countZeilen = koefff.length;
83     System.out.println(countSpalten);
84     System.out.println(countZeilen);
85 }
86
87 /**
88  * Methode ausgabe gibt die Eingangsmatrix und die Loesungsmatrix aus
89  * @param mx nimmt die Eingangsmatrix oder die Loesungsmatrix an
90  * @param matrixName nimmt den Namen der Matrix an
91  */
92 private static void ausgabe(double[][] mx, String matrixName){ // Ausgabe der Matrizen
93
94     System.out.println("Die " + matrixName + ":");
95     for (int j = 0; j < mx.length; j++) {
96         for (int k = 0; k < mx[j].length; k++) {
97             System.out.print(Math.round(mx[j][k] * 10000d) / 10000d + " "); // TODO: GILT NUR FUER
        NETTE ZAHLEN
98         }
99         System.out.println();
100     }
101     System.out.println();
102 }
103
104
105 /**
106  * Die Methode gaussAlgo fuehrt den eigentlichen Algorithmus aus
107  */
108 private static void gaussAlgo1() {

```

```

109     for (int i = 0; i < countZeilen; i++) {
110         for (int j = 0; j < countSpalten; j++) {
111             solMatrix[i][j] = koef[i][j];
112         }
113     }
114     // copyLine(0); // Erste Zeile der Originalmatrix wird in Loesungs Matrix kopiert
115     //copyLine(1);
116     //copyLine(2);
117     /**
118      * Diese for-Schleife triangularisiert die Matrix
119      */
120     for (int zeile = 0; zeile < countZeilen - 1; zeile++) {
121         int maxZeile = zeile;
122
123         /*
124          * Diese Schleife sucht in der aktuellen Spalte (durch die Variable zeile indiziert)
125          * nach dem Element mit dem groessten absoluten Wert und merkt sich die Zeilennummer dieses
126          Elements in der Variable maxZeile.
127          */
128         for (int i = zeile + 1; i < countZeilen; i++) {
129             // Der spaltenIndex der solMatrix rueckt nach jeder Vertauschung einen weiter deswegen
130             kann als spaltenIndex zeile benutzt werden
131             if (Math.abs(solMatrix[i][zeile]) > Math.abs(solMatrix[maxZeile][zeile])) {
132                 maxZeile = i;
133             }
134         }
135         /*
136          * Wenn das Element mit dem groessten absoluten Wert in einer anderen Zeile als in der aktuellen
137          Zeile (maxZeile) gefunden wurde
138          * werden die maxZeile und die oberste Zeile vertauscht vertauscht. Dies ist die Pivotisierung.
139          */
140         if (maxZeile != zeile) {
141             double[] temp = solMatrix[zeile];
142             solMatrix[zeile] = solMatrix[maxZeile];
143             solMatrix[maxZeile] = temp;
144         }
145
146         // Die Koeffizienten werden durch  $x = -b/a$  0
147         for (int i = zeile + 1; i < countZeilen; i++) {
148             // TODO: Vielleicht wird durch 0 geteilt
149             double factor = -solMatrix[i][zeile] / solMatrix[zeile][zeile];
150             multiplyAndAdd(zeile, i, factor);
151         }
152     }
153
154     ausgabe(solMatrix, "Triangularisierte Matrix");
155
156     /**
157      * Untersuchung der Triangularisierten Matrix: 1.: wvl 0 Zeilen gibt es am Ende
158      */
159     if (checkWievielnNullZeilen() == SONDERFALL) {
160         System.exit(-1);
161     }
162
163     /**
164      * Durch rucksitution werden die gefundenen Werte RUECKWAERTS in die uebere Zeile eingesetzt
165      * und so x und y errechnet
166      */
167     for (int zeilen = countZeilen - 1; zeilen >= 0; zeilen--) {
168         double diagonale = solMatrix[zeilen][zeilen];
169         // TODO: Teilen durch Diagonale
170         for (int spalte = 0; spalte < countSpalten; spalte++) {

```

```

168         solMatrix[zeilen][spalte] /= diagonale;
169     }
170     double result = solMatrix[zeilen][solMatrix[zeilen].length - 1];
171     for(int rueckZeilen = zeilen - 1; rueckZeilen >= 0; rueckZeilen--){
172         solMatrix[rueckZeilen][countSpalten - 1] -= result * solMatrix[rueckZeilen][zeilen];
173         solMatrix[rueckZeilen][zeilen] = 0.0;
174     }
175 }
176 }
177
178
179
180 /**
181  * multiplyAndAdd bringt die Koeffizienten auf 0
182  * @param lineOne nimmt die 1. Zeile welche benutzt werden soll an
183  * @param lineTwo nimmt die 2. Zeile welche benutzt werden soll an
184  * @param factor der Wert mit dem multipliziert wird, so dass der Koeffizient 0 wird
185  */
186 private static void multiplyAndAdd(int lineOne, int lineTwo, double factor) { // x = -b/a wird
    durchgefuehrt
187     for(int spalten = 0; spalten < solMatrix[lineOne].length; spalten++){
188         solMatrix[lineTwo][spalten] = (solMatrix[lineOne][spalten] * factor) + solMatrix[lineTwo][
    spalten];
189     }
190
191 }
192
193 /**
194  * Die Methode pr ft wieviele Nullzeilen die Matrix hat.
195  * @return SONDERFALL wird zur ckgegeben wenn die Matrix ein Sonderfall ist.
196  * @return NORMALFALL wird sonst zur ckgegeben
197  *
198  *
199  */
200
201 private static boolean checkWievielnNullZeilen() {
202     int nullCounter = 0;
203     for(int i = countZeilen - 1; i >= 0; i--){
204         if(checkObNull(i) == true){
205             nullCounter++;
206         } else {
207             if(nullCounter != 0){
208                 System.out.println("Sonderfall gefunden: Es gibt " + nullCounter + " Nullzeilen ");
209                 return SONDERFALL;
210             }else{
211                 return NORMALFALL;
212             }
213         }
214     }
215     System.out.println("Sonderfall gefunden, Matrix besteht aus Nullen!");
216     return SONDERFALL;
217 }
218
219 /**
220  * @param zeile Die Zeile welche gepr ft wird
221  * Die Methode pr ft f r jedes Element ob es den Wert Null hat
222  */
223 private static boolean checkObNull(int zeile){
224     for(int i= 0; i < countSpalten; i++){
225         if(solMatrix[zeile][i] != 0){
226             return false;
227         }

```



```
228     }  
229     return true;  
230 }  
231  
232 }
```

Listing 6.1: Quellcode des Gauß-Algorithmus

Literatur

- [Fis14] Gerd Fischer. *Lineare Algebra: Eine Einführung für Studien Anfänger*. Springer Spektrum, 2014.
- [Gra21] Günther Gramlich. *Lineare Algebra: Eine Einführung*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2021.
- [KK10] Christian Karpfinger und Hubert Kiechle. *Kryptologie, Algebraische Methoden und Algorithmen*. Vieweg+Teubner, 2010.
- [Zwe22] Prof. Dr. Sander Zwegers. *Lineare Algebra, Notizen zur Vorlesung*. Universität zu Köln, Juli 2022.