
BACHELORARBEIT

Frau
Vivien Jacob

**Vergleich verschiedener Me-
thoden zur automatisierten
Detektion von Grundmustern
und Minutien in Fingerabdrü-
cken mittels der Software
MATLAB.**

Mittweida, 2021

BACHELORARBEIT

Vergleich verschiedener Methoden zur automatisierten Detektion von Grundmustern und Minutien in Fingerabdrücken mittels der Software MATLAB.

Autor:
Frau

Vivien Jacob

Studiengang:
Allgemeine und Digitale Forensik

Seminargruppe:
FO18w1-B

Erstprüfer:
Professor Dr. rer. nat. Dirk Labudde

Zweitprüfer:
M.Sc. Marleen Mohaupt

Einreichung:
Mittweida, 29.11.2021

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2021

BACHELOR THESIS

Comparison of different meth- ods for automated detection of basic patterns and minutiae in fingerprints using MATLAB software.

author:

Ms.

Vivien Jacob

course of studies:

General and Digital Forensics

seminar group:

FO18w1-B

first examiner:

Professor Dr. rer. nat. Dirk Labudde

second examiner:

M.Sc. Marleen Mohaupt

submission:

Mittweida, 29.11.2021

defence/ evaluation:

Mittweida, 2021

Bibliografische Beschreibung:

Jacob, Vivien:

Vergleich verschiedener Methoden zur automatisierten Detektion von Grundmustern und Minutien in Fingerabdrücken mittels der Software MATLAB. - 2021. – 9, 37, 1 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften, Bachelorarbeit, 2021

Referat:

Automatisierte Detektion von Minutien und Bestimmung der Grundmuster von Fingerabdrücken mittels der Methoden *Crossing Number Concept* und *Template Matching* sowie Vergleich verschiedener Vorverarbeitungsarten in der Software MATLAB. Zunächst werden die Grundmuster der Fingerabdruckbilder mittels MATLAB bestimmt und mit den tatsächlich vorhandenen Grundmustertypen in den jeweiligen Fingerabdrücken abgeglichen. Danach werden Gabel-Minutien in den ausgedünnten Papillarlinienbildern der Fingerabdrücke mittels MATLAB detektiert. Hierbei kommen das *Crossing Number Concept* und das *Template Matching* Verfahren zur Anwendung. In jedem Verfahren wird die *Precision* berechnet und die Methoden untereinander verglichen. Zuletzt wird analysiert, wie sich Änderungen in den Vorverarbeitungsschritten der Fingerabdruckbilder auf das Papillarlinienbild auswirken.

Inhalt

Inhalt I

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 <i>Motivation.....</i>	1
1.2 <i>Zielstellung.....</i>	2
2 Grundlagen	3
2.1 <i>Entstehung von Fingerabdrücken.....</i>	3
2.2 <i>Drei Ebenen eines Fingerabdrucks</i>	3
2.2.1 Ebene 1 – Grundmuster	4
2.2.2 Ebene 2 – Minutien	5
2.2.3 Ebene 3 – Sonstige Beschaffenheiten.....	5
2.2.4 Chemischer Fingerabdruck	6
2.3 <i>Fingerabdruck Verbesserungsprozesse</i>	6
2.3.1 Segmentierung.....	6
2.3.2 Normalisierung	7
2.3.3 Schätzung der Orientierung.....	8
2.3.4 Schätzung der Papillarlinienfrequenz	9
2.3.5 Gabor-Filterung	10
2.3.6 Binarisierung	10
2.3.7 Thinning	11
2.4 <i>Verfahren zur Analyse von Fingerabdruckmustern.....</i>	12
2.4.1 Crossing Number Concept	12
2.4.2 Template Matching.....	15
3 Vorgehensweise.....	17
3.1 <i>Grundmusterbestimmung mittels Template Matching.....</i>	17
3.2 <i>Minutien Detektion.....</i>	20
3.2.1 Crossing Number Concept	20

3.2.2	Template Matching	20
3.2.3	Kombination aus Crossing Number Concept und Template Matching	22
3.3	<i>Vergleich verschiedener Änderungen in Verbesserungsprozessen am Fingerabdruckbild</i>	<i>22</i>
4	Ergebnisse und Diskussion	23
4.1	<i>Grundmusterbestimmung.....</i>	<i>23</i>
4.2	<i>Minutien Detektion</i>	<i>25</i>
4.3	<i>Vergleich verschiedener Änderungen in Verbesserungsprozessen.....</i>	<i>29</i>
5	Ausblick.....	36
Literatur		38
Digitale Anhänge.....		41
Selbstständigkeitserklärung		43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gängige Grundmuster von Fingerabdrücken (Yager & Amin, 2004).	4
Abbildung 2: Häufig vorkommende Minutien (Maltoni, et al., 2009, p. 99).	5
Abbildung 3: Segmentierungsschritt eines Fingerabdruckes (eigene Darstellung).....	7
Abbildung 4: Normalisierungsschritt eines Fingerabdruckes (eigene Darstellung).....	8
Abbildung 5: Schätzung der Orientierung eines Fingerabdruckes (eigene Darstellung).....	9
Abbildung 6: Schätzung der Papillarlinienfrequenz eines Fingerabdruckes (Thai, 2003, p. 11).....	10
Abbildung 7: Binarisierungsschritt eines Fingerabdruckes (eigene Darstellung).	11
Abbildung 8: Normalisierungsschritt eines Fingerabdruckes (eigene Darstellung).	12
Abbildung 9: Mögliche Pixelkonstellationen für Endungen (Golabi, et al., 2012, p. 516). .	13
Abbildung 10: Mögliche Pixelkonstellationen für Gabeln (Golabi, et al., 2012, p. 516).....	13
Abbildung 11: Generierte Region of Interest an einem Fingerabdruck (eigene Darstellung).	14
Abbildung 12: Papillarlinienstrukturen, die vom System als falsche Minutien interpretiert werden können (Barham & Mousa, 2011).	15
Abbildung 13: Orientierungsfelder ausgewählter Grundmuster (eigene Darstellung).	17
Abbildung 14: Entscheidungsbaum zur Bestimmung der Grundmustertypen (eigene Darstellung).....	19
Abbildung 15: Beispiele für Gabel-Templates (eigene Darstellung).	21
Abbildung 16: Verteilung der Erkennung einzelner Grundmuster in 60 Fingerabdrücken (eigene Darstellung).	24

Abbildung 17: Vergleich zwei verschiedener Template Matching Verfahren (eigene Darstellung).	26
Abbildung 18: Vergleich des CNC und einer Kombination aus CNC mit dem Template Matching Verfahren (eigene Darstellung).	27
Abbildung 19: Verteilung richtiger, falscher und nicht detektierter Gabel-Minutien verschiedener Methoden (eigene Darstellung).	28
Abbildung 20: Vergleich der Gabel-Minutien im eingescannten Fingerabdruckbild mit dem verarbeiteten Fingerabdruckbild von GitHub-User „Emu0“ (eigene Darstellung).	30
Abbildung 21: Vergleich der Gabel-Minutien im eingescannten Fingerabdruckbild mit dem verarbeiteten Fingerabdruckbild von Stoeter (eigene Darstellung).	32
Abbildung 22: Vergleich der Gabel-Minutien im eingescannten Fingerabdruckbild mit dem verarbeiteten Fingerabdruckbild von GitHub-User „Alilou“ (eigene Darstellung).	33
Abbildung 23: Anzahl der Übereinstimmungen von Gabelpositionen verschiedener Vorverarbeitungsschritte mit dem originalen Scannerbild (eigene Darstellung).	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der mittleren Pixelhelligkeit von sieben verschiedenen Fingerabdruckbildern (eigene Darstellung).....	23
Tabelle 2: Übersicht der Precision-Werte aller Methoden zur Minutien Detektion im Vergleich (eigene Darstellung).	29
Tabelle 3: Übersicht der Trefferquoten verschiedener Vorverarbeitungsarten (eigene Darstellung).....	35

Abkürzungsverzeichnis

AFIS	automatisiertes Fingerabdruck-Identifizierungssystem
CNC	Crossing Number Concept
ROI	Region of Interest
TM	Template Matching

1 Einleitung

Dieses Kapitel erläutert die Motivation und das Ziel der Bachelorarbeit näher.

1.1 Motivation

Im Alltag hinterlassen wir unbewusst überall unsere Fingerabdruckspuren. Diese haften dabei stärker oder weniger stark an den verschiedensten Oberflächen. Auf den ersten Blick wirkt es, als bestünden Fingerabdrücke aus einfachen Linien, welche als Papillarleisten bezeichnet werden. Doch bei genauerer Betrachtung fallen spezielle Formen und Muster auf. Einige besitzen meist eine regelmäßige Form und sind beim ersten Betrachten der Fingerbeere erkennbar. Sie werden Grundmuster genannt. Kleinere Strukturen wiederum, die so genannten Minutien, sind mit bloßem Auge schwer zu erkennen und benötigen daher Hilfsmittel wie einen Fingerabdruckscanner, welcher diese vergrößert und sichtbar macht. Diese Minutien sind dabei in ihrer Form und Ausrichtung im Papillarlinienmuster so individuell, dass sie den Fingerabdruck eines jeden Menschen einzigartig machen. (Labudde & Mohaupt, 2018, p. 144)

Diese Individualität erkannten schon die Chinesen um 2200 v. Chr. Sie versahen Tontafeln und -siegel mit gut ausgeprägten Fingerabdrücken, um den rechtmäßigen Eigentümer zu legitimieren. In Europa erlangte der Arzt Marcellus Malphigius erst viel später um 1686 Erkenntnisse zu den Furchen und Mustern der Handfläche. (Herrmann & Saternus, 2007, p. 102)

Im frühen 19. Jahrhundert befasste sich der Wissenschaftler Johann Evangelista Purkinje erstmals damit die Papillarleistenmuster zu klassifizieren. Er unterteilte diese in neun Grundmustertypen und schuf somit die Basis heutiger Klassifizierungsmethoden. (Herrmann & Saternus, 2007, p. 103)

Wie sein Vorgänger zuvor, suchte auch der englische Anthropologe Francis Galton um 1895 nach einer Möglichkeit die Fingerabdrücke zu klassifizieren. Er legte dabei den Fokus auf die kleinen Feinheiten, die Minutien, die sich durch das Papillarleistenmuster ziehen. Diese stellten sich als entscheidende Merkmale zur modernen Klassifizierung und Unterscheidung von Fingerabdrücken von Personen heraus. (Herrmann & Saternus, 2007, p. 104)

Als erkannt wurde welchen Wert die neu erlangten Erkenntnisse über Fingerabdrücke mit sich brachten, wurde 1903 in Deutschland das Forschungsgebiet der Daktyloskopie eingeführt (Herrmann & Saternus, 2007, p. 105). Der Begriff „Daktyloskopie“ stammt aus dem Griechischen und bedeutet im übertragenen Sinne „Fingerschauen“. Die Daktyloskopie

befasst sich mit dem Wissen von der Identifizierung und Verifizierung von Personen mittels ihrer Fingerabdrücke. (Herrmann & Saternus, 2007, p. 102)

Heutzutage können Grundmuster und Minutien mittels geeigneter Computerprogramme automatisiert bestimmt bzw. detektiert werden. Die Polizei nutzt solche Software, wie das automatisierte Fingerabdruck-Identifizierungssystem (ASIF), um beispielsweise Verbrecher aufgrund ihrer am Tatort hinterlassenen Fingerabdrücke zu identifizieren (Herrmann & Saternus, 2007, p. 107).

1.2 Zielstellung

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der automatisierten Bestimmung von Grundmustertypen sowie die Detektion von Minutien in Papillarlinienmustern eingescannter Fingerabdrücke mittels der Methoden *Template Matching* und *Crossing Number Concept*. Zusätzlich wird näher beleuchtet, wie sich Änderungen in den Vorverarbeitungsschritten zur Verbesserung des gescannten Fingerabdruckbildes auf das Papillarlinienbild auswirken, um eine bestmögliche Analyse zu gewährleisten. Für diese Arbeit fand die Software MATLAB (MathWorks, 1994-2021) mit einer proprietären Programmiersprache Anwendung.

Im Rahmen der Bachelorarbeit bietet sich die Gelegenheit die Fingerabdrücke von verschiedensten Personen zu analysieren und auszuwerten. Hierfür schafft die Hochschule Mittweida gute Rahmenbedingungen zum Absolvieren des Bachelorprojekts. Ein Zugriff auf über 1000 mit einem Scanner aufgenommenen Fingerabdrücke bietet die Möglichkeit eine grundlegende Analyse zu absolvieren.

Durch die Bearbeitung des Themas der Bachelorarbeit können wichtige Erkenntnisse auf die Vielfalt und Individualität der Menschen und deren Fingerabdruckmuster erworben werden. Diese Muster sind besonders einprägsam und bilden ein starkes Fundament bezüglich der Daktyloskopie in der Forensik. In Bezug auf heutige Computertechniken und -programme stellt sich die Frage, wie Fingerabdrücke digital zur Analyse verbessert sowie Grundmuster und Minutien in diesen verarbeiteten Fingerabdruckbildern automatisiert detektiert und hervorgehoben werden können.

Ziel der Bachelorarbeit ist es, bereits vorhandene Ansätze zur Detektion bzw. Erkennung von Grundmustern und Minutien zu nutzen. Diese sollen erweitert sowie miteinander kombiniert werden und somit Möglichkeiten schaffen, um die Analyse von Fingerabdrücken zu verbessern. Die Ansätze dienen der späteren Identifikation und Verifikation eines Menschen. Je präziser das Programm die Fingerabdruckmuster detektieren kann, desto besser lassen sich Menschen anhand ihrer Fingerabdrücke mittels der Technik voneinander unterscheiden und bestimmen. Gleiches gilt für die Anpassung der digitalen Verbesserungsschritte eines Fingerabdrucks, welche der Analyse vorhergehen. Papillarlinien von Fingerabdrücken, welche an Tatorten gefunden werden, können mittels einer guten Vorverarbeitung deutlicher dargestellt und zur Analyse herangezogen werden.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Entstehung und den einzelnen Bestandteilen eines Fingerabdrucks, welche in drei Ebenen unterteilt werden können. Zudem wird geklärt, wie Fingerabdruckbilder zur Analyse verbessert werden und welche Methoden sich zur Bestimmung von Grundmustern und der Detektion von Minutien darbieten.

2.1 Entstehung von Fingerabdrücken

Die Papillarlinien entstehen während der Embryonalentwicklung in der 15. bis 20. Schwangerschaftswoche im Mutterleib (Labudde & Mohaupt, 2018). Sie bilden sich in der Leistenhaut an Hand- und Fußsohlen, wenn sich die Oberhaut zuvor durch starke Blutzufuhr aufbläht und dabei stark gespannt wird. In dieser Phase vermehrt sich die darunterliegende Keimschicht durch Zellteilung. Sobald die Blutzufuhr nachlässt, wird die Vermehrung der Zellen durch Faltung der Epidermisoberseite ausgeglichen. Dabei bildet sich ein zufälliges Papillarleistenbild, welches nicht genetisch bedingt ist. Der Entstehungsprozess der Papillarleisten selbst ist höchstwahrscheinlich mit Genen in einem Genom vorbestimmt. Für das individuelle Aussehen eines Papillarleistenmusters sind verschiedene Faktoren verantwortlich. Dazu zählen beispielsweise die Umstände während der Schwangerschaft wie Stress, Wohlergehen und Ernährung der Mutter. Bis heute kann nicht mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit erklärt werden, wie groß der Einfluss der einzelnen Faktoren bei der Entstehung von Papillarleistenmustern ist. (Maltoni, et al., 2009, p. 34f)

Sicher ist, dass die Papillarleisten eines jeden Menschen einmalig, teilweise zufällig und konstant sind. Das bedeutet, dass es auf der ganzen Welt keine zwei Finger mit identischen Papillarleisten gibt, diese durch einen teilweise zufälligen Prozess entstehen und sich das Muster ein Leben lang nicht ändert. Allerdings können Krankheiten, Verletzungen und das Alter der Person Einfluss auf die Qualität der Papillarleisten nehmen. (Labudde & Mohaupt, 2018, p. 143)

2.2 Drei Ebenen eines Fingerabdrucks

Die Klassifikation von Eigenschaften der Papillarleisten eines Fingerabdruckes kann hierarchisch in drei Hauptebenen und einer zusätzlichen Ebene eingeteilt werden.

2.2.1 Ebene 1 – Grundmuster

Die erste Ebene der Klassifikation eines Fingerabdrucks bilden die Grundmuster. Grundsätzlich werden sechs Arten von Grundmustertypen unterschieden. Es gibt Bögen, welche in flachem Bogen und Tannenbogen unterteilt werden (vgl. Abbildung 1). Des Weiteren gibt es Schleifen, welche sich in linker Schleife, rechter Schleife und Doppelschleife aufteilen lassen sowie ein Wirbelmuster, welches rund bis ellipsenförmig oder spiralförmig auftritt (vgl. Abbildung 1). (Hunger & Leopold, 1978, p. 407)

Die Papillarleisten verlaufen bei flachen Bögen von einer Seite zur anderen (vgl. Abbildung 1, a). Dabei lässt sich in der Mitte ein leichter Anstieg feststellen. Tannenbögen verlaufen wie flache Bögen von einer Seite zur anderen, besitzen aber einen steilen Anstieg sowie Abfall (vgl. Abbildung 1, d). Bei einfachen Schleifenmustern verlaufen die Papillarleisten seitlich aufsteigend und kehren im Anschluss zu ihrem Ausgangspunkt zurück (vgl. Abbildung 1, b und e). Eine besondere Form weist die Doppelschleife auf. Sie besitzt sogenannte Zwillingschleifen, bei welchen die Papillarleisten von der Mitte aus zu verschiedenen Seiten hinlaufen (vgl. Abbildung 1, f). Die Papillarleisten der Wirbel bilden in der Mitte des Grundmusters Kreise, Ellipsen oder Spiralen (vgl. Abbildung 1, c). (Hunger & Leopold, 1978, p. 407f)



(a) Flacher Bogen



(b) Linke Schleife



(c) Wirbel



(d) Tannebogen



(e) Rechte Schleife



(f) Doppelschleife

Abbildung 1: Gängige Grundmuster von Fingerabdrücken (Yager & Amin, 2004).

In Abbildung 1 sind verschiedene Grundmustertypen dargestellt. (a) zeigt einen flachen Bogen, (b) zeigt eine linke Schleife und (c) einen Wirbel. In (d) ist ein Tannebogen zu sehen, (e) zeigt eine rechte Schleife und bei (f) handelt es sich um eine Doppelschleife.

2.2.2 Ebene 2 – Minutien

Die zweite Ebene der Klassifikation eines Fingerabdrucks definieren die Minutien. Minutie bedeutet aus dem Lateinischen übersetzt „Kleinigkeit“. Diese Besonderheiten entstehen durch verschiedene Formen der Unterbrechung in den Papillarleisten. Sie treten dabei zufällig in verschiedenen Formen und Größen sowie an den unterschiedlichsten Positionen im Papillarleistenbild auf. Dabei ist die Anzahl und Position der Minutien besonders entscheidend, um die Fingerabdrücke von Personen eindeutig zu unterscheiden. Die typischsten Minutien, die in den Papillarleisten der Finger vorkommen, sind Endungen, Gabeln, Seen bzw. Augen, eingeschlossene Linien, Punkte, Haken und Kreuzungen (vgl. Abbildung 2). Schon eine kleine Anzahl von 8 bis 15 Minutien reichen, um mit ausreichend großer Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, ob zwei Fingerabdrücke miteinander übereinstimmen. (Maltoni, et al., 2009, p. 99)

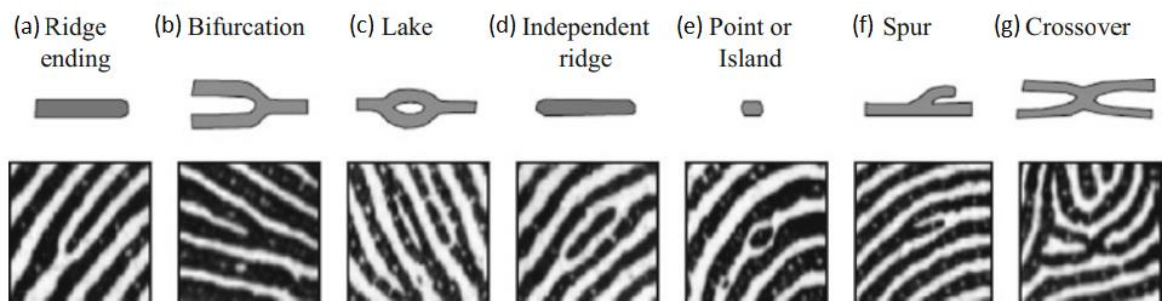


Abbildung 2: Häufig vorkommende Minutien (Maltoni, et al., 2009, p. 99).

In Abbildung 2 sind verschiedene Minutien dargestellt. Dabei ist in der Mitte eine vereinfachte Darstellung der Minutie und darunter dieselbe Minutie der schwarz dargestellten Papillarlinien eines Fingerabdrucks abgebildet. (a) zeigt eine Endung, (b) eine Gabel, (c) einen See und (d) eine eingeschlossene Linie. In (e) ist ein Punkt oder Insel vorhanden, in (f) ein Haken und in (g) eine Kreuzung.

2.2.3 Ebene 3 – Sonstige Beschaffenheiten

Auf der dritten Ebene der Klassifikation eines Fingerabdrucks lassen sich feine Details der Papillarleisten extrahieren. Dazu zählen physikalische Attribute wie die Dicke, Form und Kantenbeschaffenheit der Papillarleisten selbst. (Maltoni, et al., 2009, p. 101)

Ebenso lassen sich die Schweißporen, die sich auf den gesamten Papillarleisten erstrecken, zur Analyse eines Fingerabdrucks heranziehen. Auf einem Zentimeter Papillarleiste, lassen sich neun bis 18 Poren im Durchmesser zwischen 60 und 250µm erkennen (Maltoni, et al., 2009, p. 101). Es existieren Studien, welche sich damit beschäftigen, anhand von 20 bis 40 Poren die Identität einer Person zu bestätigen (Ashbaugh, 1999, p. 161). Das Muster der Poren allein ist allerdings kein sicherer Beweis dafür, dass ein Fingerabdruck einer bestimmten Person zuzuordnen ist. (Maltoni, et al., 2009, p. 101)

Auch Unterbrechungen im Papillarleistenverlauf, welche nicht zu den Minutien gehören, wie Narben und Falten können in der dritten Ebene erhoben werden. Falten können mit

fortschreitendem Alter einer Person entstehen, Narben hingegen können durch Verbrennungen oder Schnittwunden hinzugefügt werden. (Maltoni, et al., 2009, p. 101)

2.2.4 Chemischer Fingerabdruck

Durch die Weiterentwicklung der Analysemöglichkeiten von Fingerabdrücken hat sich eine neue verbesserte Aufnahmetechnik etabliert. Mit dem „chemischen Fingerabdruck“ können zusätzliche personenbezogene Informationen erhoben werden, weshalb der „chemische Fingerabdruck“ manchmal als Erweiterung zur Klassifikation eines Papillarleistenbildes angesehen wird. (Labudde & Mohaupt, 2018, p. 145)

Der „chemische Fingerabdruck“ kann Hinweise auf die Beschaffenheit des Schweißes und anderen Stoffwechselprodukten wie Kot und Urin liefern, mit dem das Geschlecht und das Alter einer Person bestimmt werden können (Mong, et al., 1999, p. 2f). Auch Spuren von Drogen und Sprengstoffen, mit denen eine Person zuvor in Berührung gekommen ist, können nachgewiesen werden (Labudde & Mohaupt, 2018, p. 145).

2.3 Fingerabdruck Verbesserungsprozesse

Sollen die Papillarleisten eines Fingers einer Person untersucht werden, können diese mittels eines speziellen Fingerabdruckscanners entnommen und als Bild abgespeichert werden. Um das Bild des Fingerabdruckes zu verbessern und die Minutien zur Analyse sichtbar zu machen oder Grundmuster zu bestimmen, müssen zunächst einige Verbesserungsschritte erfolgen.

2.3.1 Segmentierung

Den ersten Schritt bildet die Segmentierung. Dabei wird der Vordergrund mit den wichtigen Papillarlinien des Fingerabdrucks vom Hintergrund, der keinerlei Informationen über den Fingerabdruck beinhaltet, getrennt (vgl. Abbildung 3). Dieser Vorverarbeitungsschritt sorgt dafür, dass die Extraktion von Minutien erleichtert wird und keine falschen oder verrauschten Minutien zustande kommen. Das bedeutet, dass Papillarlinien, die sich bei unzureichender Reinigung fälschlicherweise noch auf dem Scanner befinden und somit nicht zum eigentlichen Fingerabdruck gehören, entfernt werden. Fingerabdrücke, welche Überlagerungen im segmentierten Papillarlinienbild zeigen, werden in der Untersuchung nicht beachtet. (Thai, 2003, p. 7)



Abbildung 3: Segmentierungsschritt eines Fingerabdruckes (eigene Darstellung).

Abbildung 3 zeigt das Papillarlinienbild eines Fingerabdrucks aus der Datenbank der Hochschule Mittweida nach Anwendung des Segmentierungsschrittes. Ausgeblendete Bereiche, die nicht zum Fingerabdruck gehören, werden grau dargestellt.

2.3.2 Normalisierung

Der zweite Schritt ist die Normalisierung des Fingerabdruckbildes. Dieser Schritt dient dazu, den Bereich der Graustufenwerte des Bildes anzugleichen, sodass dieser in einem bestimmten Wertebereich liegt (vgl. Abbildung 4). Dazu werden die Graustufenwerte im Bild standardisiert, ohne die Papillarlinienstruktur zu verändern. Somit wird ein gewisser Graustufenwert als Schwellwert festgelegt und alle Pixel im Papillarlinienbild, welche diesen erreichen, erhalten denselben Graustufenwert. Dadurch werden die Papillarlinien im Fingerabdruckbild deutlicher und weitere Verarbeitungsschritte werden erleichtert. (Thai, 2003, p. 7f)

Das Fingerabdruckbild wird für die Untersuchung zusätzlich invertiert, wodurch die Pixel der Papillarlinien weiß und die Hintergrundpixel schwarz werden. Durch den Kontrast lassen sich die Minutien später besser erkennen und im Anschluss leichter extrahieren.



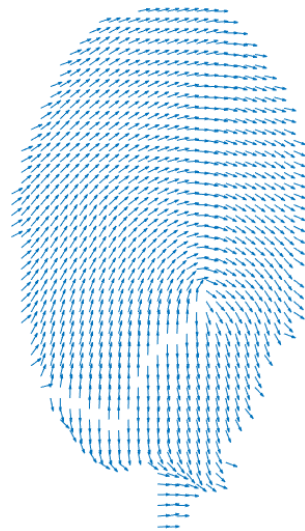
Abbildung 4: Normalisierungsschritt eines Fingerabdruckes (eigene Darstellung).

Abbildung 4 zeigt das Papillarlinienbild eines Fingerabdrucks aus der Datenbank der Hochschule Mittweida nach der Anwendung des Normalisierungsschrittes. Der Fingerabdruck ist als Negativbild der Segmentierung mit Grauwertanpassung abgebildet. Dadurch werden die Papillarlinien weiß dargestellt.

2.3.3 Schätzung der Orientierung

Einen grundlegenden Schritt im Verbesserungsprozess stellt die Schätzung der Orientierung der Papillarlinien dar. Es wird ein Orientierungsfeld des Fingerabdruckbildes erstellt, welches die lokale Ausrichtung der Papillarlinien durch Vektoren, sogenannte Gradienten, definiert (vgl. Abbildung 5). Auf diese lokale Ausrichtung beruht die Gabor-Filterung, ein späterer Schritt der Fingerabdruckverbesserung. Damit das Orientierungsfeld gleichmäßig aussieht, muss es noch mittels eines Gauß-Filters geglättet werden (vgl. Abbildung 5). (Thai, 2003, p. 8ff)

Mit diesem Schritt lassen sich schon erste Tendenzen zum vorhandenen Grundmuster erkennen.



a) Gradientenbild der Orientierung



b) geglättetes Orientierungsbild

Abbildung 5: Schätzung der Orientierung eines Fingerabdruckes (eigene Darstellung).

Abbildung 5 zeigt das Papillarlinienbild eines Fingerabdrucks aus der Datenbank der Hochschule Mittweida nach Anwendung der Orientierungsschätzung. Je dichter die Gradienten sind, desto heller ist dieser Bereich im geglätteten Bild. a) zeigt das Gradientenbild (Vektoren) der Orientierung und b) das geglättete Orientierungsbild.

2.3.4 Schätzung der Papillarlinienfrequenz

Ein weiterer wichtiger Parameter im Verbesserungsprozess des Gabor-Filters ist die Schätzung der Papillarlinienhäufigkeit. Zunächst wird das Bild in quadratische Blöcke unterteilt. Innerhalb jedes Blocks werden die Grauwerte aller Pixel entlang einer Richtung orthogonal zur lokalen Papillarlinienausrichtung projiziert. Mit dieser Projektion bildet sich ein wellenförmiger Graph, deren lokale Minima die Anzahl und Intensitätswerte der Papillarlinien verdeutlichen (vgl. Abbildung 3). (Thai, 2003, p. 10)

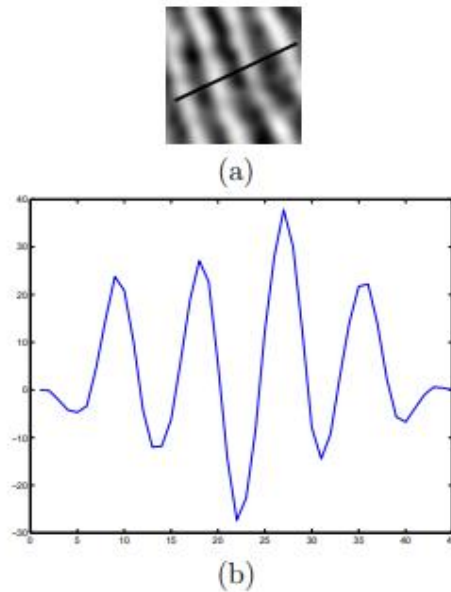


Abbildung 6: Schätzung der Papillarlinienfrequenz eines Fingerabdruckes (Thai, 2003, p. 11).

Abbildung 6 stellt die Projektion der Intensitätswerte der Pixel entlang einer Richtung orthogonal zur lokalen Papillarlinienausrichtung dar. In (a) ist ein Ausschnitt einiger Papillarlinien eines Fingerabdruckbildes erkennbar. Dabei stellt (b) Die zu (a) gehörige Wellenform der Intensitätswerte der Pixel dar. Die lokalen Minima sind hierbei die Papillarlinien und die Maxima die Räume zwischen den Papillarlinien des Fingerabdruckbildes.

2.3.5 Gabor-Filterung

Sind alle Informationen über die Ausrichtung und die Frequenz der Papillarlinien bestimmt, kommt der geradzahlig-symmetrische Gabor-Filter zum Einsatz. Dieser wird eingesetzt, da er selektive Eigenschaften in Frequenz und Orientierung aufweist. Dadurch kann der Filter so angepasst werden, dass er nur auf bestimmte Ausrichtungen und Frequenzen im Fingerabdruckbild reagiert und somit das Rauschen reduziert, ohne die Papillarlinienstruktur zu zerstören. Als Rauschen im Papillarlinienbild werden verzerrte Papillarlinien bezeichnet, die durch Verwischen am Scanner entstanden sind. Angewendet wird der Gabor-Filter, indem das Fingerabdruckbild mit diesem Filter räumlich gefaltet wird. (Thai, 2003, p. 12ff)

2.3.6 Binarisierung

Der nächste Schritt zur Verbesserung des Fingerabdruckbildes ist die Binarisierung. Im Binarisierungsprozess wird das Graustufenbild in ein Binärbild umgewandelt. Dazu wird ein Schwellwert festgelegt und der Graustufenwert jedes Pixels betrachtet. Wird der Schwellwert überschritten, wird der Pixelwert auf Eins gesetzt, andernfalls auf Null. Das heißt die Papillarlinien werden zu weißen Pixeln und der Hintergrund des Bildes, welcher keine Papillarlinien aufweist, wird zu schwarzen Pixeln. (Thai, 2003, p. 14)



Abbildung 7: Binarisierungsschritt eines Fingerabdruckes (eigene Darstellung).

Abbildung 7 zeigt das Papillarlinienbild eines Fingerabdrucks aus der Datenbank der Hochschule Mittweida nach Anwendung des Binarisierungsschrittes. Die Papillarlinien des Fingerabdruckbildes sind als weiße Pixel dargestellt, der Hintergrund als schwarze Pixel.

2.3.7 Thinning

Der letzte Schritt der Verbesserung besteht aus dem sogenannten *Thinning*. Dies ist die Ausdünnung des binären Fingerabdruckbildes, bei dem die Pixel im Vordergrund, also die der Papillarlinien, immer weiter entfernt werden, bis sie nur noch einen Pixel breit sind. Dieser Vorgang wird als Subiteration bezeichnet. Dabei wird die Nachbarschaft von jedem Pixel im Binärbild betrachtet und entschieden, ob der Pixel gelöscht werden kann oder nicht. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis kein Pixel mehr zum Löschen vorhanden ist. Somit entsteht eine Art Skelettbild zum binären Fingerabdruckbild, bei welchem nur noch dünne Linien mit einer Pixelbreite von Eins vorhanden sind. (Thai, 2003, p. 15)



Abbildung 8: Normalisierungsschritt eines Fingerabdruckes (eigene Darstellung).

Abbildung 8 zeigt das Papillarlinienbild eines Fingerabdruckes aus der Datenbank der Hochschule Mittweida nach Anwendung des Thinnings. Die weißen Papillarlinien sind auf einen Pixel in der Breite ausgedünnt wurden.

2.4 Verfahren zur Analyse von Fingerabdruckmustern

Sobald das Bild des Fingerabdruckes auf die Breite von einem Pixel ausgedünnt ist, können die Minutien detektiert werden. Auch die Grundmustertypen lassen sich mittels anderer Verbesserungsschritte wie die Orientierung der Papillarlinien bestimmen. Es gibt dazu verschiedene Möglichkeiten, um dieses Ziel zu erreichen.

2.4.1 Crossing Number Concept

Das *Crossing Number Concept (CNC)* ist ein regelbasiertes Verfahren. Dabei sind die Minutien in einem 3x3 Pixel großen Raster unter bestimmter Anordnung der Papillarlinienpixel festgelegt. Dies ist die gängigste Methode, um Minutien zu detektieren. Minutien, die mit dem CNC detektiert werden können, sind Endungen und Gabeln. Beim CNC wird mittels eines Algorithmus für jedes Pixel, welches auf einer Papillarlinie liegt, ein 3x3 Pixel großes Raster darum erzeugt. Als nächstes wird die Pixelnachbarschaft des Papillarpixels betrachtet. Dabei wird die Anzahl der Papillarpixel um den mittleren Pixel herum ermittelt. Je nachdem wie viele Nachbarn dieser Pixel besitzt, ergibt dies eine andere Minutie. Gibt es keine Pixelnachbarn handelt es sich um einen Punkt. Bei einem weiteren Nachbarn ist von einer Endung die Rede (vgl. Abbildung 9). Gabeln ergeben sich bei drei Pixelnachbarn (vgl. Abbildung 10). Sind nur zwei Nachbarn vorhanden, liegt der Pixel auf einer Papillarlinie und bildet keine Minutie. (Golabi, et al., 2012, p. 516)

Für Endungen und Gabeln ergeben sich folgende Möglichkeiten an Pixelkonstellationen:

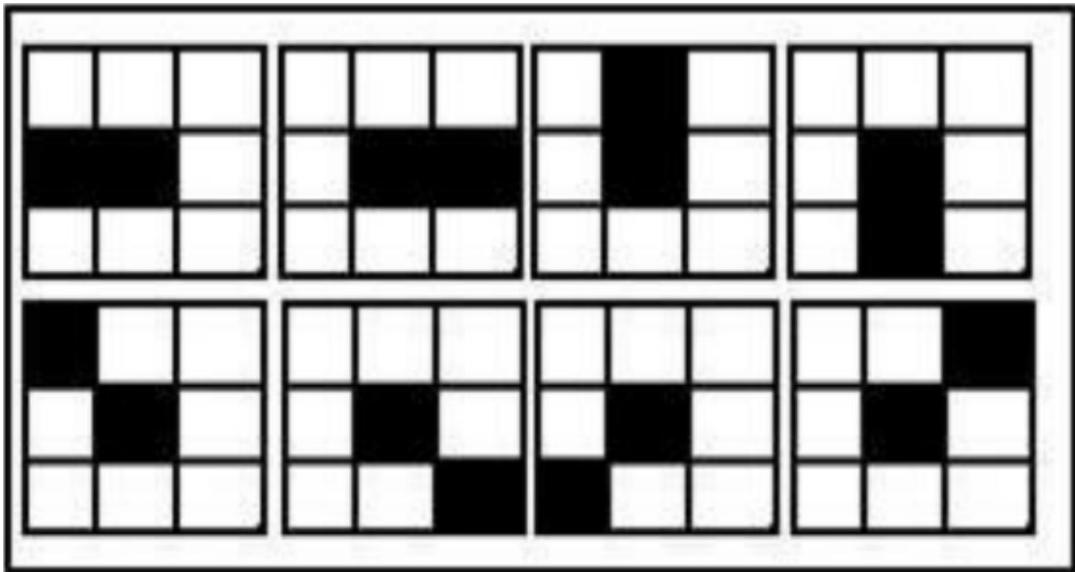


Abbildung 9: Mögliche Pixelkonstellationen für Endungen (Golabi, et al., 2012, p. 516).

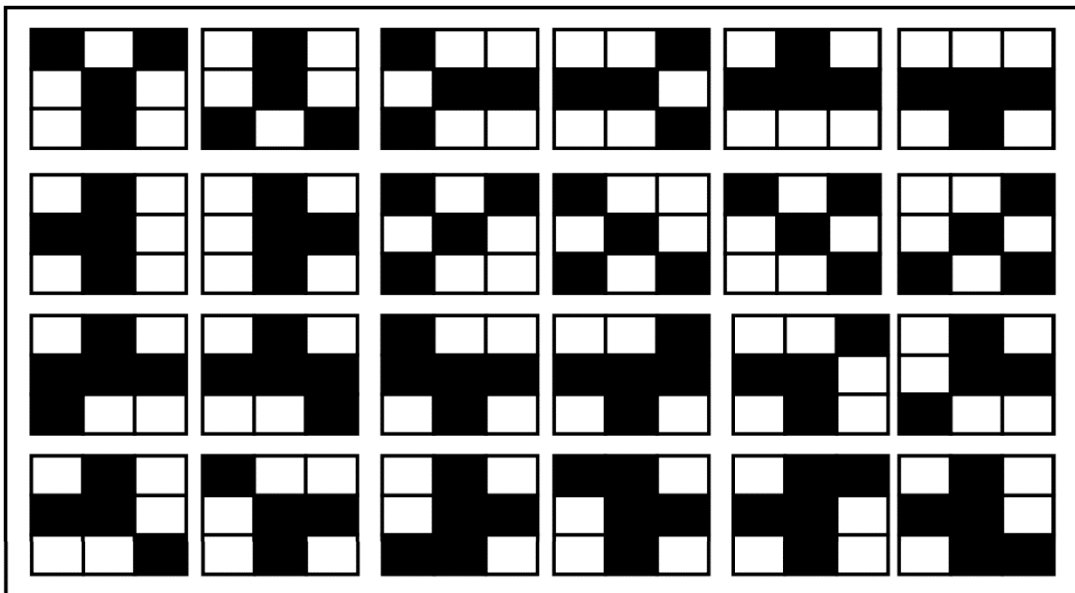


Abbildung 10: Mögliche Pixelkonstellationen für Gabeln (Golabi, et al., 2012, p. 516).

Abbildung 9 zeigt die acht möglichen Pixelkonstellationen zur Darstellung einer Endung mittels CNC. Abbildung 10 zeigt die 24 möglichen Pixelkonstellationen zur Darstellung von Gabeln mittels CNC.

Es muss beachtet werden, dass Minutien nicht in allen Bildbereichen entnommen werden können. Gerade im Randbereich des Fingerabdrucks kann es zu irreführenden Endungen kommen. Dies bedarf einer Eingrenzung des Fingerabdrucks mittels eines festgelegten Abstands vom Bildrand. Dazu wird analysiert, wie sich die Papillarlinien am Rand ausrichten. Diese Ausrichtung wird verlängert und wenn sich nach einer gewissen Strecke keine weiteren Papillarlinien anschließen, handelt es sich um künstlich generierte Randminutien, welche ignoriert werden können. (Helml & Scharinger, 2019, p. 34)

Um diese Randminutien auszuschließen, wird eine *Region of Interest (ROI)* festgelegt, welche den segmentierten Bereich des Fingerabdrucks verkleinert und somit einen Bereich bildet, in dem Minutien detektiert werden können (Barham & Mousa, 2011). (vgl. Abbildung 11)



Abbildung 11: Generierte Region of Interest an einem Fingerabdruck (eigene Darstellung).

Abbildung 11 zeigt das ausgedünnte Papillarlinienbild eines Fingerabdrucks aus der Datenbank der Hochschule Mittweida. Darauf ist die ROI als hellgrauer, halbtransparenter Bereich dargestellt, welcher dafür sorgt, dass Randminutien ausgeschlossen werden.

Einige Papillarlinienstrukturen besitzen einen ähnlichen Aufbau, wie Endungen und Gabeln. Diese sollen beim CNC allerdings nicht berücksichtigt werden. Damit diese nicht als Minutien ausgegeben werden, erfolgt eine Fehlerbehebung. Dafür wird die Distanz betrachtet, in welche sich zwei gefundene Minutien zueinander befinden. Das System entscheidet anschließend, ob es sich um eine Minutie handelt oder nicht (vgl. Abbildung 12). Es wird ein Schwellwert festgelegt, wie weit zwei Minutien mindestens entfernt sein müssen, um als richtige Minutien detektiert zu werden. Wird dieser Schwellwert zwischen zwei Endungen, zwischen zwei Gabeln oder zwischen einer Endung und einer Gabel unterschritten, kann die gefundene Papillarlinienstruktur entfernt werden und gilt nicht als Minutie. (Barham & Mousa, 2011, p. 44)

Es gibt sieben Typen von Papillarlinienstrukturen, die vom System als falsche Minutien interpretiert werden können:

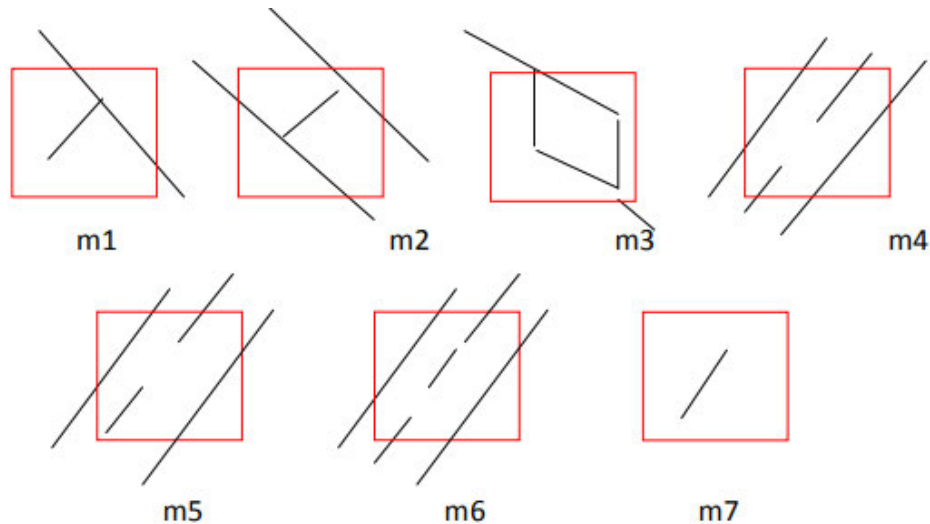


Abbildung 12: Papillarlinienstrukturen, die vom System als falsche Minutien interpretiert werden können (Barham & Mousa, 2011).

Abbildung 12 zeigt die Papillarlinienstrukturen, welche möglicherweise als falsche Minutien interpretiert werden können. *m1* zeigt das Schema einer Hakenstruktur, bei der die Gabel auf einer Seite abgebrochen wird. Das Schema in *m2* ist eine Kreuzungsstruktur, bei der zwei Papillarlinien verbunden werden. *m3* verdeutlicht das Schema einer Augenstruktur, bei der zwei Gabeln sehr nah aneinander detektiert werden können. Die Schemen von *m4* bis *m7* zeigen eingelagerte Linien, bei denen Endungen sehr nah aneinander detektiert werden können.

2.4.2 Template Matching

Für das *Template Matching* werden Referenzbilder, sogenannte *Templates*, von Minutien erstellt. Das *Template Matching* kann auf zwei verschiedene Arten durchgeführt werden. Die erste Möglichkeit besteht darin, das Graustufenbild des Fingerabdruckes zu verwenden und daraus Minutien-*Templates* zu erstellen. Dies verlangt einen komplexeren Algorithmus, aufgrund des Rauschens im Bild, welches durch geringe Bildqualität verursacht wird. Die andere Möglichkeit ist, die Minutien-*Templates* für das ausgedünnte Binärbild zu erstellen und darauf anzuwenden. Dazu werden die Minutien typischerweise in ein 3x3 Pixel großes Raster abgelegt, welches dem Schema des *Crossing Number Concepts* entspricht (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10). (Tian & Peng, 2012)

Das Grundprinzip des *Template Matchings* besteht darin, das ausgedünnte Bild des Fingerabdruckes Stück für Stück abzuscannen und zu untersuchen, ob das *Template* der Minutie darin wiedergefunden werden kann. Durch eine Korrelationsfunktion wird ermittelt, ob es Ähnlichkeiten zwischen dem *Template* und dem verarbeiteten Bild eines Fingerabdruckes gibt bzw. ob das *Template* oder Teile davon im Bild vorhanden sind. Die Pixelkoordinaten mit der höchsten Übereinstimmung werden anschließend als *Match* ausgegeben. (Baohua, et al., 2009, p. 809)

Dasselbe Prinzip kann auch auf die Grundmuster angewendet werden. Dafür wird je ein *Template* zum Orientierungsfeld des jeweiligen Grundmustertyps erstellt und es werden alle *Templates* mit dem Orientierungsfeld eines ausgewählten Fingerabdruckes korreliert. Durch einen Entscheidungsalgorithmus wird das Grundmuster durch die höchste Übereinstimmung mit einem *Template* bestimmt. (bereitgestellt von S. Stoeter, zum Zeitpunkt des Bachelorprojektes ehemalige wissenschaftliche Mitarbeiterin der Hochschule Mittweida)

3 Vorgehensweise

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der automatisierten Detektion von Fingerabdruckmustern, den verschiedenen Methoden zur Detektion und Bestimmung dieser Muster sowie den Vergleich des Erscheinungsbildes der Fingerabdrücke durch Änderung in den Vorverarbeitungsschritten, die während des Bachelorprojektes zum Einsatz kamen. Die jeweiligen Programme wurden hierfür mit der Software MATLAB (MathWorks, 1994-2021) umgesetzt. Mit MATLAB wurden bereits viele Funktionen zur Bildverarbeitung in der Daktyloskopie entwickelt und veröffentlicht.

3.1 Grundmusterbestimmung mittels Template Matching

Die Idee der Grundmusterbestimmung beruht auf einer Kombination der Berechnung der Pixelhelligkeit eines Fingerabdrucks und aktuellen *Template Matching* Verfahren. Dies wurde während des Bachelorprojektes von S. Stoeter, zu diesem Zeitpunkt ehemalige wissenschaftliche Mitarbeiterin der Hochschule Mittweida, bereitgestellt. Zunächst wird der Zentroid, also der geometrische Schwerpunkt, des segmentierten Fingerabdruckes ohne unwichtigen Hintergrund bestimmt. Dies dient der Unterscheidung flacher Bögen von anderen Grundmustern, da diese im Orientierungsfeld keinen erkenntungsspezifischen Bereich und dadurch eine höhere mittlere Pixelhelligkeit aufweisen. Beim flachen Bogen sind keine auffällig dunklen Bereiche erkennbar wie bei anderen Grundmustertypen (vgl. Abbildung 13).

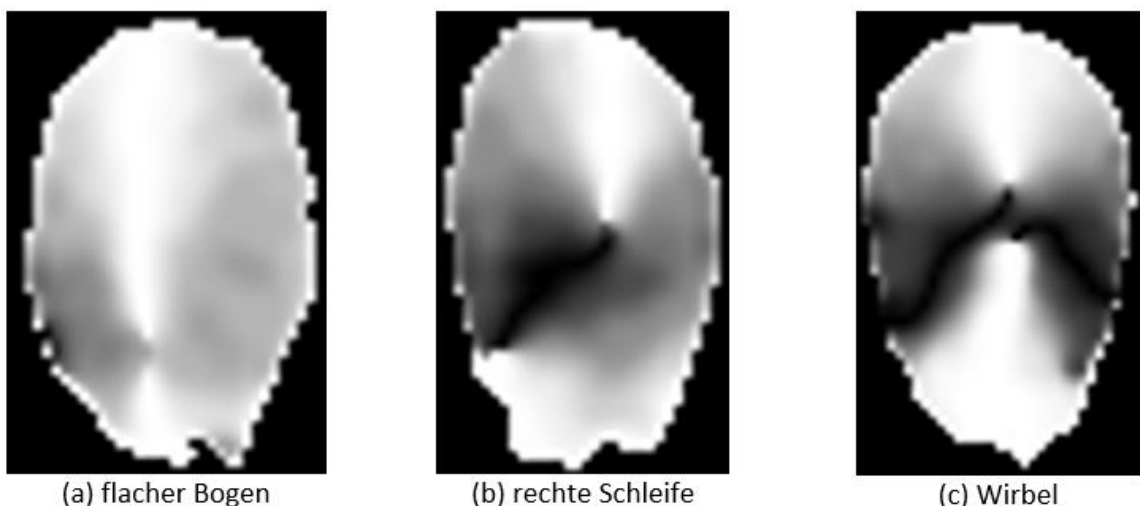


Abbildung 13: Orientierungsfelder ausgewählter Grundmuster (eigene Darstellung).

Abbildung 13 zeigt die Orientierungsfelder eines flachen Bogens in (a), einer rechten Schleife in (b) und eines Wirbels in (c). Es ist ein deutlicher Unterschied in den erkenntungsspezifischen Bereichen

zu erkennen. Der flache Bogen weist keinen erkenntungsspezifischen Bereich auf. Bei der rechten Schleife erstreckt dieser sich von der Mitte nach links außen und beim Wirbel erstreckt sich ein dunkler Bereich von der Mitte nach links sowie einer von der Mitte nach rechts außen.

Um den errechneten Zentroiden wird ein Feld in der Größe von 180x230 Pixel ausgeschnitten und von diesem wird die mittlere Pixelhelligkeit bestimmt. Um flache Bögen von anderen Grundmustertypen zu separieren, wird ein Schwellwert für die mittlere Pixelhelligkeit von 0,715 festgelegt, da die mittleren Pixelhelligkeiten der meisten Fingerabdrücke mit anderen Grundmustern unter diesem Wert liegen. Liegt die mittlere Pixelhelligkeit über diesen Schwellwert, so handelt es sich bei dem zu analysierenden Fingerabdruck um einen flachen Bogen (vgl. Abbildung 14). Wird der Schwellwert unterschritten, folgt das *Template Matching* zur weiteren Bestimmung des Grundmusters. Als *Templates* der Grundmuster dienen jeweils ein Ausschnitt der Orientierungsfelder einer linken Schleife, einer rechten Schleife und eines Tannenbogens sowie zwei verschiedene Ausschnitte von Doppelschleifen und von Wirbeln (vgl. Abbildung 14). Die *Templates* werden danach einzeln mit dem Orientierungsfeld des zu untersuchenden Fingerabdrucks korreliert und die Übereinstimmungswerte berechnet. Durch einen Entscheidungsalgorithmus wird die größte Übereinstimmung mit einem *Template* samt dem zugehörigen Grundmuster ausgegeben. Im Anschluss lässt sich das bestimmte Grundmuster mit dem eigentlichen Grundmuster des Fingerabdrucks vergleichen und die *Precision* des Verfahrens bestimmen.

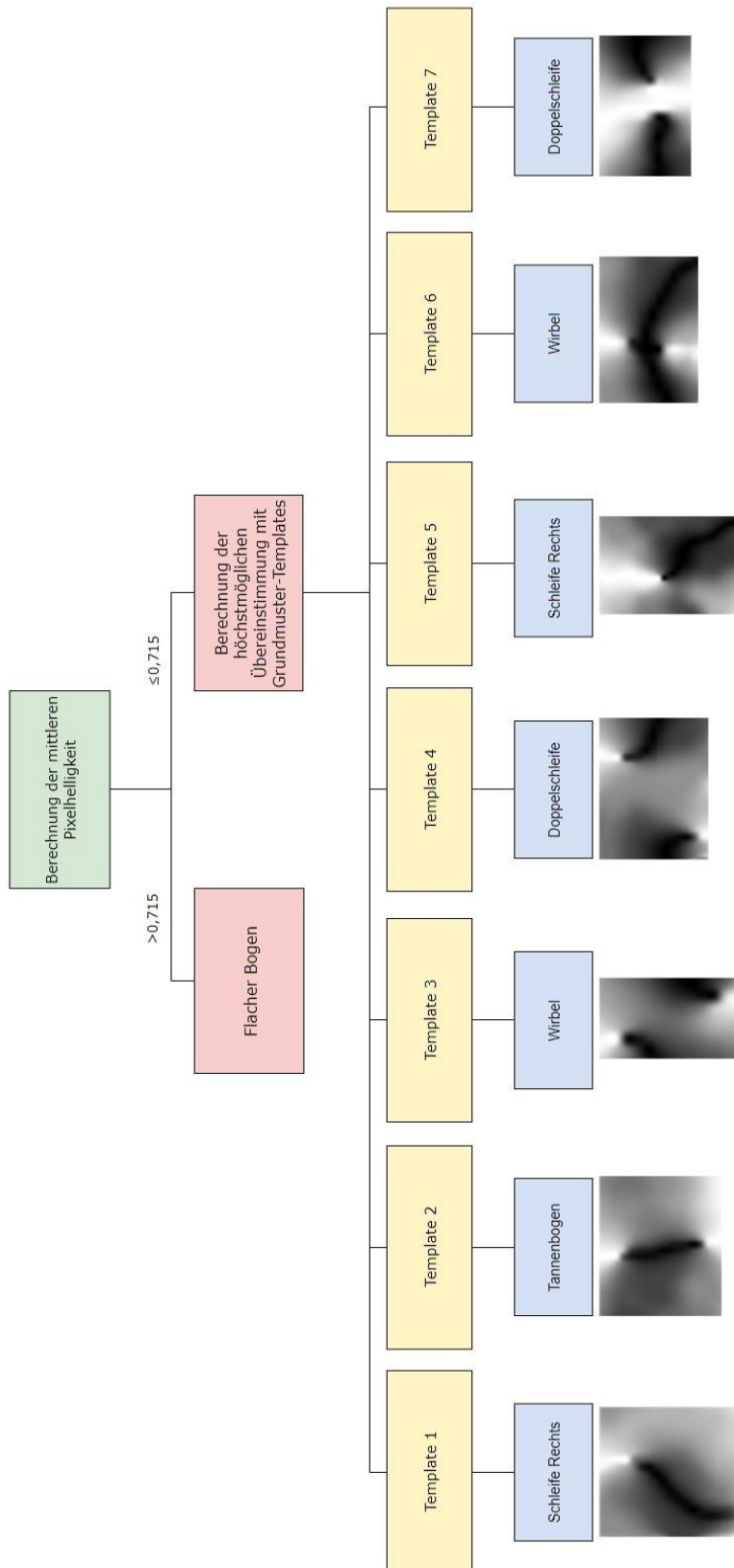


Abbildung 14: Entscheidungsbaum zur Bestimmung der Grundmustertypen (eigene Darstellung).

In Abbildung 14 ist der Entscheidungsbaum zur Bestimmung der Grundmustertypen mit Templates dargestellt. Als Templates dienen die erkenntnispezifischen Merkmale in den Orientierungsfeldern, welche am unteren Ende des Baumes zu finden sind. In der Wurzel des Baumes wird die mittlere Pixelhelligkeit berechnet. Wird ein Wert von 0,175 überschritten, wird ein flacher Bogen bestimmt. Wird der Wert erreicht bzw. unterschritten, erfolgt ein Template Matching und das Template mit dem höchsten Übereinstimmungswert samt zugehöriger Grundmustertyp wird ausgegeben.

3.2 Minutien Detektion

3.2.1 Crossing Number Concept

Das *Crossing Number Concept* zur Minutien Detektion ist ein regelbasiertes Verfahren. Das bedeutet, dass die Minutien in ihrem Aussehen als Pixel berechnet werden. Auf Grund der einfacheren Vergleichbarkeit mit anderen Verfahren werden die Minutien lediglich auf Gabeln beschränkt. Als Vorlage des Verfahrens dient der Programmcode des Users „Emu0“ aus GitHub, eine Verwaltungsplattform für Software-Entwicklungsprojekte (emu0 & luisega, 2015).

Es wird zunächst ein Raster der Größe 3x3 Pixel erstellt, welches das ausgedünnte Fingerabdruckbild Stück für Stück durchläuft. Trifft das mittlere Feld des Rasters auf einen Pixel, der zu einer Papillarlinie gehört, werden die Anzahl und Position der Pixel, die ebenfalls zu einer Papillarlinie gehören, berechnet (vgl. Abbildung 10). Bei drei Nachbarpixeln wird das im Raster gefundene Muster als Gabel erkannt und anschließend gelb eingekreist. Zusätzlich wird die Richtung des Verlaufes der Papillarlinie, die zur Gabel gehört, berechnet und markiert. (Golabi, et al., 2012, p. 516)

Da Minutien im Randbereich fälschlicherweise entstehen können, wird eine *Region of Interest (ROI)* eingefügt (vgl. Abbildung 11). Diese schränkt den Bereich, in dem Minutien im Fingerabdruck gefunden werden sollen, ein. Zudem können durch Fehlerberechnung (vgl. Kapitel 2.4.1 Crossing Number Concept) zusätzlich falsch detektierte Minutien entfernt werden (vgl. Abbildung 12). Dies betrifft zum Beispiel einer Gabel ähnliche Muster, die aufgrund eines zu kurzen Papillarlinienstrangs eher als Haken gesehen werden können. (Barham & Mousa, 2011)

3.2.2 Template Matching

Als Vorlage für das *Template Matching* dient der Programmcode des Users „aaronmatlab“ (aaronmatlab, 2012). Aufgrund des zeitlich begrenzten Projektrahmens und der einfacheren Vergleichbarkeit beschränken sich die Minutien im *Template Matching* ausschließlich auf Gabeln. Es werden in diesem Verfahren die Minutien im ausgedünnten Fingerabdruckbild betrachtet. Als Minutien *Templates* dienen 24 3x3 Pixel große Raster, in denen die Pixelkonstellationen von Gabelmustern gezeichnet sind (vgl. Abbildung 15). Dies erfolgte

mittels des Bildbearbeitungsprogramms *Paint*. Die Pixelkonstellationen der Gabelmuster beziehen sich dabei auf diese des *CNC* (vgl. Abbildung 10). Die *Templates* werden dabei mit dem ausgedünnten Papillarlinienbild des zu untersuchenden Fingerabdrucks korreliert. Dabei wird eine sogenannte *Correlation-Map* erstellt, die je nach Stärke der Übereinstimmung mit einem *Template* heller erscheint. Wenn diese Übereinstimmung einen Schwellwert von 1 im Index, also der Helligkeit, der *Correlation-Map* erreicht, wird an dieser Stelle eine Gabel gefunden. Diese wird dann im ausgedünnten Fingerabdruck mit einem gelben Quadrat markiert. Durch eine leichte Verschiebung der Koordinaten in der *Correlation-Map* müssen die Markierungen der Gabeln im ausgedünnten Fingerabdruckbild um $x+1$ und $y+1$ verschoben werden. Es wird zusätzlich eine *ROI* eingeführt, um fehlerhafte Randminutien zu entfernen. (Baohua, et al., 2009, p. 809)

Bei einem weiteren Versuch des *Template Matchings* kommen 5×5 bis 9×9 Pixel große *Templates* zum Einsatz, um Gabel ähnliche Muster, wie Haken, zu entfernen, welche bei 3×3 Pixel großen *Templates* markiert werden (vgl. Abbildung 15). Aufgrund des zum Teil sehr spezifischen Erscheinungsbildes der Papillarlinien im ausgedünnten Fingerabdruckbild, sind mehr als 70 *Templates* für Gabeln notwendig, um diese detektieren zu können. Um noch mehr Gabeln detektieren zu können, werden noch weitaus mehr *Templates* benötigt, doch aufgrund des begrenzten Zeitraumes sind nicht mehr angefertigt worden. Wie beim Versuch zuvor werden die *Templates* und das ausgedünnte Fingerabdruckbild korreliert und eine *Correlation-Map* erstellt. Der Schwellwert des Indexes liegt diesmal bei 0,8. Wird dieser Wert erreicht bzw. überschritten, wird an den entsprechenden Koordinaten in der *Correlation-Map* eine Minutie erkannt und mit einem gelben Quadrat markiert. Aufgrund der geringeren Größe des korrelierten Bildes kommt es zu Verschiebung der Koordinaten im ausgedünnten Papillarlinienbild. Deshalb müssen die Koordinaten der markierten Gabeln im ausgedünnten Fingerabdruckbild um $x+3$ sowie $y+3$ angepasst werden. Auch hier existiert eine *ROI* zum Ausschluss von Randminutien.



(a) 3x3 Pixel Template (b) 9x9 Pixel Template

Abbildung 15: Beispiele für Gabel-Templates (eigene Darstellung).

In Abbildung 15 sind zwei verschiedene Gabel-Templates dargestellt. (a) zeigt ein hellbraunes Template für die Größe von 3×3 Pixel und (b) zeigt ein rotes Template für die Größe 9×9 Pixel. Der Hintergrund wird wie im ausgedünnten Fingerabdruckbild schwarz dargestellt.

3.2.3 Kombination aus Crossing Number Concept und Template Matching

Eine weitere Möglichkeit zur Minutien Detektion stellt die Kombination aus *Crossing Number Concept* und dem *Template Matching* Verfahren dar. Dabei wird zunächst das *Crossing Number Concept* auf das vorverarbeitete Fingerabdruckbild angewandt und fehlende Gabel-Minutien als *Templates* mittel *Paint* erstellt. Diese *Templates* besitzen dabei eine Größe von 9x9 Pixel. Bei einem weiteren Durchlauf mit den entsprechend angelegten *Templates*, werden sowohl Gabeln, die durch das *CNC* detektiert werden, als auch Gabeln, die mittels der *Templates* erfasst werden, auf dem ausgedünnten Fingerabdruck markiert. Durch unterschiedliche Farbmarkierungen ist eine Unterscheidung der Art und Weise der gefundenen Gabel-Minutien möglich. Gabeln, die mittels des *Crossing Number Concepts* gefunden werden, sind mit einem gelben Kreis markiert. Gabeln, die mittels *Template Matching* gefunden werden, sind mit einem grünen Kreis markiert. Durch eine *ROI* werden Randminutien außenvor gelassen.

3.3 Vergleich verschiedener Änderungen in Verbesserungsprozessen am Fingerabdruckbild

Verschiedene Methoden der Detektion und Erkennung von Papillarlinienmustern in verarbeiteten Fingerabdruckbildern haben gezeigt, dass Gabel-Minutien und Grundmuster sehr präzise bestimmt werden können. Die Verarbeitung von Fingerabdruckbildern läuft dabei stets in derselben Reihenfolge ab. Als erstes erfolgt die Segmentierung. Darauf folgen die Normalisierung, die Berechnung der Orientierung und Frequenz von Papillarlinien, der Gabor-Filter sowie die Binarisierung und letztlich das *Thinning* (vgl. Kapitel 2.3 Fingerabdruck Verbesserungsprozesse). Dabei können Veränderungen innerhalb der Vorverarbeitungsschritte Auswirkungen auf das Erscheinungsbild des Fingerabdrucks haben und somit die Anzahl und Position der Minutien im ausgedünnten Fingerabdruckbild beeinflussen. Dazu zählen die Binarisierung und das *Thinning* als alleinstehende Vorverarbeitungsschritte sowie die Parameterwahl in den Schritten Orientierungs- und Frequenzberechnung der Papillarlinien und Gabor-Filter. Ein Versuch soll zeigen, wie sich diese Vorverarbeitungsschritte bzw. die Größe der verwendeten Parameter auf das Erscheinungsbild des Fingerabdrucks auswirken.

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu den Versuchen der Grundmusterbestimmung und Minutien Detektion sowie der Vergleich verschiedener Änderungen der Vorverarbeitungsschritte dargelegt und mögliche Fehler diskutiert.

4.1 Grundmusterbestimmung

Zur Bestimmung der Grundmuster lagen insgesamt 60 Fingerabdruckbilder vor. Darunter waren jeweils zehn Fingerabdrücke vom Grundmustertyp flacher Bogen, Tannenbogen, rechte bzw. linke Schleife und Doppelschleife sowie zehn Fingerabdrücke vom Grundmustertyp Wirbel. Um zunächst flache Bögen von anderen Grundmustertypen zu separieren, wurde mittels des Zentroiden des Fingerabdrucks ein fester Bereich mit der Größe 180x230 Pixel um diesen Zentroiden herum festgelegt, in welchem die mittlere Pixelhelligkeit ermittelt wurde.

Je nach Position des Zentroiden fällt die mittlere Pixelhelligkeit unterschiedlich aus. Die geringste mittlere Pixelhelligkeit, die bei flachen Bögen ermittelt werden konnte, beträgt 0,6721 (vgl. Tabelle 1 (8DB99)). Da auch andere Grundmustertypen diesen Wert teilweise überschreiten, ist er als Schwellwert nicht geeignet. Letztendlich wird ein Schwellwert von 0,715 für flache Bögen festgelegt, da ein Großteil der anderen Grundmustertypen diesen Wert nicht überschreiten (vgl. Tabelle 1 (4CG99)). Eine Ausnahme stellt hierbei die Doppelschleife des Fingerabdrucks 6SG00 dar (vgl. Tabelle 1 (6SG00)).

Tabelle 1: Vergleich der mittleren Pixelhelligkeit von sieben verschiedenen Fingerabdruckbildern (eigene Darstellung).

Fingerabdruck-ID	Grundmuster	Mittlere Pixelhelligkeit
4CG99	Flacher Bogen	0,7158
8DB99	Flacher Bogen	0,6721
4KR00	Tannenbogen	0,7196
7AS98	Schleife rechts	0,6421

2BR01	Wirbel	0,5802
4SG98	Doppelschleife	0,3016
6SG00	Doppelschleife	0,7725

Nach Verwendung der mittleren Pixelhelligkeit und des *Template Matchings* werden neun flache Bögen, vier Tannenbögen, acht rechte Schleifen, neun linke Schleifen, neun Wirbel und eine Doppelschleife richtig erkannt (vgl. Abbildung 16). Von insgesamt 60 Fingerabdruckbildern werden mit dieser Methode 40 Grundmustertypen richtig und 20 falsch erkannt. Dies ergibt eine *Precision* von 66,67%.

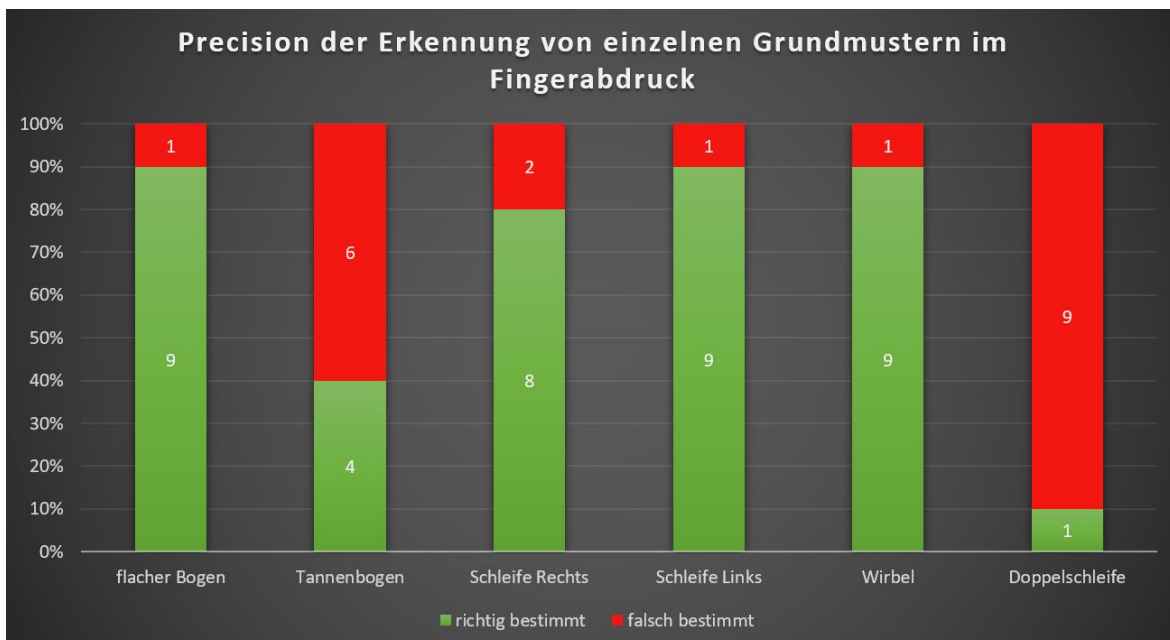


Abbildung 16: Verteilung der Erkennung einzelner Grundmuster in 60 Fingerabdrücken (eigene Darstellung).

Das Säulendiagramm in Abbildung 16 zeigt die Verteilung der Grundmustertypen flacher Bogen, Tannenbogen, Schleife rechts und links sowie Wirbel und Doppelschleife in einem Fingerabdruck. Dabei werden die Grundmuster unterteilt in richtig bestimmte (grün) und falsch bestimmte (rot) Muster. Die *Precision* wird in Prozent angegeben.

Durch Hinzufügen einer großen Anzahl weiterer Fingerabdruckbilder lässt sich die *Precision* noch besser bestimmen. Schwächen zeigt die Methode der Grundmusterbestimmung in der Wahl des Zentroiden zur Separierung von flachen Bögen und anderen Grundmustertypen auf, da dieser teilweise an einer Position im Orientierungsfeld des Fingerabdruckbildes erscheint, an dem keine erkenntungsspezifischen Merkmale des Grundmusters erkennbar sind (vgl. Kapitel 3.1 Grundmusterbestimmung mittels *Template Matching*). Besonders

bei Doppelschleifen tritt dieses Phänomen auf, weswegen diese manchmal den Schwellwert von 0,715 überschreiten und als flache Bögen identifiziert werden. Befindet sich der Zentroid an einer Position im Orientierungsfeld mit erkenntungsspezifischem Merkmal, wird bei Doppelschleifen sehr oft nur eines von beiden Merkmalen erkannt und es kommt häufig zu Fehlinterpretationen seitens des Algorithmus. Überwiegend tritt eine hohe Übereinstimmung mit dem *Template* der linken Schleife auf.

4.2 Minutien Detektion

Für die Detektion der Minutien werden 30 verschiedene Fingerabdruckbilder zur genaueren Analyse herangezogen. Aufgrund des zeitlich begrenzten Rahmens des Projektes und um einen besseren Vergleich zu erzielen, beschränken sich die Minutien ausschließlich auf Gabeln. Zunächst werden Minutien manuell auf dem ausgedünnten Fingerabdruckbild zum Vergleich der *Precision* der einzelnen Methoden markiert (vgl. Abbildung 17, a). In den 30 Fingerabdrücken sollen insgesamt 507 Gabel-Minutien detektiert werden.

Zunächst wird das *Template Matching* Verfahren an Fingerabdruck 10FG97 genauer betrachtet. Der erste Versuch erfolgt mit den 3x3 Pixel großen *Templates*, welche sich an der Pixelorientierung des *CNC* orientieren (vgl. Abbildung 10). Wird diese Methode mit dem Fingerabdruck mit den manuell detektierten Gabel-Minutien verglichen, ist festzustellen, dass die meisten Gabeln an richtiger Position detektiert werden (vgl. Abbildung 17, b). Es werden mit dieser Methode auch viele andere Minutien detektiert, welche nicht als Gabel definiert werden können (vgl. Abbildung 17, b). Diese werden als falsch positiv ausgegeben. Um diese falsch positiven Minutien zu reduzieren, werden die *Templates* vergrößert und damit auf die Gabeln angepasst. Das führt dazu, dass für jede Gabel im ausgedünnten Fingerabdruckbild ein *Template* erstellt werden muss. Aufgrund des hohen Zeit- und Rechenaufwandes werden nur 70 Gabel-*Templates* erstellt und demzufolge nur wenige Gabel-Minutien im Fingerabdruck richtig bzw. überhaupt detektiert (vgl. Abbildung 17, c).

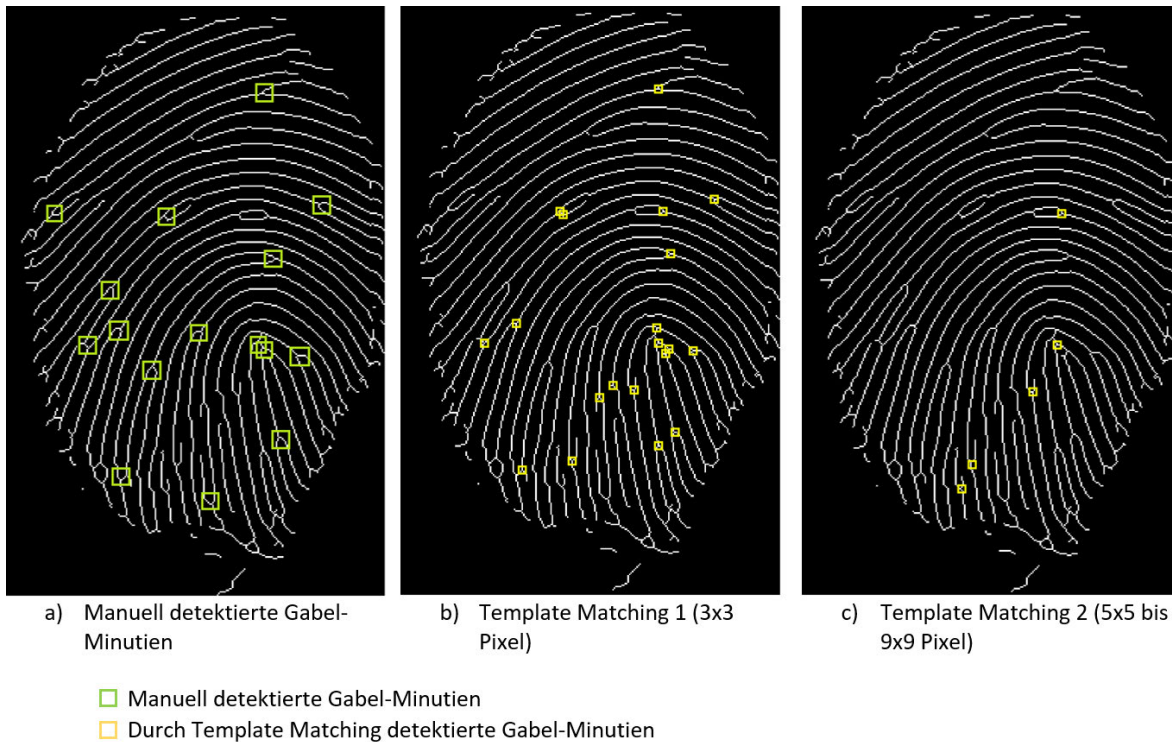


Abbildung 17: Vergleich zwei verschiedener Template Matching Verfahren (eigene Darstellung).

Abbildung 17 zeigt eine Gegenüberstellung zwei verschiedener Template Matching Verfahren des Fingerabdrucks 10FG97 im Vergleich zur manuellen Detektion von Gabel-Minutien. Teilbild a) zeigt das Papillarlinienbild des Fingerabdrucks mit manuell markierten Gabel-Minutien. Teilbild b) zeigt Gabel-Minutien, welche durch das erste Template Matching Verfahren mit 3x3 Pixel großen Templates, detektiert wurden. In Teilbild c) werden Gabel-Minutien mit dem zweiten Template Matching Verfahren mit 5x5 bis 9x9 Pixel großen Templates gekennzeichnet. Bei der manuellen Detektion werden Gabel-Minutien mit grünen Quadraten und beim Template Matching mit gelben Quadraten markiert.

Im weiteren Verlauf werden das *Crossing Number Concept* und die Kombination aus *Crossing Number Concept* und *Template Matching* am selben Fingerabdruck 10FG97 wie zuvor betrachtet. Mit dem *CNC* werden etwa genauso viele Gabel-Minutien richtig detektiert wie mit dem ersten *Template Matching* Verfahren mit 3x3 Pixel *Templates* (vgl. Abbildung 18, b). Dabei lassen sich weniger falsch positive Gabeln feststellen (vgl. Abbildung 18, b). Durch die Kombination von *CNC* und *Template Matching* können Gabel-Minutien, die bisher noch nicht detektiert wurden, hinzugefügt werden (vgl. Abbildung 18, c). Hierfür sind weniger Gabel-*Templates* notwendig als für das zweite Verfahren des *Template Matchings* mit 5x5 bis 9x9 Pixel großen *Templates*, da die meisten bereits durch das *CNC* detektiert werden (vgl. Abbildung 18, c).

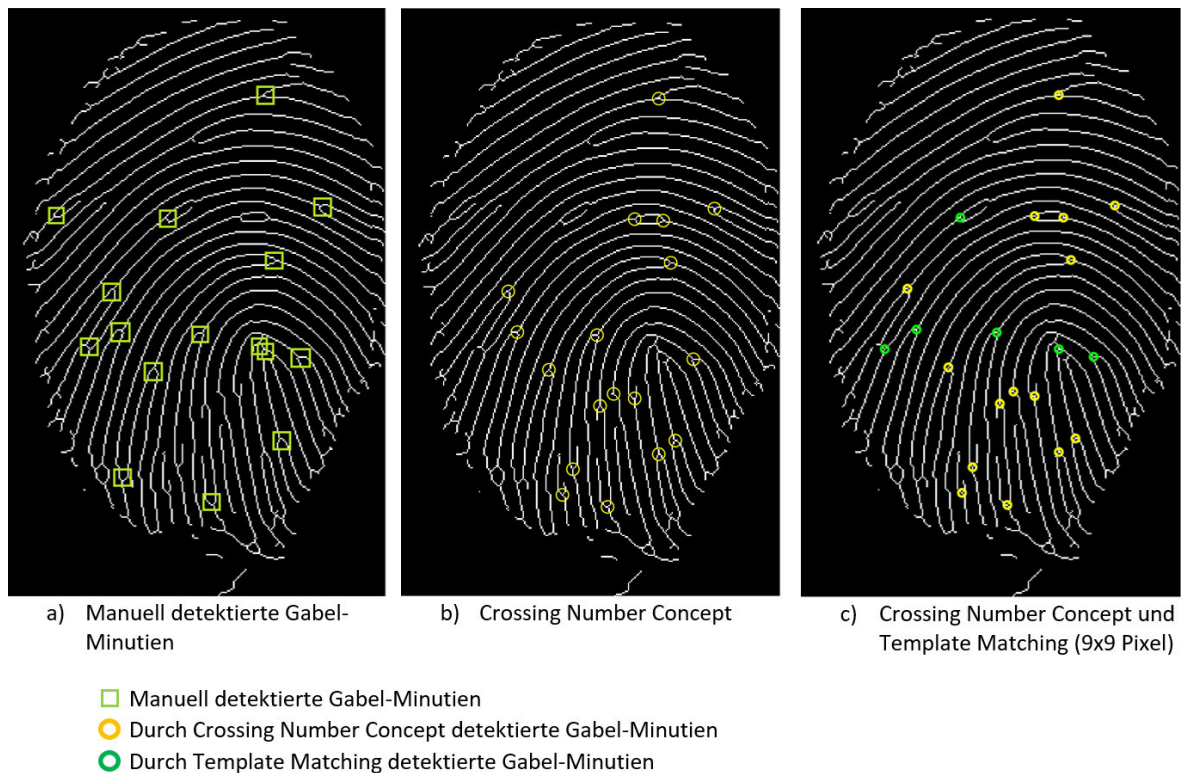


Abbildung 18: Vergleich des CNC und einer Kombination aus CNC mit dem Template Matching Verfahren (eigene Darstellung).

Abbildung 18 zeigt eine Gegenüberstellung vom Crossing Number Concept mit einer Kombination aus CNC und Template Matching Verfahren des Fingerabdrucks 10FG97 im Vergleich zur manuellen Detektion von Gabel-Minutien. Teilbild a) zeigt das Papillarlinienbild des Fingerabdrucks mit manuell markierten Gabel-Minutien. In Teilbild b) sind Minutien, welche durch das Crossing Number Concept detektiert werden, markiert. Teilbild c) zeigt markierte Minutien, welche durch eine Kombination aus Crossing Number Concept und Template Matching mit 9x9 Pixel großen Templates detektiert werden. Bei der manuellen Detektion werden Gabel-Minutien mit grünen Quadraten und beim CNC mit gelben Kreisen markiert. Gabel-Minutien, welche zusätzlich mittels Template Matching Verfahren detektiert werden, werden mit grünen Kreisen markiert.

Werden alle 30 Fingerabdrücke zum Vergleich hinzugezogen ergeben sich folgende Verteilung an Gabel-Minutien und die *Precision* der jeweiligen verwendeten Methode.

Als erstes wird die Methode des *Crossing Number Concepts* untersucht. Diese Methode beruht auf einer regelbasierten Erkennung von Minutien. Mit der Methode des CNC werden von 507 Gabeln 437 richtig, 219 falsch und 70 nicht detektiert (vgl. Abbildung 19). Dies ergibt eine *Precision* von 66,62%.

Die zweite zu testende Methode ist das *Template Matching*. Zunächst wird ein Vergleich zu den 24 3x3 Pixel großen Gabel-*Templates* gezogen. Für insgesamt 507 zu findende Gabel-Minutien werden 427 richtig, 346 falsch und 80 nicht detektiert (vgl. Abbildung 19). Daraus ergibt sich eine *Precision* von 55,24%.

Im zweiten Versuch des *Template Matchings* wird ein Vergleich mit den über 70 5x5 bis 9x9 Pixel großen Gabel-*Templates* gezogen, um fehlerhaft erkannte Minutien vom Vorversuch zu reduzieren. Hierbei werden von insgesamt 507 Gabeln 181 richtig, 120 falsch und 326 nicht detektiert (vgl. Abbildung 19). Dies ergibt eine *Precision* von 60,13%.

Im letzten Versuch werden das *Crossing Number Concept* und das *Template Matching* Verfahren in Kombination angewandt. Dies dient dazu, die Anzahl der nicht detektierten Gabel-Minutien im CNC zu reduzieren. Mit dieser Methode werden von 507 Gabeln 493 richtig, 241 falsch und 14 nicht detektiert (vgl. Abbildung 19). Die *Precision* beträgt hierbei 67,17%.

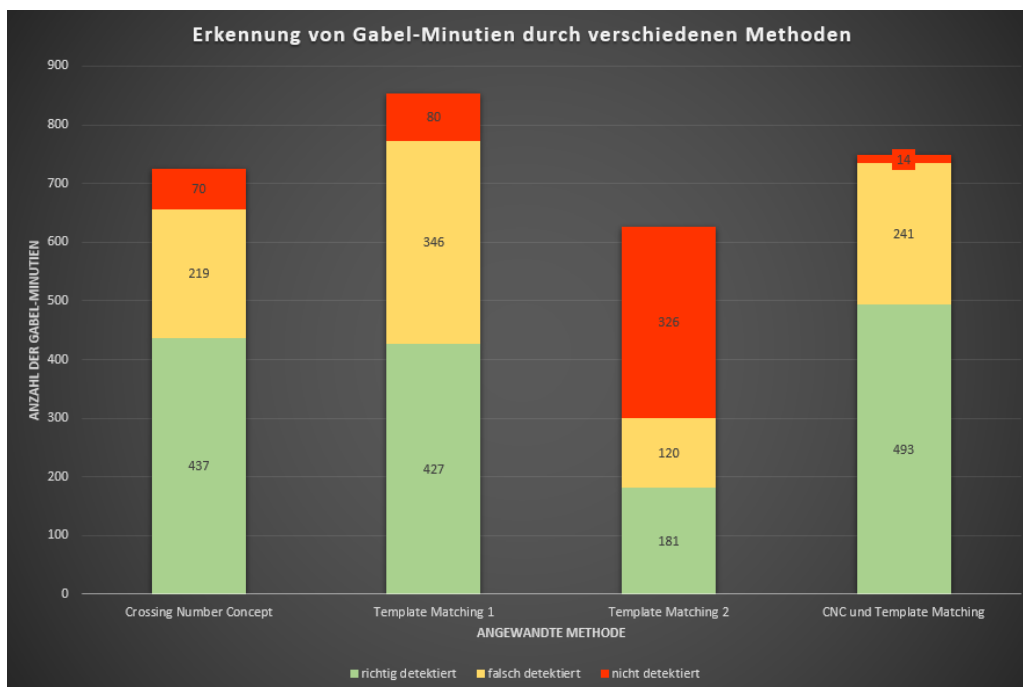


Abbildung 19: Verteilung richtiger, falscher und nicht detektiertes Gabel-Minutien verschiedener Methoden (eigene Darstellung).

Das Säulendiagramm in Abbildung 19 zeigt die Verteilung der Anzahl an Gabel-Minutien in den Verfahren des *Crossing Number Concept* und zwei Möglichkeiten des *Template Matchings* sowie der Kombination aus CNC und TM. Dabei wird die Anzahl der Gabel-Minutien für jedes Verfahren in richtig detektiert (grün), falsch detektiert (gelb) und nicht detektiert (rot) unterteilt.

Beim Vergleich aller Methoden des *Template Matchings* untereinander ist festzustellen, dass das CNC in Kombination mit dem *Template Matching* die höchste *Precision* mit 67,17% in der Detektion der Gabel-Minutien vorweist (vgl. Tabelle 2, CNC und *Template Matching*: 9x9 Pixel *Templates*). An zweiter Stelle steht das einfache *Crossing Number Concept* mit 66,62% (vgl. Tabelle 2, *Crossing Number Concept*). Danach folgt das *Template Matching* Verfahren mit 5x5 bis 9x9 Pixel großen Minutien-*Templates* mit 60,13% (vgl. Tabelle 2, *Template Matching*: 3x3 Pixel *Templates*). Am schlechtesten schneidet die Methode des *Template Matchings* mit 3x3 Pixel großen *Templates* ab. Dieses Verfahren erzielt eine *Precision* von 55,24% (vgl. Tabelle 2, *Template Matching*: 5x5 bis 9x9 Pixel *Templates*).

Tabelle 2: Übersicht der Precision-Werte aller Methoden zur Minutien Detektion im Vergleich (eigene Darstellung).

Methode	<i>CNC und Template Matching: 9x9 Pixel Templates</i>	<i>Crossing Number Concept</i>	<i>Template Matching: 5x5 bis 9x9 Pixel Templates</i>	<i>Template Matching: 3x3 Pixel Templates</i>
<i>Precision</i>	67,17%	66,62%	60,13%	55,24%

Die erhaltenen Werte der *Precision* können nicht als ausreichend zutreffend angesehen werden, da dafür noch mehr Vergleichsdaten benötigt werden, um valide Schlussfolgerungen formulieren zu können. Zu vielen fehlinterpretierten Gabel-Minutien kommt es im *Template Matching* mit den 3x3 Pixel großen *Templates* (vgl. Abbildung 19). Dies ist durch viele kleine Haken zu erklären, welche während der Verarbeitung im Verbesserungsprozess *Thinning* des Fingerabdruckbildes entstehen. Zudem findet bei dieser Methode keine Fehlerbehebung statt, wie beim *CNC* (vgl. Kapitel 2.4.1 *Crossing Number Concept*). Dadurch wird die *Precision* beim *Template Matching* mit 3x3 Pixel *Templates* erheblich beeinflusst. Um diesen Fehlinterpretationen von Gabel-Minutien vorzubeugen, wird mit 5x5 bis 9x9 Pixel großen *Templates* der Gabel-Minutien gearbeitet. Es ist erkennbar, dass die Fehlerrate deutlich nach unten sinkt (vgl. Abbildung 19). Dafür steigt die Zahl der nicht erkannten Minutien stark an (vgl. Abbildung 19). Dies ist durch das individuelle Aussehen jeder Minutie im Papillarlinienverlauf zu begründen. Je größer der Ausschnitt des *Templates* einer Minutie ist, desto mehr Variationen gibt es im Papillarlinienverlauf. Um die *Precision* hierfür zu verbessern, eignet sich die Kombination aus *CNC* und *Template Matching* am besten.

4.3 Vergleich verschiedener Änderungen in Verbesserungsprozessen

Werden die ersten fünf Vorverarbeitungsschritte außer Acht gelassen und nur die Binarisierung und das *Thinning* auf das Scannerbild angewendet, sind sämtliche Poren im ausgedünnten Fingerabdruck sichtbar. Diese Art und Weise der Verarbeitung des Fingerabdrucks findet ursprünglich bei dem Programmcode von GitHub-User „Emu0“ Anwendung (emu0 & luisega, 2015). Im eingescannten Fingerabdruckbild lassen sich acht Gabel-Minutien sicher händisch bestimmen. Hingegen im verarbeiteten ausgedünnten Fingerabdruckbild sind nur drei Gabeln an den Positionen bestimmbar, an welchen sie sich auch im Scannerbild befinden. Auffällig im verarbeiteten Fingerabdruck sind außerdem vermehrt auftretende annähernd kreis- bis ellipsenförmige Muster, welche an die Minutie See erinnern. Diese sind besonders deutlich erkennbar in der Region des Grundmusters. Es handelt sich

hierbei allerdings um Poren, welche im Scannerbild auf den schwarzen Papillarlinien deutlich erkennbar sind. Zudem ist festzustellen, dass im unteren Drittel des eingescannten Fingerabdruckes die Papillarlinien etwas verblässen. Dies wirkt sich ebenso auf das verarbeitete Fingerabdruckbild aus, bei welchem die ausgedünnten Papillarlinien sehr stark unterbrochen sind. Wird auf diese Art der Vorverarbeitung z. B. die Methode des CNC angewandt, um Gabel-Minutien erkenntlich zu machen, werden hierbei häufiger die Poren erkannt anstatt der regulären Gabel-Muster. (vgl. Abbildung 20)

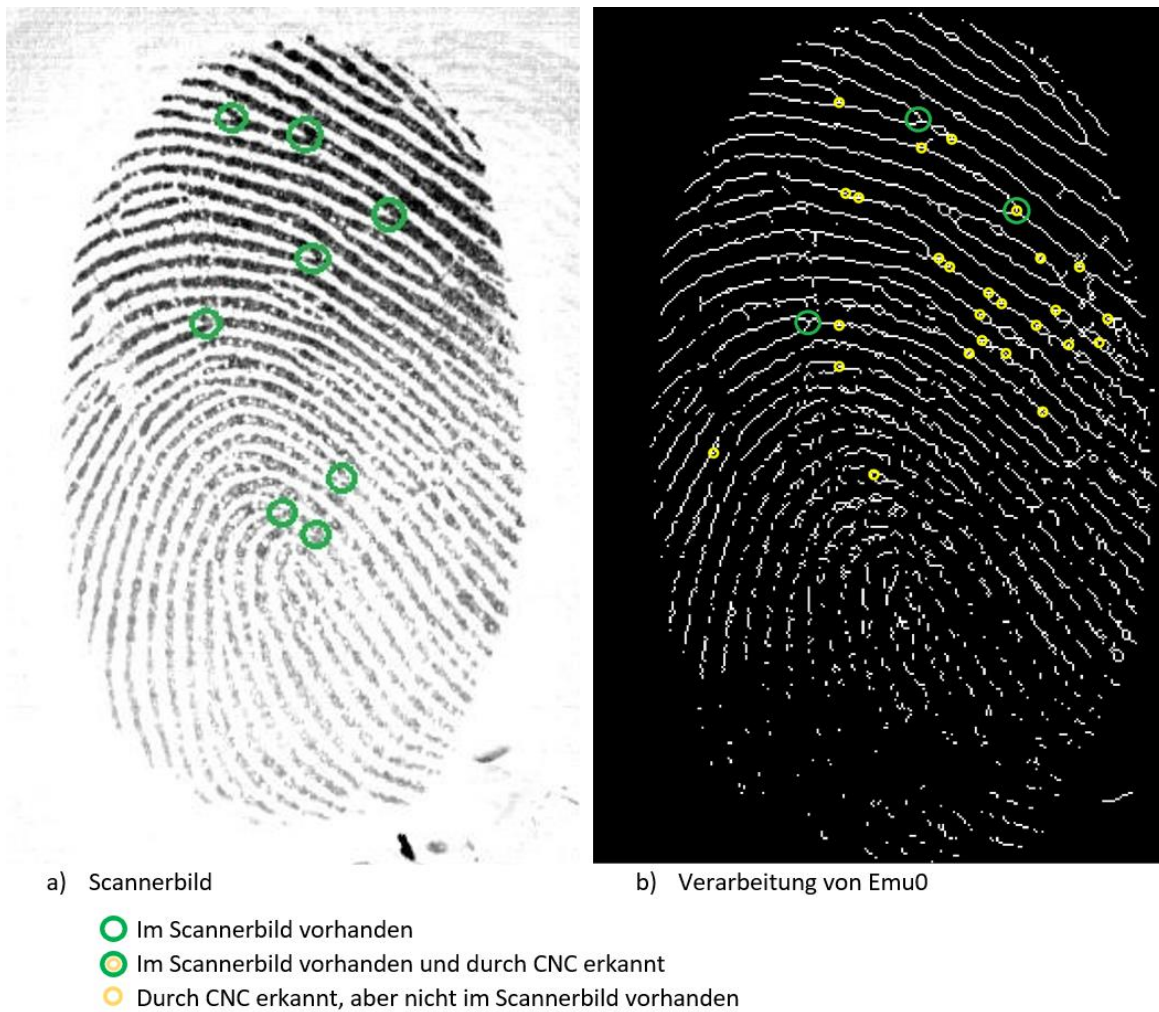


Abbildung 20: Vergleich der Gabel-Minutien im eingescannten Fingerabdruckbild mit dem verarbeiteten Fingerabdruckbild von GitHub-User „Emu0“ (eigene Darstellung).

Abbildung 20 zeigt in a) die Papillarlinien des eingescannten Fingerabdrucks und darin enthaltene Gabel-Minutien, welche mit grünen Kreisen markiert werden. In b) ist die Verarbeitung nach GitHub-User „Emu0“ dargestellt. Zudem werden in b) Gabeln, welche durch das CNC Verfahren detektiert wurden, mit gelben Kreisen markiert. Gabeln, welche sowohl im Papillarlinienbild des Scannerbildes sowie im ausgedünnten Papillarlinienbild zu erkennen sind, werden mit grünen und gelben Kreisen markiert.

Damit die Papillarlinienstruktur im Fingerabdruckbild erhalten bleibt und keine Poren oder Unregelmäßigkeiten beim Aufdrücken auf den Scanner das Papillarlinienbild verändern

können, sind wie zuvor beschrieben einige Verbesserungsprozesse notwendig (vgl. Kapitel 2.3 Fingerabdruck Verbesserungsprozesse). Wie die Papillarlinienstruktur im *Thinning* erscheint, hängt von den gewählten Parametern in den Verbesserungsschritten zur Berechnung der Orientierung und Frequenz der Papillarlinien sowie dem Gabor-Filter ab. Im Fall des Vorverarbeitungsprozesses von Stoeter, welcher als Grundlage für die Arbeit zur Detektion und Bestimmung von Fingerabdruckmustern dient, werden Parameter mit großen Werten gewählt, um möglichst wenige Lücken im Papillarlinienbild zu erzeugen. Dadurch werden so viele Papillarlinien wie möglich miteinander verbunden und Gabeln stärker hervorgehoben. Dies erleichtert die Detektion von Gabel-Minutien.

Durch die Vorverarbeitung des Fingerabdruckbildes werden Papillarlinien miteinander verbunden, wobei Gabeln entstehen können, welche im Scannerbild nicht erkennbar sind. Einerseits birgt das den Vorteil, dass versteckte Gabeln, die mit bloßem Auge aufgrund von unregelmäßigem Druck auf den Scanner nicht erkennbar sind, sichtbar gemacht werden können. Andererseits kann bei anderen Papillarlinienstrukturen dennoch eine Verbindung zwischen zwei Papillarlinien hergestellt werden, auch wenn klar erkennbar ist, dass diese nicht in Verbindung stehen können oder sie werden nicht verbunden, obwohl sie in Verbindung zueinanderstehen. In einem untersuchten Fingerabdruck sind im Scannerbild acht Gabel-Minutien mit bloßem Auge klar erkennbar. Im ausgedünnten Fingerabdruckbild hingegen stimmen nur drei Gabeln in ihrer Position mit denen im Scannerbild überein. Des Weiteren finden sich diverse weitere Gabeln im Bereich des unteren Drittels des ausgedünnten Bildes, welche im Scannerbild nicht zu vernehmen sind. Dies wird deutlich, wenn die Methode des *CNC* angewandt wird und einige dieser Gabeln markiert werden. (vgl. Abbildung 21)



a) Scannerbild

b) Verarbeitung von Stoeter

- Im Scannerbild vorhanden
- ◐ Im Scannerbild vorhanden und durch CNC erkannt
- Durch CNC erkannt, aber nicht im Scannerbild vorhanden

Abbildung 21: Vergleich der Gabel-Minutien im eingescannten Fingerabdruckbild mit dem verarbeiteten Fingerabdruckbild von Stoeter (eigene Darstellung).

Abbildung 21 zeigt in a) die Papillarlinien des eingescannten Fingerabdrucks und darin enthaltene Gabel-Minutien, welche mit grünen Kreisen markiert werden. In b) ist die Verarbeitung nach Stoeter dargestellt. Zudem werden in b) Gabeln, welche durch das CNC Verfahren detektiert wurden, mit gelben Quadraten markiert. Gabeln, welche sowohl im Papillarlinienbild des Scannerbildes sowie im ausgedünnten Papillarlinienbild zu erkennen sind, werden mit einem grünen Kreis und einem gelben Quadrat markiert.

Um überflüssige Gabeln zu umgehen, wie es bei der Vorverarbeitung von Stoeter der Fall ist, werden die Parameter in den Verbesserungsschritten zur Berechnung der Orientierung und Frequenz der Papillarlinien sowie dem Gabor-Filter angepasst. Als Grundlage hierfür dient der Algorithmus von GitHub-User „Alilou“, welcher Parameter mit kleineren Werten enthält (alilou63, 2020). Festzustellen ist, dass weniger überflüssige Gabeln zu finden sind und mehr Gabeln mit den Positionen im Scannerbild übereinstimmen. Im ausgedünnten Fingerabdruckbild befinden sich fünf Gabeln, die mit denen im Scannerbild übereinstimmen. Auch hier werden nicht alle Papillarlinien, die im eingescannten Fingerabdruckbild als Gabeln erkennbar sind, zusammengeführt. Zudem lässt sich eine größere Lücke unten links

im ausgedünnten Fingerabdruckbild erkennen, welche an dieser Position im Scannerbild nicht zu vernehmen ist. (vgl. Abbildung 22)

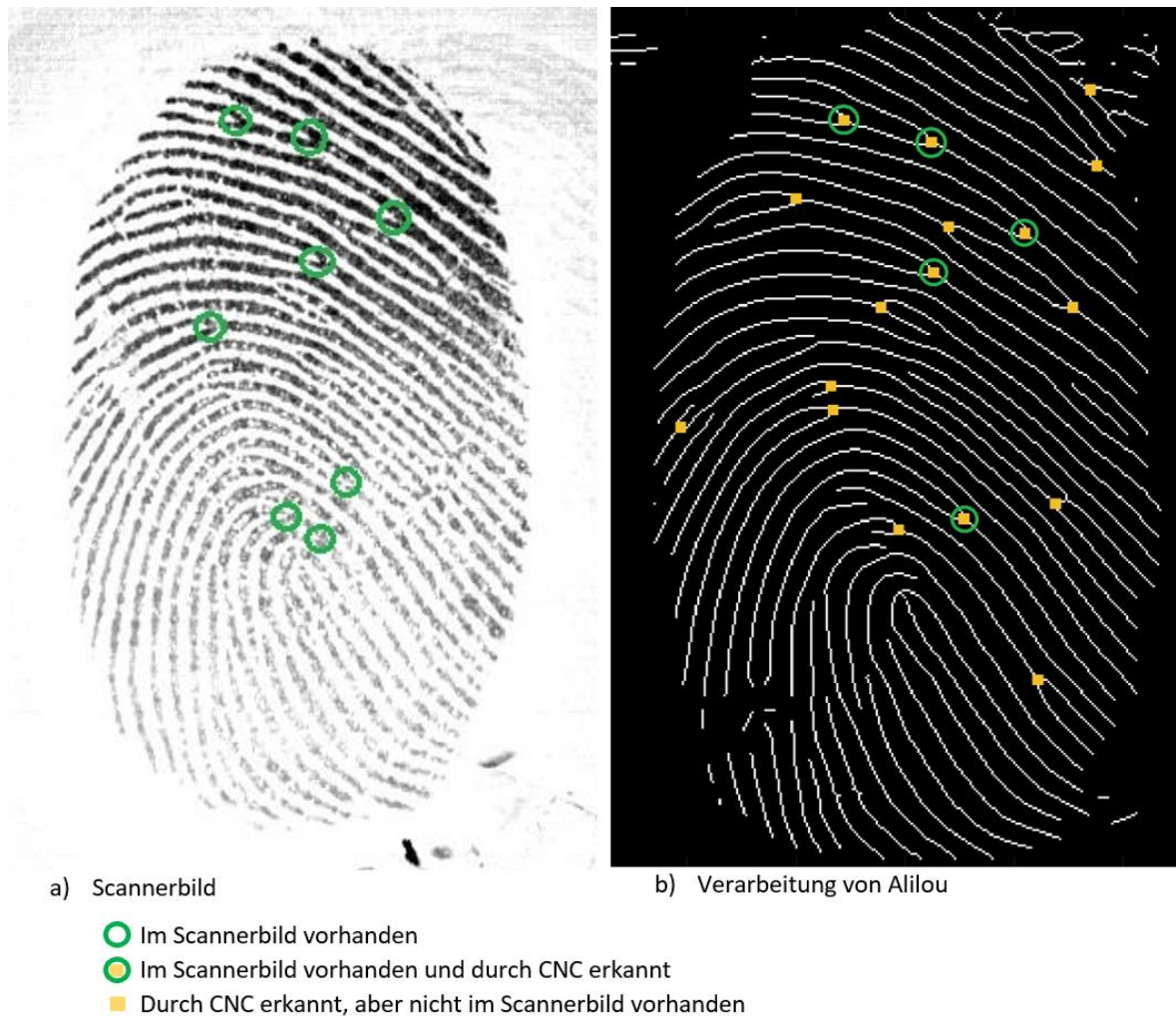


Abbildung 22: Vergleich der Gabel-Minutien im eingescannten Fingerabdruckbild mit dem verarbeiteten Fingerabdruckbild von GitHub-User „Alilou“ (eigene Darstellung).

Abbildung 22 zeigt in a) die Papillarlinien des eingescannten Fingerabdrucks und darin enthaltene Gabel-Minutien, welche mit grünen Kreisen markiert werden. In b) ist die Verarbeitung nach GitHub-User „Alilou“ dargestellt. Zudem werden in b) Gabeln, welche durch das CNC Verfahren detektiert wurden, mit gelben Quadraten markiert. Gabeln, welche sowohl im Papillarlinienbild des Scannerbildes sowie im ausgedünnten Papillarlinienbild zu erkennen sind, werden mit grünen Kreisen und gelben Quadraten markiert.

Um festzustellen, wie hoch die Trefferquote ist, also wie viele Gabeln an jeweiliger Position nach der Vorverarbeitung mit denen im eingescannten Fingerabdruckbild übereinstimmen, werden 30 verschiedene Fingerabdrücke mit den zuvor beschriebenen Arten der Vorverarbeitung untersucht und miteinander verglichen. Als Referenz gilt die Anzahl der Gabel-Minutien, die im Scannerbild mit bloßem Auge detektiert werden können. Die Trefferquote berechnet sich daraus, wie viel Prozent der im jeweiligen verarbeiteten Fingerabdruckbild gefundenen Gabelpositionen, mit denen im Scannerbild übereinstimmen.

In den 30 eingescannten Fingerabdrücken können insgesamt 189 Gabel-Minutien manuell mit bloßem Auge detektiert werden. Bei dem Versuch mit der Vorverarbeitung von GitHub-User „Emu0“, welcher nur die Binarisierung und das *Thinning* beinhaltet, können 57 Gabeln an derselben Position wie im Scannerbild gefunden werden. In diesem Fall beträgt die Trefferquote 30,16%. Es stimmen 67 Gabel-Minutien im Versuch der vollständigen Vorverarbeitung mit hohen Parametern von Stoeter, mit denen im eingescannten Fingerabdruck überein. Dies ergibt eine Trefferquote von 35,45%. Der Versuch der Vorverarbeitung mit kleineren Parametern des GitHub-Users „Alilou“ weist 72 Gabeln auf, welche mit den Positionen im Scannerbild übereinstimmen. Daraus resultiert eine Trefferquote von 38,10%. (vgl. Abbildung 23, links)

Ein Problem stellt der Algorithmus von GitHub-User „Alilou“ dar. Dieser ist nicht auf die Größe der eingescannten Fingerabdrücke der Hochschule Mittweida angepasst, und erkennt somit nicht jeden Fingerabdruck korrekt. Dies führt dazu, dass einige Scannerbilder nicht berücksichtigt werden können und die Trefferquote für alle 30 Fingerabdrücke stark nach unten sinkt. Darum wird der Versuch erneut durchgeführt, nur mit Fingerabdruckbildern, die vom Algorithmus von GitHub-User „Alilou“ erkannt werden. Dies betrifft 14 Fingerabdrücke, welche insgesamt 90 Gabel-Minutien aufweisen. In diesem Versuch befinden sich bei GitHub-User „Emu0“ 33 Gabeln an derselben Position wie im Scannerbild und die Trefferquote beträgt 36,67%. Im Fall Stoeter sind es 38 Gabel-Minutien mit einer Trefferquote von 42,22%. Einen deutlichen Sprung in der Trefferquote macht die Vorverarbeitung von GitHub-User „Alilou“. Bei 72 gefundenen Gabeln ergibt sich eine Trefferquote von 80,00%. (vgl. Abbildung 23, rechts)

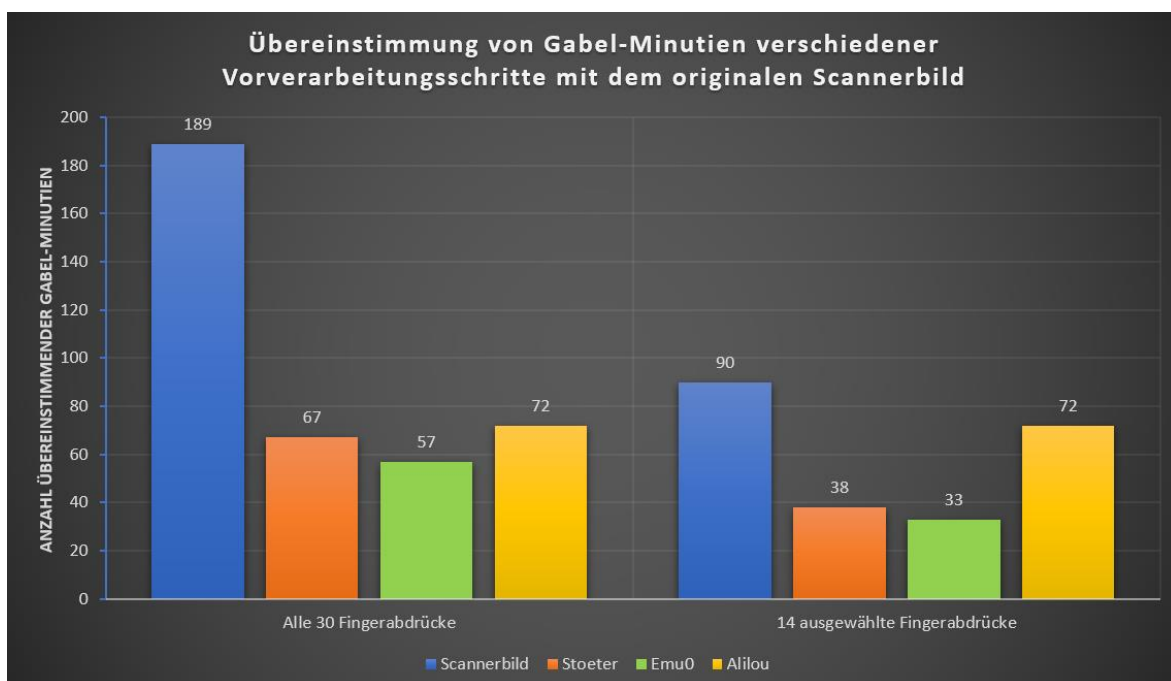


Abbildung 23: Anzahl der Übereinstimmungen von Gabelpositionen verschiedener Vorverarbeitungsschritte mit dem originalen Scannerbild (eigene Darstellung).

Das Säulendiagramm in Abbildung 23 zeigt die Anzahl der übereinstimmenden Positionen aller Gabel-Minutien der Vorverarbeitungsschritte von GitHub-User „Emu0“ (grün), Stoeter (orange) sowie von GitHub-User „Alilou“ (gelb). Die Anzahl der Gabel-Minutien aus dem Scannerbild (blau) gelten als Referenz der zu detektierenden Gabeln. Links ist der Versuch mit allen 30 Fingerabdrücken abgebildet. Rechts der Versuch nur mit den 14 Fingerabdrücken, die bezüglich ihrer Größe vom Algorithmus von GitHub-User „Alilou“ erkannt wurden.

Vergleicht man die Trefferquoten aller Versuche der verschiedenen Vorverarbeitungsarten untereinander, lässt sich feststellen, dass in allen Versuchen die Trefferquote der Vorverarbeitung von GitHub-User „Emu0“ am geringsten ausfällt (vgl. Tabelle 3, „Emu0“). An zweiter Stelle und mit relativ geringem Abstand steht die Art der Vorverarbeitung von Stoeter (vgl. Tabelle 3, Stoeter). Am besten schneidet die Vorverarbeitungsart von GitHub-User „Alilou“ ab. Im Versuch mit allen 30 Fingerabdrücken, zeigt sich ein geringer Abstand zur Vorverarbeitung von Stoeter (vgl. Tabelle 3, „Alilou“). Einen deutlichen Abstand weist die Trefferquote von GitHub-User „Alilou“ bei den 14 ausgewählten Fingerabdruckbildern auf (vgl. Tabelle 3, „Alilou“). Daraus lässt sich schließen, dass das Papillarlinienbild, welches die vollständige Vorverarbeitung mit kleinen Parametern durchlaufen hat, mit dem des gescannten Fingerabdrucks am wahrscheinlichsten übereinstimmt.

Tabelle 3: Übersicht der Trefferquoten verschiedener Vorverarbeitungsarten (eigene Darstellung).

Vorverarbeitungsart	„Emu0“	Stoeter	„Alilou“
Trefferquote aller 30 Fingerabdrücke	30,16%	35,45%	38,10%
Trefferquote der 14 ausgewählten Fingerabdrücke	36,67%	42,22%	80,00%

5 Ausblick

Um die Grundmusteranalyse zu verbessern könnte der Kernpunkt statt der mittleren Pixelhelligkeit zur ersten Unterscheidung von flachen Bögen hinzugezogen werden. Flache Bögen besitzen für gewöhnlich keinen Kernpunkt im Gegensatz zu anderen Grundmustertypen (Ohtsuka, Watanabe, Tomizawa, Hasegawa, & Aoki, 2008), welches sich als sichereres Erkennungsmerkmal erweist als die mittlere Pixelhelligkeit, die auch bei anderen Grundmustertypen sehr hoch ausfallen kann. Gegebenenfalls könnten die *Templates* der Grundmuster angepasst werden, so dass eine höhere *Precision* erzielt wird, besonders für Wirbel und Doppelschleifen. Statt mit *Templates* des geglätteten Orientierungsbildes könnte auch mit den Vektoren (Gradienten) des Orientierungsfeldes gearbeitet werden (Zhou & Gu, 2004). Eine weitere Methode, welche der Erkennung von Grundmustertypen dient, ist die Berechnung von *Singular Points* und des Papillarlinienverlaufes. Als *Singular Points* werden dabei Kernpunkte und Deltas definiert (Srinivasan & Murthy, 1991). Durch die Anzahl vorhandener *Singular Points* im Fingerabdruck lässt sich eine Tendenz zum vorhandenen Grundmuster schließen (Srinivasan & Murthy, 1991). Flache Bögen weisen keine *Singular Points* auf (Ohtsuka, Watanabe, Tomizawa, Hasegawa, & Aoki, 2008). Einfache Schleifen und Tannenbögen besitzen jeweils einen Kernpunkt und ein Delta und Wirbel sowie Doppelschleifen jeweils zwei von jedem (Ohtsuka, Watanabe, Tomizawa, Hasegawa, & Aoki, 2008). Wird zusätzlich der Kurvenverlauf der Papillarlinien hinzugezogen, können Grundmustertypen anhand ihrer Krümmung in Kernpunktnähe akkurat klassifiziert werden (Yager & Amin, 2004).

Bei der Detektion von Minutien stellte sich heraus, dass eine Kombination aus *Crossing Number Concept* und *Template Matching* die besten Ergebnisse lieferte. Dieses Konzept könnte für eine größere Datenbank an Fingerabdruckbildern weitergeführt werden. Da dies einen hohen Rechen- und Zeitaufwand mit sich führt, da jedes Gabel-*Template* per Hand angefertigt werden muss, könnte ein Neuronales Netz Abhilfe schaffen. Es ist in der Lage Muster aus unstrukturierten Daten, in diesem Fall die Fingerabdrücke, zu erkennen und selbstständig zu lernen, Minutien in ausgedünnten Fingerabdruckbildern zu detektieren und anschließend zu markieren (Luber & Donner, 2020).

Zur Verbesserung des Fingerabdruckbildes zeigten die Vorverarbeitungsschritte mit kleiner Parameterwahl von GitHub-User „Alilou“ sehr gute Ergebnisse. Dabei kamen die Erscheinungsbilder der Papillarlinien der ausgedünnten Fingerabdrücke, denen der gescannten Fingerabdrücke sehr nah. Da nicht alle Fingerabdruckbilder mit diesem Algorithmus aufzufassen waren, muss an dieser Stelle noch eine Anpassung erfolgen, damit dieses Verfahren ausführlich genutzt werden kann.

Diese Bachelorarbeit hat gezeigt, dass die verwendeten Methoden zur Erkennung von Grundmustertypen sowie der Detektion von Minutien bereits gute Ergebnisse liefern, doch noch lange nicht perfekt funktionieren. Auch was die Vorverarbeitung von Fingerabdruckbildern betrifft, sind noch einige Anpassungen notwendig, um den Papillarlinienverlauf möglichst exakt darzustellen. Somit ist die Darstellung und anschließende Analyse von Fingerabdruckbildern zum großen Teil umsetzbar und dient als Anfang für eine spätere Identifikation bzw. Verifikation von Menschen.

Literatur

- (aaronmatlab, 2012) aaronmatlab. (2012). Von *Image Processing*: <https://www.imageprocessing.com/2011/06/template-matching-in-matlab.html> abgerufen am 10.09.2021 um 13:58 Uhr.
- (alilou63, 2020) alilou63. (2020). Von *GitHub*: <https://github.com/alilou63/fingerprint> abgerufen am 13.09.2021 um 10:47 Uhr.
- (Ashbaugh, 1999) Ashbaugh, D. R. (1999). *Quantitive-Qualitative Friction Ridge Analysis: An Introduction to Basic and Advanced Ridgeology*. New York: CRC Press.
- (Baohua, Yuanchun, Jianfeng, Dahua, & Quanlin, 2009) Baohua, Z., Yuanchun, J., Jianfeng, Z., Dahua, Y., & Quanlin, Z. (2009). Fingerprint Template Matching Algorithm Based on Daubechies Wavelet. In S. o. Engineering (Hrsg.), *International Conference on Communication Software and Networks* (S. 807-811). BaoTou city: Inner Mongolia University of Science & Technology.
- (Barham & Mousa, 2011) Barham, Z. S., & Mousa, A. (2011). *Fingerprint Recognition using MATLAB*. Von *Barham&Mousa*: <https://eng.najah.edu/sites/eng.najah.edu/files/fingerprintrecognition.pdf> abgerufen am 07.09.2021 um 15:32 Uhr.
- (emu0 & luisega, 2015) emu0, & luisega. (2015). Von *GitHub*: <https://github.com/emu0/fingerprint-minutiae> abgerufen am 09.09.2021 um 16:03 Uhr.

- (Golabi, Saadat, Helfroush, & Tashk, 2012) Golabi, S., Saadat, S., Helfroush, M. S., & Tashk, A. (2012). A Novel Thinning Algorithm with Fingerprint Minutiae Extraction Capability. In I. A. Com (Hrsg.), *International Journal of Computer Theory and Engineering* (S. 514-517). Singapore: IACSIT Press.
- (Helml & Scharinger, 2019) Helml, F., & Scharinger, J. (2019). *Analyse von Fingerabdrücken für die biometrische Identifikation*. Linz: Johannes Kepler Universität Linz.
- (Herrmann & Saternus, 2007) Herrmann, R., & Saternus, K.-S. (2007). Kriminalbiologie. In *Biologische Spurenkunde* (S. 100-114). Berlin: Springer-Verlag.
- (Hunger & Leopold, 1978) Hunger, H., & Leopold, D. (1978). *Identifikation*. Berlin: Springer-Verlag.
- (Labudde & Mohaupt, 2018) Labudde, D., & Mohaupt, M. (2018). *Bioinformatik im Handlungsfeld der Forensik*. Berlin: Springer-Verlag.
- (Luber & Donner, 2020) Luber, S., & Donner, A. (2020). Von IP Insider. <https://www.ip-insider.de/was-ist-ein-neuronales-netz-a-959282/> abgerufen am 03.11.2021 um 15:25 Uhr.
- (Maltoni, Maio, Jain, & Prabhakar, 2009) Maltoni, D., Maio, D., Jain, A., & Prabhakar, S. (2009). *Handbook of Fingerprint Recognition* (2. Ausg.). London: Springer-Verlag.
- (MathWorks, 1994-2021) MathWorks. (1994-2021). Von The MathWorks Inc.: <https://de.mathworks.com/products/matlab.html> abgerufen am 23.09.2021 um 14:37 Uhr.

- (Mong, C.E., & T.R.W., 1999) Mong, G. M., C.E., P., & T.R.W., C. (1999). *Advanced Fingerprint Analysis Project Fingerprint Constituents*. Washington: Pacific Northwest National Laboratory.
- (Ohtsuka, Watanabe, Tomizawa, Hasegawa, & Aoki, 2008) Ohtsuka, T., Watanabe, D., Tomizawa, D., Hasegawa, Y., & Aoki, H. (2008). *Reliable Detection of Core and Delta in Fingerprints by using Singular Candidate Method*. Tokyo: Tokyo National College of Technology.
- (Srinivasan & Murthy, 1991) Srinivasan, V. S., & Murthy, N. (1991). Detection of Singular Points in Fingerprint Images. In P. R. Society (Hrsg.), *Pattern Recognition* (S. 139-153). Secunderabad: Pergamon Press plc.
- (Thai, 2003) Thai, R. (2003). *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction*. University of Western Australia.
- (Tian & Peng, 2012) Tian, J., & Peng, Y. (2012). *Research of the Matlab Application in the Fingerprint Identification System*. Changchun: Changchun University of Science and Technology.
- (Yager & Amin, 2004) Yager, N., & Amin, A. (2004). Fingerprint classification: a review. In *Pattern Anal Applic* (S. 77-93). London: Springer-Verlag.
- (Zhou & Gu, 2004) Zhou, J., & Gu, J. (2004). A Model-Based Method for the Computation of Fingerprints' Orientation Field. In *Transactions on Image Processing* (S. 821-835). Beijing: IEEE.

Digitale Anhänge

Alle verwendeten Bilder und Tabellen, welche nicht in der Bachelorarbeit aufgeführt wurden, sowie der verwendete Programmcode sind in einer zusätzlichen zip-Datei beigefügt.

Teil 1: Verwendeter Programmcode und genutzte Scannerabdrücke

Teil 2: Markierte Minutien in ausgedünnten Fingerabdrücken mittels *CNC*

Teil 3: Markierte Minutien in ausgedünnten Fingerabdrücken mittels *Template Matching*

Teil 4: Markierte Minutien in ausgedünnten Fingerabdrücken mittels *CNC* und *TM*

Teil 5: Scannerabdrücke mit Gabel-Markierungen

Teil 6: Unterschiedlich Vorverarbeitete Fingerabdruckbilder mit Gabel-Markierungen

Teil 7: Ausführliche Tabellenführung

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 29.11.2021



Vivien Jacob