

Fingerabdruckerkennung

Fingerabdruckverfahren zur Identifikation von Personen gibt es in manueller Form seit etwa 100 Jahren und wird vorwiegend im Bereich der Strafverfolgung verwendet. In der IT-gestützten, automatisierten Form ist das digitale Fingerabdruckverfahren ein biometrisches Verfahren hoher Erkennungsleistung. Für die Erfassung des Fingerabdrucks bei automatischer Fingerabdruckerkennung werden spezielle Sensoren optischer, kapazitiver (Halbleiter), thermischer oder direkt-optischer Technologie verwendet. Ultraschall-Sensoren, die den akustischen Widerstand der Haut, der über Kanten und Furchen differiert, messen, befinden sich noch in der Erprobungsphase.

Unabhängig von der Art der Erfassung des Fingerabdrucks steht dem Verfahren stets ein Graustufenbild des Fingers, der Fingerabdruck, zur Verfügung. Dieses Bild wird weiterverarbeitet, um mit dem verbesserten Bild korrekte Matching-Ergebnisse erzielen zu können. Schritte der Bildverarbeitung sind etwa Verminderung des Bildrauschens, Verbesserung des Bildes und Detektion der Merkmale. Die Extrahierung der charakteristischen Kennzeichen aus dem Bild kann anhand unterschiedlicher Methoden erfolgen. Es kann entweder das gesamte Bild (Global Pattern Matching), relevante Teile daraus, oder die Minuzien nach Art, Lage und Richtung erfasst werden. Der Vergleich dieser gemessenen charakteristischen Kennzeichen mit den gespeicherten Sollwerten zeigt, ob die Abdrücke vom gleichen Finger und somit von genau einer Person stammen.

1 Einleitung

Eine der ersten biometrischen Eigenschaften, die entdeckt und wissenschaftlich untersucht wurden, war der Fingerabdruck. Die Oberfläche der Leistenhaut von Menschen und von den meisten Säugetieren weist Muster auf, deren Mannigfaltigkeit schier unendlich zu sein scheint. So verlaufen die Papillarleisten der Leistenhaut auf den Fingern bei jedem Menschen unterschiedlich. Die Papillarleisten bilden verschiedene Muster (Schleife, Bogen, Wirbel), die in Verbindung mit den Unterbrechungen der Papillarleisten (Minuzien) von Finger zu Finger unterschiedlich sind. Die Fingerabdrücke wurden in der Kriminaltechnik schon Ende des 19ten Jahrhunderts zur Identifikation von Personen herangezogen (*Daktyloskopie*). Mit dem technologischen Fortschritt erlangt die Frage nach der Sicherheit an Bedeutung. Die biometrische Auswertung der Fingerabdrücke bei Zutrittskontrollen spielt dabei eine zunehmend wichtige Rolle.

2 Problemdefinition

Im Kontext des Begriffes: "*Identifikation mittels Fingerabdruckes*" werden die Fingerabdrücke allgemein als Menschenfingerabdrücke angenommen. Eine Identifikation kann funktionell nach den folgenden drei grundlegenden Aufgaben aufgeteilt werden:

- (a) Fingerabdruckabtastung,
- (b) Fingerabdruckklassifizierung und
- (c) Fingerabdruckvergleich.

Fingerabdrücke erhält man als Farbdruck oder mittels eines Sensors, welche die Papillarlinien auf einem Medium (Glas, Papier, Sensoroberfläche, usw.) hinterlassen. Die Klassifizierung ordnet den Fingerabdruck optional in eine bestimmte Kategorie nach der globalen Orientierung der Papillarlinien ein und markiert die Lage der Minuzien. Beim Vergleich wird bestimmt, ob zwei Fingerabdrücke identisch sind, also zum gleichen Urheber (Finger) gehören.

Der gesamte Prozess der Fingerabdruckanalyse (Vergleich von Merkmalen) kann schematisch in sechs Schritten dargestellt werden:

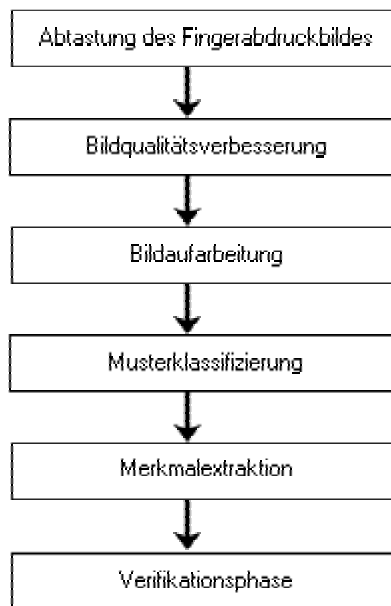


Abbildung 2.4: Prozess der Fingerabdruckanalyse¹

- 1) *Die Aufnahme (Abtastung) des Fingerabdruckbildes.* Die Qualität des aufgenommenen Bildes ist für die automatische Identifikation entscheidend. Es ist wünschenswert, einen hochwertigen Scanner zur Erfassung der Fingerabdrücke einzusetzen, der verschiedene Hauttypen, Beschädigungen, Trockenheit oder Feuchtigkeit der Fingeroberfläche tolerieren kann.
- 2) *Bildqualitätsverbesserung.* Damit wird eine optische Verbesserung der Strukturen (Papillarlinien) auf dem abgetasteten Bild erreicht.
- 3) *Bildaufarbeitung.* Es handelt sich um die Vorbereitungsphase zur Merkmalsextraktion und zur Klassifizierung.
- 4) *Musterklassifizierung.* Es zeigt sich, dass alle Fingerabdrücke gewisse globale Ähnlichkeiten aufweisen, und eine grobe Einordnung in drei Hauptfingerklassen erlauben. Die Klassifizierung ist allerdings ein schwieriger Prozess sowohl für eine algorithmus-gestützte Entscheidung als auch für eine menschengesteuerte, weil manche Fingerabdrücke nicht eindeutig in eine konkrete Fingerklasse einzuordnen sind. Die Musterklassifizierung ist heutzutage nur in den daktyloskopischen Systemen im Einsatz (z. B. AFIS des BKA). In den Zutrittssystemen wird dieses Verfahren in der Regel nicht verwendet.
- 5) *Merkmalsextraktion.* In diesem Schritt wird die Lage der Minuzien (Gabelung und Linienendung) in dem Fingerabdruck detektiert und extrahiert. In der Praxis weisen die aufgenommenen Fingerabdruckbilder eine unterschiedliche Qualität auf. Die Leistungsfähigkeit der Algorithmen wird durch mangelnde Bildqualität beeinträchtigt.
- 6) *Verifikationsphase.* Es handelt sich um den Vergleich von zwei Merkmalvektoren. Die Leistungsfähigkeit des Algorithmus für den Merkmalvergleich hängt stark von der Güte (Signifikanz) der extrahierten Minuzie und vom Vergleichsprozess ab.

Im Weiteren beschreiben wir näher die Prozesse der Fingerabdruckabtastung, Musterklassifizierung und des Fingerabdruckvergleichs.

¹ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

2.1 Fingerabdruckabtastung

In Abhängigkeit davon, ob der Prozess der Abtastung on-line oder off-line verläuft, kann der Fingerabdruck entweder

- (a) Farbdruck auf z. B. Papier oder
- (b) die Aufnahme des lebenden Fingers mittels eines Sensors sein.

Beim **Farbdruck** wird das Bild der Papillarlinien durch Abrollen des mit Farbe (Tinte) benetzten Fingers auf einer Unterlage z. B. Papier erhalten. Ein Muster solcher gerollten Fingerabdrücke wird in der Abbildung 2.5 gegeben. Durch das gleichmäßige Abrollen des Fingers von der einen Nagelseite zur anderen wird garantiert, dass die gesamte Linieninformation abgebildet wird. Anschließend können diese Abdrücke durch einen Scanner oder Kamera elektronisch aufgenommen werden. In der Daktyloskopie wird diese Methode schon seit gut 100 Jahren benutzt. Durch die vollständige "Rundum Aufnahme" des Fingers werden neben einer höheren Anzahl von Papillarlinien und Minuzien auch die "*Makromerkmale*" (Delta + Kern) aufgenommen, die zwar in jedem Papillarlinienmuster enthalten sind (nur beim Muster "Bogen" gibt es kein Delta), aber nicht immer abgedruckt werden müssen. Ein Nachteil dieser Methode ist die mögliche Verzerrung, die im Aufdrücken und Rollen des Fingers begründet ist. Ferner ist auch die Rückkopplung für eine Qualitätskontrolle nicht möglich, was zur Qualitätsverschlechterung der Fingerabdrücke führen kann. Aus der Sicht des Benutzers ist diese Methode unangenehm und langsam. Für ein teilautomatisiertes Zutrittskontrollsystem ist sie ungeeignet.



Abbildung 2.5: Farbdruck²

² Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

Der **Lebendabdruck eines Fingers** ist ein umfassender Terminus für Abbildungen, die mit einem geeigneten Sensor unmittelbar von dem aufgelegten Finger erworben werden. Es gibt eine große Anzahl von verschiedenen Methoden, die für die Abtastung der Papillarlinien verwendet werden können. Hierzu gehören:

- (a) *optische Sensoren,*
- (b) *E-Feld Sensoren,*
- (c) *polymere TFT Sensoren (TFT - Thin Film Transistor),*
- (d) *thermische Sensoren,*
- (e) *kapazitive Sensoren,*
- (f) *kontaktlose 3D Sensoren und*
- (g) *Ultraschallsensoren.*

Als einen *biometrischen Sensor* bezeichnet man die Hardware-Komponente eines biometrischen Systems, welche zunächst die biometrischen Messdaten liefert. Je nach verwendetem biometrischen Verfahren gibt es die unterschiedlichsten Arten von Sensoren: Die optischen Sensoren verwenden Licht zur Bilderfassung des Fingerabdruckes - siehe Abbildung 2.6. Der E-Feld Sensor misst die örtliche Variation des elektrischen Feldes, das auf dem Relief der Fingeroberfläche bei der Aussendung eines kleinen elektrischen Signals entsteht. Der polymere TFT Sensor misst das Licht, das beim Auflegen des Fingers in dem polymeren Substrat dort emittiert wird, wo eine Berührung stattfindet. Der thermische Sensor registriert das Wärmebild des aufgelegten Fingers. Bei dem kapazitiven Sensor bildet die Sensoroberfläche zusammen mit der Fingeroberfläche einen Kondensator, dessen Kapazität sich aufgrund des Hautreliefs (Rücken und Täler) ändert - siehe Abbildung 2.6. Diese örtlichen Änderungen werden vermessen und repräsentieren den Fingerabdruck. Die oben vorgestellten Sensoren werden zusammen mit einem datenverarbeitenden Modul als *on-line Systeme* eingesetzt und ersetzen die off-line Methode, bei der der Fingerabdruck z. B. auf Papier aufgenommen und anschließend digitalisiert wird. Die Qualität der Abdrücke ist stark von dem erreichten "Kontrast" zwischen den Papillarlinien und den nebenliegenden Furchen abhängig. Da bei der on-line Methode eine Rückkopplung zu dem bildverarbeitenden Algorithmus existiert, ist es relativ einfach, die Qualität der aufgenommenen Fingerabdrücke sofort zu kontrollieren.

Der Lebendabdruck wird gewöhnlich durch ein *leichtes Auflegen* des Fingers auf die Oberfläche des Sensors aufgenommen, Abrollen der Fingeroberfläche wie bei der daktyloskopischen Methode wird aufgrund der Benutzerfreundlichkeit nur im Kontext von AFIS-Systemen durchgeführt. Die Abtastung kann hier natürlich nur solche Papillarlinien einfangen, die im unmittelbaren Kontakt mit der Sensorfläche stehen. Der Lebendabdruck führt deshalb zur Aufnahme eines kleineren Ausschnittes der Fingeroberfläche im Vergleich zu einem gerollten Fingerabdruck und kann zusätzlich hierzu auch kleinere Bildverzerrungen aufweisen.

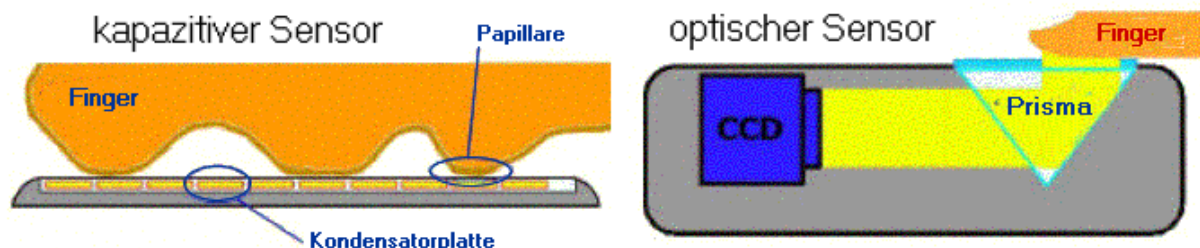


Abbildung 2.6: Kapazitiver Sensor, Optischer Sensor³

Die zur Zeit am weitesten verbreitete Technologie für den Lebendabdruck ist die optische. Wenn der Finger auf die Glasplatte (Prisma) des Sensors aufgelegt wird, stehen die Erhebungen der

³ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

Papillarleisten im Kontakt mit dem Glas - die Vertiefungen dagegen nicht. Das Aufzeichnungsgerät besteht im Prinzip aus einer Lichtquelle (LED) und einer CCD-Kamera, die sich beide im Gerät auf der anderen Seite der Glasplatte befinden. Das Licht aus der LED beleuchtet das Glas unter einem bestimmten Winkel und das Photoelement empfängt das reflektierte Licht. Der Strahlungsgang ist so angeordnet, dass das auffallende Licht an den angedrückten Papillarlinien wie an einer verspiegelten Oberfläche gestreut wird und zurück in die CCD-Kamera fällt. Dort, wo die Furchen hinter der Glasplatte liegen, tritt das Licht hindurch, diese Stellen bleiben dunkel. Ein Beispiel für einen solchen Fingerabdruck ist in der Abbildung 2.7 dargestellt. Die Abbildung 2.8 zeigt das Design einiger Sensorarten.



Abbildung 2.7: Lebendabdruck eines Fingers⁴



Abbildung 2.8: Sensorarten⁵

Ab

2.2 Musterklassifizierung

Die globale Musteranordnung der Papillarleisten in dem zentralen Bereich der Fingerbeere bildet eine spezifische Konfiguration, die schon zu einer groben systematischen Klassifizierung ausreicht. Zu einer Klassifizierung des Fingerabdruckes wird hier nur ein Teil des gesamten Abdruckes, genannt Musterbereich (Pattern Area), verwendet. Der Musterbereich wird als der innere Bereich definiert, der durch zwei Linien die sogenannten Typenlinien (Type Lines) begrenzt ist. In diesem Zentralbereich des Fingerabdruckes (siehe Abbildung 2.9) sind die zwei singulären Punkte: (a) das Delta (davon können mehrere vorhanden sein, beim Muster Bogen gibt es kein Delta) und (b) der Kern enthalten. Das Delta, manchmal auch die "äußere Grenze" genannt, befindet sich meistens auf dem Rand des Fingerabdruckes. Als Delta wird ein Papillarlinienbild bezeichnet, das dem griechischen Großbuchstaben Delta ähnelt. Es wird aus zwei auseinander laufenden Papillarlinien oder aus einer

⁴ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

⁵ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

sich gabelnden Papillarlinie und einer dritten aus einer anderen Richtung kommenden konvex verlaufenden Papillarlinie gebildet. Beispiele einer Delta-Konfiguration sind in der Abbildung 2.10 gezeigt. Der Kern eines einzelnen Fingerabdruckes ist aufgrund der großen Variation in der Krümmung der inneren Linien recht schwer definierbar. Deshalb wählt man den Kern als einen spezifischen Punkt, an dem sich das Zentrum des zugehörigen Musters befände. Die Abbildung 2.11 zeigt einige Beispiele der Kernkonfiguration. Ein weiterer wichtiger, quantitativer Faktor in der Klassifizierung der Abdrücke ist die Linienzahl. Dies ist die Anzahl der Linien, welche die imaginäre Verbindung zwischen dem Kern und dem Delta berühren oder kreuzen. Aufgrund der großen Komplexität verschiedener Linienkonfigurationen ist eine eindeutige Bestimmung der Linienzahl oft schwer. Drei einfache Beispiele für die Linienzahl sind in der Abbildung 2.12 dargestellt.

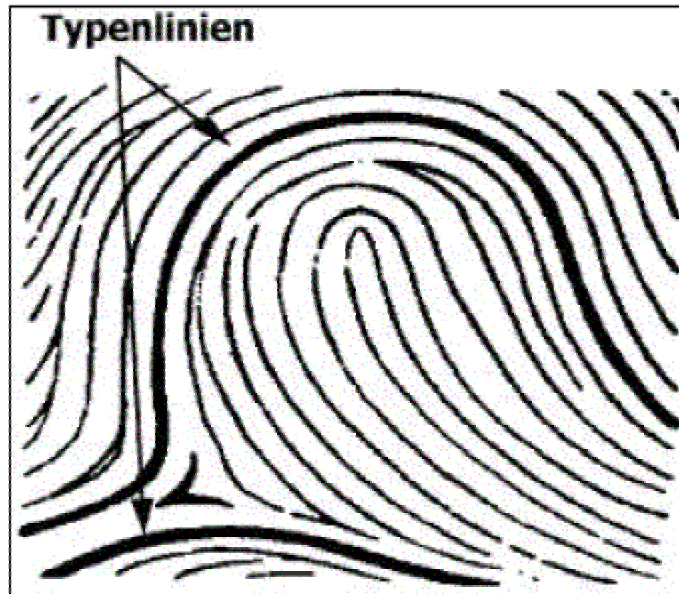


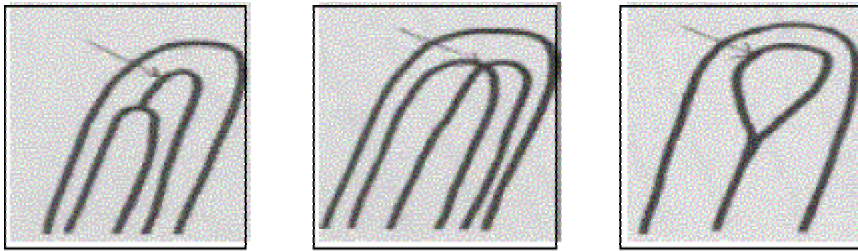
Abbildung 2.9: Typenlinien⁶



Abbildung 2.10: Delta-Konfigurationen⁷

⁶ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

⁷ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

Abbildung 2.11: Kernkonfigurationen⁸Abbildung 2.12: Beispiele für die Linienzahl⁹

Anlehnend an die oben gegebenen Definitionen können Fingerabdruckkategorien folgender Maßen beschrieben werden (nach *Henry*-Klassifizierungssystem):

Die **Schleife** (*Loop*), hier treten eine oder mehrere Papillarlinien in den Zentralbereich ein, krümmen sich, berühren oder kreuzen die imaginäre Linie zwischen dem Delta und dem Kern und laufen zurück zu der selben Seite, von der sie gekommen sind. Es gibt drei maßgebende Eigenschaften für eine Klassifizierung als Schleife: (a) mindestens eine geeignete gekrümmte Papillarlinie, (b) das Delta, (c) eine von null verschiedene Linienzahl. Je nach der Orientierung der Linienkrümmung wird zwischen *rechten* (im Uhrzeigersinn) und *linken* (entgegen dem Uhrzeigersinn) *Schleifen* unterschieden. Etwa 60-65% der menschlichen Fingerabdrücke gehören zu dieser Kategorie.

Der **Wirbel** (*Whorl*) besitzt mindestens zwei Deltas, im Kern verlaufen die Papillarlinien wirbelförmig. Diese Definition, obwohl sehr allgemein gefasst, drückt das Wesentliche dieser Kategorisierung aus. Wirbel können weiter nach Unterkategorien aufgeteilt werden: (a) *flacher Wirbel*, (b) *Wirbel mit mittlerer Schräge*, (c) *doppelter Wirbel* und (d) *zufälliger Wirbel*. Etwa 30-35% der Fingerabdrücke gehören zu dieser Kategorie.

Der **Bogen** (*Arch*) ist ein recht spezieller Typ des Fingerabdruckes. Weniger als 5% der Fingerabdrücke gehören zu dieser Kategorie. Der Bogen kann nach zwei Kategorien aufgeteilt werden: (a) *flacher Bogen* und (b) *gewölbter Bogen*. Bei dem flachen Bogen treten die Papillarlinien an der einen Seite ein, wellen sich mäßig und nahezu parallel in der Mitte und treten auf der anderen Seite aus. Bei dem Typ gewölbtes Bogens ist die Wellung in der Mitte stärker, der Verlauf aller Linien ist nicht mehr parallel und ein Teil der Linien drückt scheinbar von unten.

⁸ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

⁹ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

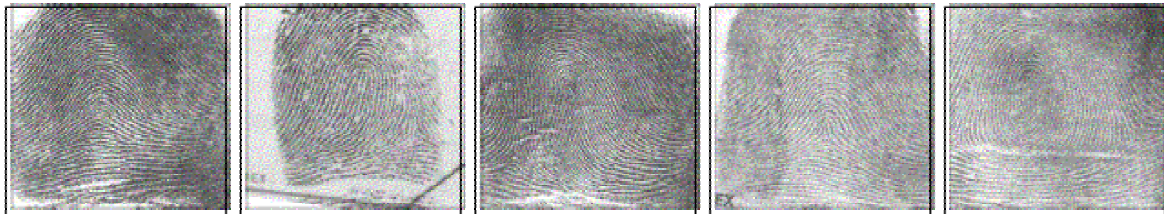


Abbildung 2.13: Flacher Bogen, linke Schleife, rechte Schleife, gewölbter Bogen, Wirbel¹⁰

Es liegt nahe, dass die Klassifizierung aufgrund der riesigen Variationsbreite der Fingerabdrücke immer ein großes Problem sowohl für Experten als auch für die automatischen Systeme bleiben wird. Die Zuordnung zu einer der Kategorie ist eine sehr komplexe Aufgabe. Ein Fachmann für Daktyloskopie benötigt sehr viel Erfahrung, um verlässliche Arbeit leisten zu können. In der Abbildung 2.13 werden die Beispiele für einzelne Kategorien exemplarisch gezeigt. Die folgende Abbildung 2.14 zeigt die Beispiele von Fingerabdrücken, die sehr schwer zu klassifizieren sind.

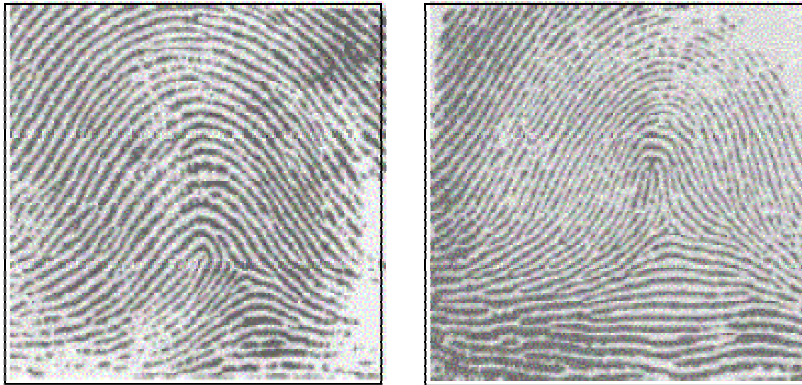


Abbildung 2.14: Linke Schleife, gewölbter Bogen¹¹

¹⁰ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

¹¹ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

2.3 Fingerabdruckvergleich

Obwohl die Information über die Fingerabdruckkategorie und weitere globale Merkmale, wie die Anzahl und die Positionen der Zentren, der Deltas und Papillarlinien eine gewisse Unterscheidbarkeit der Fingerabdrücke ergeben kann, wird die wahre Individualität des Fingerabdruckes durch die anatomischen Merkmale der Papillarlinien (Minuzien) und durch ihre gegenseitige Orientierung festgelegt. Ihre vollständige Erfassung ist von den Bedingungen der Aufnahme des Abdruckes und der Fingerabdruckqualität abhängig. Die häufigsten Minuzien sind

- (a) das Papillarlinienende (*Ridge Ending*) und
- (b) die Gabelung (*Ridge Bifurcation*).

Das Papillarlinienende definiert das Ende einer Linie. Die Gabelung ist als Punkt auf der Papillarlinie definiert, an dem sich die Linie in zwei Äste teilt. Die Minuzien sind allgemein stabil und robust hinsichtlich der Bedingungen während der Abtastung. Beispiele sind in der Abbildung 2.15 aufgezeigt. Minuzien können durch ihren Typ, die x- und y-Koordinate in einem Koordinatensystem und durch Richtung charakterisiert werden. Die Richtungsdefinition ist in der Abbildung 2.16 dargestellt.

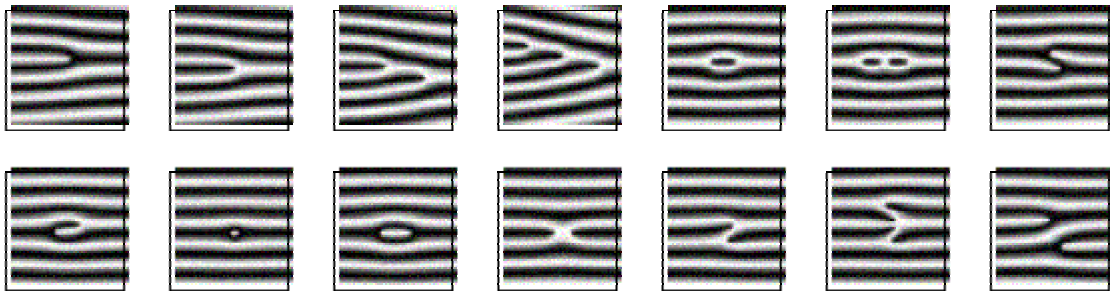


Abbildung 2.15:¹²

Papillarlinienende, einfache Gabelung, zweifache Gabelung, dreifache Gabelung, einfacher Wirbel, zweifacher Wirbel, seitliche Berührung; Haken, Punkt, Intervall, X-Linie, einfache Brücke, zweifache Brücke, fortlaufende Linie

Falls zwei Fingerabdrücke zur gleichen Kategorie gehören und eine bestimmte Anzahl übereinstimmender Minuzien enthalten, kann mit bestimmter Sicherheit gesagt werden, dass sie von dem gleichen Finger stammen.

¹² Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

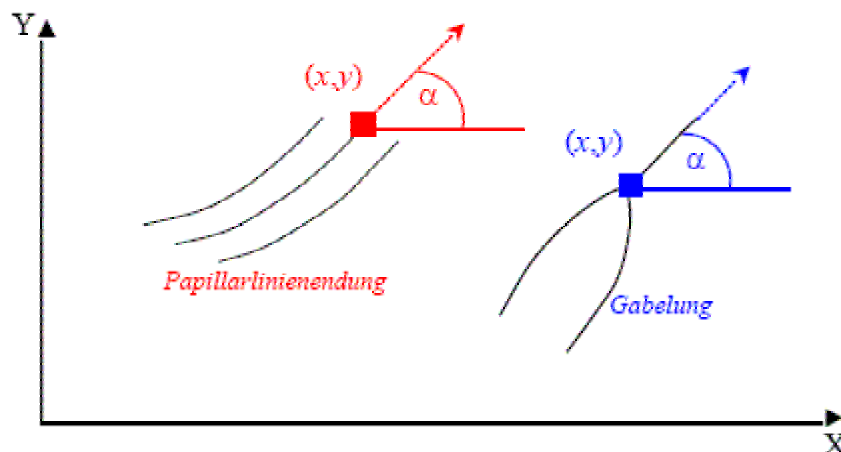


Abbildung 2.16: Papillarlinienendung und Gabelung¹³

Die verallgemeinerte Definition für die Übereinstimmung zweier Fingerabdrücke besteht aus vier Kriterien und lautet:

- (a) *eine Übereinstimmung der allgemeinen Musterkonfiguration,*
- (b) *eine qualitative Übereinstimmung der Minuzien (qualitativer Faktor),*
- (c) *der quantitative Faktor besagt, dass eine bestimmte Anzahl Minuzien gefunden sein muss (in Deutschland 12), und*
- (d) *gegenseitige Minuzienbeziehung; spezifiziert, dass korrespondierende Minuzien in gegenseitiger Beziehung sein müssen. In der Praxis wurde eine große Anzahl von komplexen Identifikationsprotokollen für den Fingerabdruckvergleich vorgeschlagen. Diese Protokolle sind aus der traditionellen daktyloskopischen Methodologie abgeleitet und geben eine exakte Vorgehensweise für das geschulte Fachpersonal vor.*

Obwohl sich die verschiedenen Protokolle im Ablauf des Vergleiches und der Entscheidungsdefinition unterscheiden, die wesentlichen Schritte bleiben die gleichen. Typischerweise läuft der Prozess des Vergleiches als iterativer dreistufiger Prozess ab. Am schwierigsten zu vergleichen sind zwei Fingerabdrücke, die sich in ihrer Musterkonfiguration ähneln. Falls dagegen beide Fingerabdrücke aus der Sicht der Musterkonfiguration gänzlich verschieden sind, ist es unmöglich, dass diese Abdrücke vom selben Finger stammen. Im nächsten Schritt werden die bedeutenden Minuzien gesucht, das Zentralgebiet gefunden und miteinander verglichen. Danach wird der entscheidende Vergleich der Minuzien durchgeführt, bei dem alle Minuzien in den Fingerabdrücken verglichen werden und eine Entscheidung aufgrund der identifizierten Paare und deren Konfiguration durchgeführt wird. Wegen der Variation der Fingerabdruckqualität sind nicht immer alle Punkte klar und mit einer gleichen Qualität definiert. Die Experten nutzen hier ihre Erfahrung, mit der sie eine Entscheidung über eine Übereinstimmung treffen können. Einige Gabelungen z. B. können als Endungen der Papillarlinien identifiziert werden, falls die Fingerandruckskraft gering war. Es ist klar, dass die Erfahrung der Experten immer eine gewisse Schlüsselrolle beim Fingerabdruckvergleich spielt. Die Abbildung 2.17 zeigt das Beispiel eines Vergleiches mit 18 entsprechenden Minuzien.

¹³ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

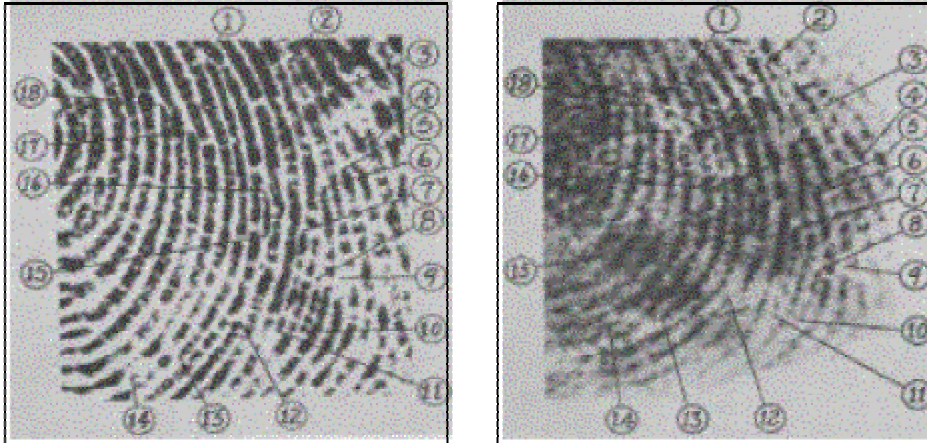


Abbildung 2.17: Daktyloskopischer Vergleich mit 18 entsprechenden Minuzien¹⁴

¹⁴ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

In diesem Unterkapitel werden die einzelnen Abschnitte der Applikation "Fingerabdruckerkennung mittels Minuzienvergleich" in Bildern dokumentiert (siehe Abbildung 2.18).

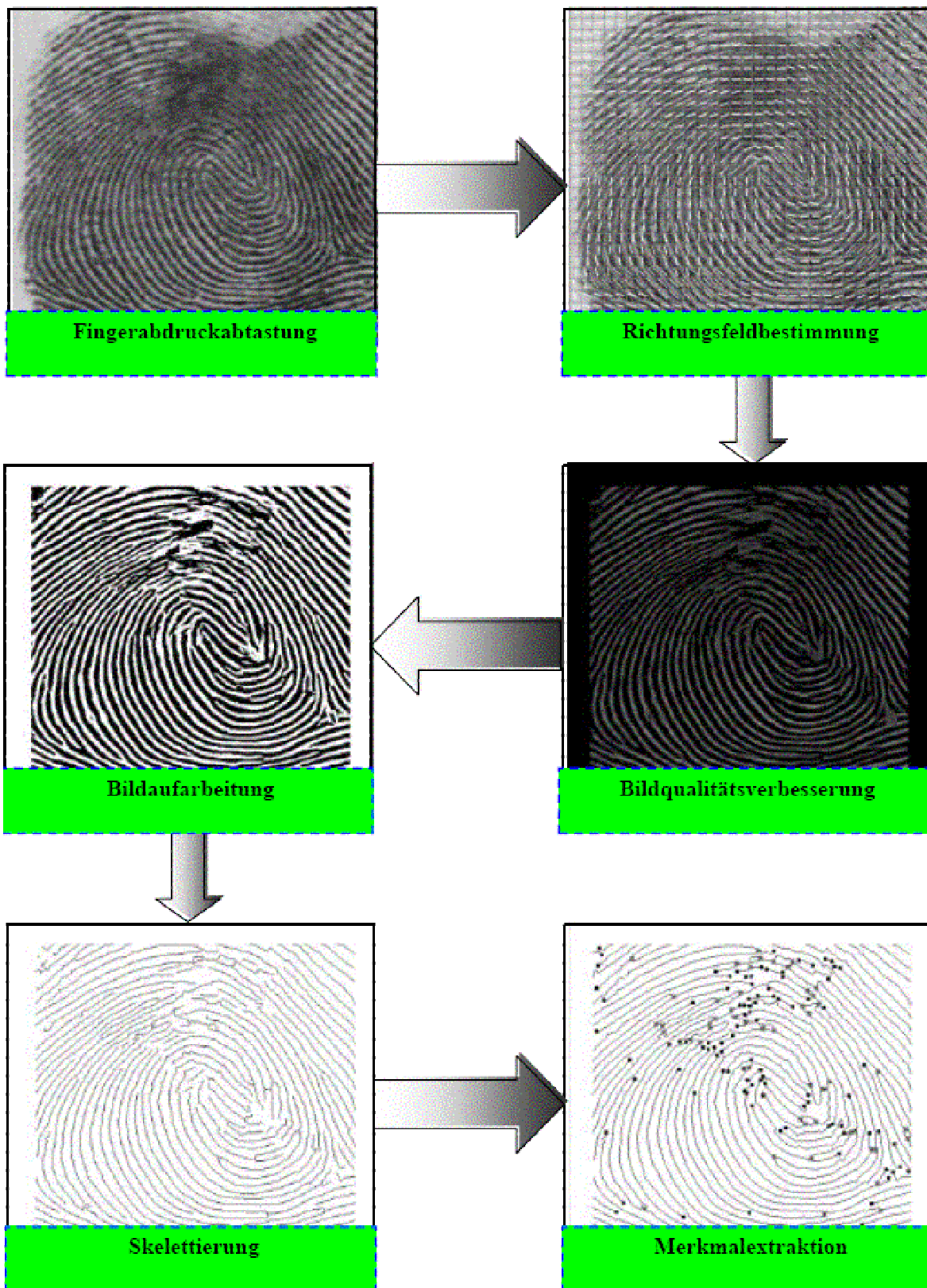


Abbildung 2.18: Minuzien-basiertes Fingerabdruckerkennungsverfahren¹⁵

¹⁵ Quelle: BSI-Studie "BioFinger"

Weitere Aussagen zur Erkennungsleistung und Sicherheit von marktverfügbaren Fingerabdruckerkennungsverfahren lassen sich dem öffentlichen Abschlussbericht des Projekts BioP II entnehmen, der demnächst auf der BSI-Webseite zum download zur Verfügung stehen wird.