



BACHELORARBEIT

Frau
Alina Malik

**Evaluierung einer Methode zur Erstellung
von Trajektorien für die digitale
Blutspurenmusteranalyse**

Mittweida, 12.08.2024

Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften

BACHELORARBEIT

Evaluierung einer Methode zur Erstellung von Trajektorien für die digitale Blutspurenmusteranalyse

Autorin:

Alina Malik

Studiengang:

Allgemeine und Digitale Forensik

Seminargruppe:

FO20w5-B

Erstprüfer:

Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde

Zweitprüfer:

Tommy Bergmann, M.SC.

Einreichung:

Mittweida, 00.00.12.08.2024

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2024

Faculty of **Applied Computer Sciences and Biosciences**

BACHELOR THESIS

Evaluation of a method for creating trajectories for digital Bloodstain pattern analysis

Author:

Alina Malik

Course of Study:

Applied Computer Science

Seminar Group:

FO20w5-B

First Examiner:

Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde

Second Examiner:

Tommy Bergmann, M.SC.

Submission:

Mittweida, 00.00.12.08.2024

Defense/Evaluation:

Mittweida, 2024

Bibliografische Beschreibung:

Malik, Alina:

Evaluierung einer Methode zur Erstellung von Trajektorien für die digitale Blutspurenmusteranalyse.
– 12.08.2024. – 33 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften, Bachelorarbeit, 2024.

Referat:

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Evaluierung einer Methode zur Erstellung von Trajektorien für die digitale Blutspurenmusteranalyse. Im Fokus steht die Analyse und Vergleichbarkeit eines Blender Add-ons, das die Flugbahnen von Blutropfen basierend auf der Stringing-Methode digital berechnet und visualisiert. Ziel der Arbeit ist es, die digitale Methode in einem Tatortmodell zu testen und ihre Genauigkeit, Robustheit und Anwendbarkeit im Vergleich zur traditionellen Stringing-Methode zu bewerten. Die Untersuchung soll zeigen, inwieweit die digitale Methode die herkömmliche Vorgehensweise ergänzen oder sogar ersetzen kann, um die Arbeit von Forensikern zu erleichtern und zu verbessern.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.1.1 Problemstellung	2
1.1.2 Ziel	2
2 Grundlagen	3
2.1 Biologische Eigenschaften des Blutes	3
2.2 Physikalische Eigenschaften des Blutes	4
2.2.1 Viskosität	4
2.2.2 Oberflächenspannung	4
2.3 Ballistik von Blutspuren	4
2.4 Auftreffphasen	5
2.5 Blutspurenmusteranalyse	6
2.5.1 Kategorisierung von Blutspuren	7
2.5.2 Photogrammetrie	7
3 Materialien und Methoden	9
3.1 Erstellung eines analogen Tatortmodells	9
3.2 Erzeugung idealisierter Blutspurenmuster	10
3.3 Analoge Visualisierung der Trajektorien	12
3.4 Erstellung eines digitalen Tatortmodells	13
3.5 Berechnung von Trajektorien mittels 3D-Modell	16
3.6 Modifikationen der Modelle	18
4 Ergebnisse	21
4.1 Fehlerprotokoll	24
4.2 Evaluierung	28
4.2.1 Stringing Methode	28
4.2.2 Digitale Trajektorien Bestimmung	28
4.2.3 Vergleich	29
5 Diskussion	33
Literaturverzeichnis	35
Eidesstattliche Erklärung	37

Abbildungsverzeichnis

2.1	Veränderung der Tropfspuren in Abhängigkeit des Auftreffwinkels auf glattem (links) und rauem Untergrund (rechts) (Abbildung nach Grassberger <i>et al.</i> [1])	5
2.2	Auftreffphasen eines Blutropfens von links nach rechts: intakter Blutropfen, Kontakt/Kollaps, Verlagerung, Dispersion, Retraktion (Abb. nach Peschel <i>et al.</i> [4])	6
2.3	Schematische Darstellung der trigonometrischen Berechnung des Ursprungsareals	6
3.1	Tatortmodell von Alexander Köhler	10
3.2	Aufbau der Vorrichtung um idealisierte Blutspuren zu erzeugen	11
3.3	idealisierte Blutspur aus einer Höhe von ca. 25cm und einem Winkel von 30°	11
3.4	Tatortmodell mit idealisierten Blutspuren beklebt	11
3.5	Morphologie von Blutropfen bei verschiedenen Winkeln (Abb. nach Kunz <i>et al.</i> [14])	12
3.6	Durchführung der Stringing Methode	13
3.7	schematische Darstellung der Bewegungsrichtung während der photogrammetrischen Modellerstellung	15
3.8	Modifikation der UV-Map und die Auswirkung auf das Modell	17
3.9	Ausschnitt der Maßangaben der Blutspuren in einer .Comma-separated values (csv)-Datei	18
3.10	Modifikation der UV-Map und die Auswirkung auf das Modell	19
4.1	Ergebnisse der Vorverarbeitung	21
4.2	Ergebnisse des Modells mit Verwendung der zwei Algorithmen	22
4.3	Platzierung der Trajektorien in dem Modell	23
4.4	mit Stringing Methode visualisierte Flugbahnen im Tatortmodell	23
4.5	Trajektorien der Methoden im Vergleich	24
4.6	UV-Map des 3. Modells im Object Mode	25
4.7	Ergebnis des Canny-Algorithmus mit den Werten 75/104	25
4.8	Darstellung des fehlerhaften zweiten Modells	26
4.9	Beispielhaftes Bild mit erkennbaren dunkleren Rand	26
4.10	dunkle untere Bereiche nach Abnehmen der Decke	27
4.11	Spannungsverlust der Fäden durch bewegliches Papier	27
4.12	Vergleich der Robustheit in Bezug auf einen dunklen Untergrund	30

Tabellenverzeichnis

2.1 Kategorien von Blutspuren	7
3.1 Materialien der idealisierten Blutspuren	10
3.2 Materialien Stringing Methode	12
3.3 Dauer der Stringing Methode	13
3.4 Materialien der Photogrammetrie (a)	13
3.5 Materialien der Photogrammetrie (b)	14
3.6 Daten zur Modellerstellung wie Dauer, Anzahl der Bilder, Anzahl Schlüsselpunkte und Kamera-Einstellungen	16
4.1 Vergleich Materialbedarf und Zeit	30

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
BPA	Bloodstain Pattern Analysis
csv	Comma-separated values
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
obj	Wavefront Object
ply	Polygon File Format

1 Einleitung

Die Forensik ist eine Kriminalwissenschaft, die alle Arbeitsgebiete umfasst, die kriminelle Handlungen identifizieren, ausschließen, analysieren und rekonstruieren. Der Begriff Forensik leitet sich aus dem lateinischen *forum* für Marktplatz ab. Historisch war der Marktplatz oft der Schauplatz der Gerichtsbarkeit. Schon hier wird die Verbindung zum Rechtssystem deutlich. Neben Aussagen von Beschuldigten und Zeugen sind die objektiven Befunde und Spuren die wichtigsten Beweismittel in einem Gerichtsverfahren. [1, 2]

Die zwei größten Pioniere, die die Forensik vortrieben und etablierten, sind Hans Gross (1847-1915) und Dr. Edmond Locard (1877-1966). Edmond Locard entwickelte um 1930 das Locard'sche Austauschprinzip, welches besagt, dass jeder und alles etwas am Tatort zurücklässt und etwas mitnimmt. Dieses Prinzip ist bis heute ein Grundpfeiler der forensischen Wissenschaften und betont die Bedeutung der Spurensicherung. [1, 3]

Die Spuren, die man an jedem und allem finden kann, werden in vier Spurenkategorien eingeteilt: Formspuren, Situationsspuren, Gegenstandsspuren und Materialspuren. In dieser Arbeit sind die Blutspuren von besonderem Interesse, besonders im Kontext der Kategorie Materialspuren [3]. Materialspuren können vielfältige Informationen liefern und sind oft entscheidend für die Rekonstruktion des Tatgeschehens.

Blut wird nicht ohne Grund als „Lebenselixier“ bezeichnet, denn es ist für die lebenswichtige Versorgung der Organe zuständig. Da es in jedem Menschen vorhanden ist, findet man es auch oft an Tatorten. Blutspuren können Informationen über die in die Tat verwickelten Personen und den Tathergang liefern. Es können Aussagen über die Art der Blutspur und deren Herkunft im Raum getroffen werden. Durch die Blutspurart kann die Bewegungsrichtung und Position von Personen und Gegenständen bestimmt werden. Zudem können Aussagen über die Distanz der gefundenen Blutspur und ihrem Ursprung getroffen werden. [3, 4]

Die Disziplin der Forensik, die sich mit eben diesen Mustern von Blut auseinandersetzt, ist die Blutspurenmusteranalyse (englisch [Bloodstain Pattern Analysis \(BPA\)](#)). Die ersten wissenschaftlichen Untersuchungen machte Eduard Piotrowski, der 1895 eine Monografie mit dem Titel „Über Entstehung, Form, Richtung und Ausbreitung der Blutspuren nach Hieb- und Stichwunden des Kopfes“ verfasste. In seinen Experimenten schlug Piotrowski Kaninchen die Schädel ein und zeichnete dann die entstandenen Muster auf. Er dokumentierte auch genau das Gewicht und die Maße der verwendeten Waffen.[5]

Die aktuelle forensische Wissenschaft verlagert sich bei der Analyse, Dokumentation und Rekonstruktion von Tatorten und Spuren zunehmend in den digitalen Raum. Auch die [BPA](#) wird fortlaufend erforscht und weiterentwickelt. So können Blutspuren in einem digitalen Modell des Tatorts genau nachvollzogen und analysiert werden. Auch die digitale Bestimmung der Flugbahn von Blutropfen ist möglich. Es wird kontinuierlich daran gearbeitet, zuverlässige Algorithmen und Methoden zu entwickeln. Die Hochschule Mittweida forscht ebenfalls in diesem Bereich. So schrieb Gina Marie

Pfeiffer im Rahmen ihrer Bachelorarbeit 2023 ein Blender Add-on, um Flugbahnen von Blutropfen auf Basis der Stringing-Methode digital zu berechnen und zu visualisieren. Mit dieser Methode soll der Ursprungsort der Blutspuren herausgefunden werden.

In dieser Arbeit gilt es, das Add-on in einem Tatortmodell zu testen und zu evaluieren. Als Vergleich wird hierbei die herkömmliche Stringing-Methode herangezogen. Durch diese Untersuchung sollen die Vor- und Nachteile der digitalen Methode im Vergleich zur traditionellen Methode herausgearbeitet werden. Ziel ist es, zu bewerten, ob und in welchem Umfang die digitale Methode die analoge Methode ersetzen oder ergänzen kann, um die Arbeit der Forensiker zu erleichtern und zu verbessern.

1.1 Motivation

Die Arbeit der Forensiker ist oftmals mühsam und zeitaufwendig, insbesondere wenn es um die Analyse von Blutspuren an Tatorten geht. Die digitale Blutspurenmusteranalyse (BPA) bietet hier enormes Potenzial, um die Prozesse zu automatisieren und zu verbessern. Durch die Evaluierung von Methoden zur Erstellung von Trajektorien können Forensiker effizienter und genauer arbeiten. Diese Arbeit knüpft an die Entwicklungen der Hochschule Mittweida an, wo bereits ein Blender Add-on zur digitalen Berechnung und Visualisierung von Flugbahnen von Blutropfen entwickelt wurde. Die fortlaufende Verbesserung und Validierung solcher digitaler Methoden soll dazu beitragen, die analogen Verfahren in Zukunft weitgehend zu ersetzen und somit die forensische Arbeit zu erleichtern.

1.1.1 Problemstellung

Die Methode zur digitalen Erstellung von Trajektorien, wie sie von Gina Marie Pfeiffer in ihrer Bachelorarbeit entwickelt wurde, ist noch nicht umfassend getestet und erprobt. Genauso ist das Tatortmodell von Alexander Köhler noch nicht in Versuchen erprobt wurden. Die Herausforderung besteht darin, das entwickelte Add-on in realistischen Tatortmodellen zu testen und seine Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit im Vergleich zur traditionellen Stringing-Methode zu evaluieren.

1.1.2 Ziel

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, die Anwendbarkeit der digitalen Methode zur Erstellung von Trajektorien zu überprüfen und mögliche Schwächen zu identifizieren. Dabei wird das von Gina Marie Pfeiffer entwickelte Blender Add-on anhand eines Tatortmodells getestet und die Ergebnisse mit der traditionellen Stringing-Methode verglichen. Durch diese Evaluierung sollen Erkenntnisse gewonnen werden, die zur Weiterentwicklung und Optimierung der digitalen Blutspurenmusteranalyse beitragen können.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zu Grunde liegenden Aspekte von Blut, Blutspuren und klassischer sowie digitaler Blutspurenmusteranalyse dargestellt. In der klassischen Blutspurenmusteranalyse spielen dabei die Area of Convergence und Area of Origin eine große Rolle. Diese können mit Hilfe von den Auftreffwinkeln der Blutspuren bestimmt werden. Weiterhin wird für die digitale Blutspurenmusteranalyse die Photogrammetrie erklärt, denn diese ist für die 3D-Modellerstellung äußerst wichtig.

2.1 Biologische Eigenschaften des Blutes

Der menschliche Körper enthält zwischen 70 ml und 80 ml Blut pro Kilogramm Körpergewicht, was bedeutet, dass ein durchschnittlicher Erwachsener etwa 5 bis 6 Liter Blut in seinem Kreislaufsystem hat. Dieses Blut besteht aus rund 55% flüssigem Blutplasma und 45% Blutzellen, also den festen Blutbestandteilen [6].

Blut ist ein flüssiges Bindegewebe mit zwei Hauptfunktionen: Transport und Verteidigung [7]. Das Blutplasma, welches den flüssigen Bestandteil bildet, transportiert Sauerstoff, Hormone und Nährstoffe zu den Zellen im Körper. Gleichzeitig befördert es Kohlendioxid und andere Stoffwechselabfallprodukte zu den Ausscheidungsorganen wie den Lungen und den Nieren. Dies ist entscheidend für die Aufrechterhaltung der Homöostase und die Versorgung der Zellen mit lebenswichtigen Substanzen.[8]

Die Verteidigungsfunktion des Blutes wird hauptsächlich durch die Leukozyten (weiße Blutkörperchen) und Thrombozyten (Blutplättchen) ausgeübt. Leukozyten sind essenziell für das Immunsystem; sie bekämpfen Krankheitserreger und infizierte Zellen, indem sie diese erkennen, angreifen und zerstören. Es gibt verschiedene Arten von Leukozyten, darunter Neutrophile, Lymphozyten, Monocyten, Eosinophile und Basophile, die jeweils spezifische Rollen im Abwehrmechanismus des Körpers spielen. [3]

Thrombozyten sind kleine, aber wichtige Zellfragmente, die bei Verletzungen den Gerinnungsprozess einleiten. Sie haften an beschädigten Gefäßwänden, setzen chemische Signale frei, die weitere Thrombozyten anziehen, und bilden zusammen mit Fibrin ein Gerinnsel, das die Blutung stoppt und den Heilungsprozess unterstützt. [3]

Zusätzlich zur Transport- und Verteidigungsfunktion spielt das Blut eine zentrale Rolle in der Thermoregulation des Körpers. Es hilft, die Körpertemperatur zu regulieren, indem es Wärme von den inneren Organen zu den Körperoberflächen transportiert, wo sie abgegeben werden kann. Dies trägt zur Aufrechterhaltung einer konstanten Körpertemperatur bei, die für das optimale Funktionieren der Enzyme und Stoffwechselprozesse notwendig ist. [3, 7]

Insgesamt ist das Blut ein äußerst komplexes und vielseitiges Gewebe, das viele lebenswichtige Funktionen erfüllt. Das Verständnis seiner Zusammensetzung und seiner vielfältigen Rollen ist grundlegend für die Medizin und insbesondere für die Forensik, wo Blutspurenmuster wertvolle Informationen über den Ablauf von Gewaltverbrechen liefern können.

2.2 Physikalische Eigenschaften des Blutes

Die zwei wichtigsten physikalischen Eigenschaften, die bei der Blutspurenmusteranalyse eine Rolle spielen, sind Viskosität und Oberflächenspannung. Diese Eigenschaften sind eng miteinander verbunden und variieren je nach Spezies, Alter und Geschlecht.

2.2.1 Viskosität

Die Viskosität beschreibt die Zähflüssigkeit eines Fluids. Je höher die Viskosität, desto dickflüssiger ist das Fluid. Das bedeutet im Umkehrschluss: Je niedriger die Viskosität, desto dünnflüssiger ist das Fluid. Die Blutviskosität wird unter anderem von der Temperatur und dem Hämatokritwert bestimmt [4]. Der Hämatokritwert oder auch Erythrokritwert gibt den Anteil an roten Blutkörperchen am Gesamtblut an. Er beträgt bei erwachsenen Männern 44% bis 46% und bei Frauen 41% bis 43% [3].

In zähen Flüssigkeiten ist die innere Reibung zwischen den Teilchen stärker. Da Blut nichtnewtonische Eigenschaften besitzt, nimmt die innere Reibung mit steigenden Viskositätswerten überproportional zu [3]. Im Vergleich zu Wasser resultiert dies in einer verzögerten Dynamik bei gleicher Krafteinwirkung [9]. Blut zeigt zudem eine scherverdünnende Eigenschaft, das bedeutet, dass die Viskosität bei steigender Scherrate abnimmt. Dies ist besonders relevant, wenn Blut durch enge Kapillaren fließt oder wenn es bei hoher Geschwindigkeit auf eine Oberfläche trifft. [10]

2.2.2 Oberflächenspannung

Oberflächenspannung entsteht durch die kohäsiven Kräfte zwischen den Molekülen einer Flüssigkeit, die dazu führen, dass die Flüssigkeit eine möglichst kleine Oberfläche einnimmt. Im Fall von Blut sind die Oberflächenspannungskräfte hauptsächlich auf die Wechselwirkungen zwischen den Wasser- und Proteinkomponenten im Plasma zurückzuführen [11].

Diese Oberflächenspannung ist verantwortlich dafür, dass Blutstropfen in der Luft eine kugelförmige Gestalt annehmen, da dies die energetisch günstigste Form ist. Wenn Blut auf eine feste Oberfläche trifft, spielen sowohl die Kohäsionskräfte innerhalb des Blutes als auch die Adhäsionskräfte zwischen dem Blut und der Oberfläche eine Rolle. Die Adhäsion beschreibt die Anziehungskräfte zwischen den Molekülen des Blutes und den Molekülen der Oberfläche, auf die es trifft. Diese Kräfte sind entscheidend dafür, wie gut Blut an einer Oberfläche haftet und welche Muster sich beim Auftreffen des Blutes bilden. [4, 12]

Zusammengefasst sind sowohl Viskosität als auch Oberflächenspannung entscheidende Faktoren bei der Analyse von Blutspuren. Sie beeinflussen, wie Blut sich bewegt, spritzt und auf Oberflächen haftet, was wiederum wertvolle Hinweise auf den Ablauf eines Verbrechens liefern kann.

2.3 Ballistik von Blutspuren

Ein Bluttröpfchen, das sich durch die Luft bewegt, wird grundsätzlich von zwei Kräften beeinflusst - dem Luftwiderstand und der Schwerkraft. Die Schwerkraft wirkt auf Bluttröpfchen ausschließlich vertikal. Im Vakuum würden die Flugbahnen der Tropfen Parabeln entsprechen. Angesichts des Luftwiderstands

weichen sie jedoch von Parabeln ab und beschreiben sogenannte ballistische Kurven [4]. Umso weiter sich die Blutspur von ihrem Ursprung entfernt desto höher ist der Unterschied zwischen der Parabel und der ballistischen Kurve [4]. Tropfen werden aufgrund ihrer Größe und Geschwindigkeit unterschiedlich stark vom Luftwiderstand beeinflusst. Das bedeutet, dass bei gleicher Geschwindigkeit kleine Tropfen kurze Entfernungen, dagegen große Tropfen wesentlich größere Strecken zurücklegen können [13]. Kleinste Blutspuren, wie sie bei Schussereignissen zu finden sind, werden selbst bei hohen Geschwindigkeiten nur begrenzt von ihrem Ursprung entfernt sein. [4]

2.4 Auftreffphasen

Beim Aufprall eines Blutropfens auf eine Fläche lassen sich vier Phasen des Auftreffens unterscheiden: Kontakt bzw. Kollaps, Verlagerung, Dispersion und Retraktion. Abbildung 2.2 zeigt die verschiedenen Phasen eines Blutropfens bei dem Auftreffen auf einer Oberfläche.

In der ersten Phase des Kontakts bzw. Kollaps kommt es zu dem Zusammenfall der sphärischen Form des Tropfens.

Bei der Verlagerung kommt es zu einer Bewegung eines Großteils der Blutmasse entlang der Zielloberfläche, in den äußeren Grenzbereich der Spur. Hier ist die Oberflächenspannung noch intakt. Am Rand des Tropfens können bei einem Winkel von 90° , je nach Untergrund kronenkorkenähnliche Auszieher gegebenfalls mit Satelliten-Tropfspuren entstehen. Bei flacher werdenden Winkeln entstehen sogenannte Bärenatzenformen. Diese gehen in längliche, elliptische Tropfspuren über, die bei extrem flachen Winkeln in Kegel- beziehungsweise Ausrufezeichenform umschlagen (siehe Abb. 2.1). Nimmt die Fallhöhe zu wird auch die Verlagerung der Blutmasse zunehmend mehr, dies trifft auch auf die Dispersion zu. Die Dispersion bezeichnet die Bewegung des Randes entgegen-

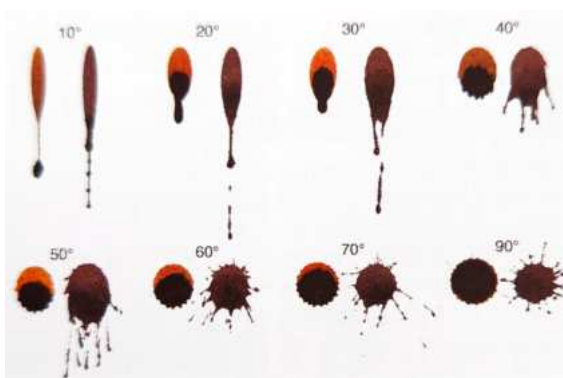


Abbildung 2.1: Veränderung der Tropfspuren in Abhängigkeit des Auftreffwinkels auf glattem (links) und rauem Untergrund (rechts) (Abbildung nach Grassberger *et al.* [1])

gesetzt der eigentlichen Bewegungsrichtung. Auch hier spielt die Oberflächenspannung eine Rolle. Ungeachtet dessen entstehen feine Ausläufer oder Satellitentropfen, wie in der Verlagerung.

In der letzten Phase, der Retraktion, zieht sich der Blutropfen infolge der Oberflächenspannung zusammen. Alle anderen auf ihn einwirkenden Kräfte wurden abgebaut, sodass die Oberflächenspannung überwiegt. [1, 4, 13]

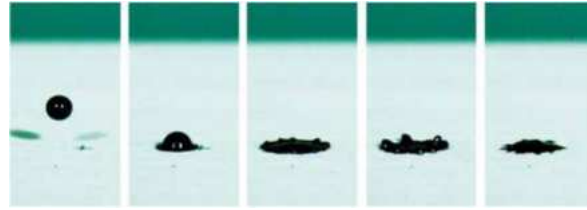


Abbildung 2.2: Auftreffphasen eines Blutropfens von links nach rechts: intakter Blutropfen, Kontakt/Kollaps, Verlagerung, Dispersion, Retraktion (Abb. nach Peschel *et al* [4])

2.5 Blutspurenmusteranalyse

Die Blutspurenmuster-Verteilungsanalyse (englisch Bloodstainpattern analysis, kurz **BPA**) ist eine medizinisch-kriminalistische Subdisziplin, die sich mit den Formen, der Verteilung, der Kategorisierung und Interpretation von tatrelevanten Blutspuren beschäftigt [1][13]. Systematische Untersuchungen zu Form und Verteilung von Blutspuren fanden erstmals am Wiener Institut für Gerichtliche Medizin 1895 statt. Wichtig für eine **BPA** ist eine gründliche und fachgerechte Spurensicherung am Tatort. Hierzu gehört vor allem das schriftliche und fotografische Dokumentieren aller vorhandenen Spuren. [14]

Darüber hinaus wird das dreidimensionale Ursprungsareal geeigneter Blutspuren trigonometrisch ermittelt (siehe Abbildung 2.3). Zunächst wird das Konvergenzareal (engl. Area of Convergence) berechnet. Dieses Areal liegt im zweidimensionalen Bereich. Geeignete Spuren um ein solches Areal ausfindig zu machen sind zum Beispiel Tropf- oder Spritzspuren. Hierzu werden die Längsachsen der Blutropfen verlängert. Dabei entsteht eine Schnittfläche, das Konvergenzareal. Um das genaue Ursprungsareal (engl. Area of Origin) zu berechnen erfolgt zuerst die Berechnung des Auftreffwinkels α . Dieser ist nach Messung von Länge und Breite der Blutspur folgendermaßen zu berechnen: $\alpha = \arcsin \frac{\text{Breite}}{\text{Länge}}$. Mit Kenntnis des Auftreffwinkels α kann die Flugbahn (Trajektorie) des Blutropfens bestimmt werden. Über dem Konvergenzareal liegt im 90° Winkel das Ursprungsareal. Auf dieser Geraden wird die Höhe eingezeichnet. Der Schnittpunkt der Höhe und der Trajektorien resultieren im Ursprungsbereich. Es können nun Informationen über Position des Opfers und Veränderungen der Schlagposition des Täters gewonnen werden. Dazu existieren Methoden wie die "Stringing-Methode" (deutsch Fadenprojektion) oder **EDV**-gestützte Methoden. So werden ein oder mehrere Konvergenzareale im Tatortbereich ermittelt. [1, 14]

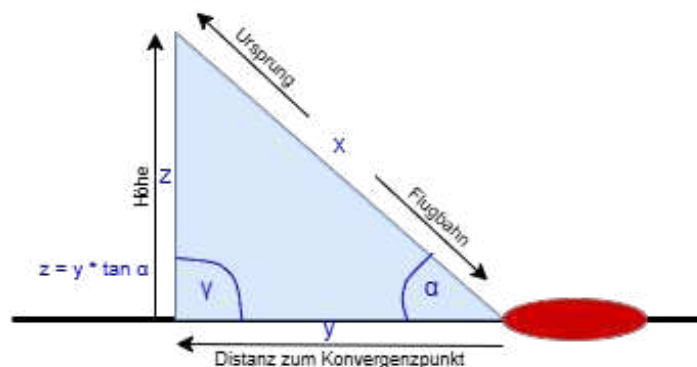


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der trigonometrischen Berechnung des Ursprungsareals

Die Blutspurenmuster-Verteilungsanalyse kann bei sorgfältiger Ausführung Fragen zum Tatgeschehen näher erläutern. So ist es möglich Aussagen zu Anzahl und Intensität der Gewalteinwirkungen sowie zeitlicher und räumlicher Abfolge von Ereignissen zu treffen. [1]

2.5.1 Kategorisierung von Blutspuren

Durch Verletzungen in Rahmen eines Tatgeschehens gelangt Blut an Oberflächen und Gegenstände des Tatortes. Es entstehen bestimmte sich voneinander zu unterscheidende Blutspurenbilder. Die nachfolgend benutzte Kategorisierung solcher Blutspurenbilder orientiert sich an dem Konsens der „Arbeitsgruppe für Blutspurenmuster-Verteilungsanalyse“ der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin (siehe Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Kategorien von Blutspuren

Passive Spuren	Transferspuren	Projizierte Spuren	Varia
(Ab-) Tropfspur	Abdruckspur	Arteriell Spritzmuster	Spritzerschatten
Abrinn- bzw. Fließspur	Wischspur	Schleuderspur	skelettierte Spuren
Blutgerinnsel	Durchwischspur	(Schlag-) Spritzspur	Spurenübertragung durch Fliegen
Poolspur		Rückwärtsspritzer und Vorwärtsspritzer	
Serumseparation		Expirationsspur	
Blutdurchtränkung		Fadenförmige Auszieher	

Peschel *et al.* [15] beschreibt die ersten drei Kategorien folgendermaßen: (Übersetzung aus dem Englischen durch den Autor)

1. Passive Spuren sind Fließmuster oder Tropfspuren entstanden oder geformt durch Gravitationskraft allein. [...]
2. Transfer- bzw. Kontakts Spuren sind Blutspurenmuster die entstehen, wenn eine feuchte blutige Oberfläche in Kontakt mit einer zweiten Oberfläche kommt. [...]
3. Projizierte Spuren entstehen, wenn eine Blutquelle einer höheren Kraft als der Gravitation ausgesetzt ist. [...]

Unter Varia versteht man Blutspuren die keiner der 3 anderen Kategorien eindeutig zugeordnet werden können.

2.5.2 Photogrammetrie

Photogrammetrie ist nach Förstner und Schindler [16] die Wissenschaft und Technologie der Gewinnung von Informationen über die physische Umwelt aus Bildern, mit einem Schwerpunkt auf Vermessung, Kartierung und hochgenauer Messtechnik [17]. Sie wird benutzt um dreidimensionale Daten eines Objektes in digitaler Form zu erhalten. Photogrammetrie wird in vielen Bereichen benutzt, angefangen mit dem Kartografieren über Architektur, Archäologie, Geologie, Animations- und Filmindustrie bis hin zur Forensik.

Zur Erstellung eines digitalen Tatorts in der Forensik wird die terrestrische oder Nahbereichsphotogrammetrie verwendet. Diese verarbeitet die aufgenommenen Bilder von einem festen irdischen Standort aus. Im Gegensatz zur Luftbildphotogrammetrie oder Satellitenphotogrammetrie, die Bilder aus weiterer Entfernung aus der Luft verwenden. [18]

Im Prinzip gebraucht die Photogrammetrie Triangulation. Bilder von mindestens zwei unterschiedlichen räumlichen Positionen werden überlappend gefertigt. Es können so Sichtlinien vom Objekt zu der Kamera gerichtet werden. Der Schnittpunkt von mindestens zwei dieser Sichtlinien bestimmt einen Punkt im dreidimensionalen Raum. Photogrammetrie nutzt die Position der Kamera während sie sich durch den Raum bewegt um die dreidimensionalen Koordinaten des Objekts zu errechnen. In der Praxis kann bei präziser und korrekter Ausführung ein detailgetreues 3D-Modell erstellt werden. [18]

Im Forensischen Kontext der Blutspurenmuster-Verteilungsanalyse ist derselbe Abstand von Objekt und Kamera einzuhalten um eine gleiche Auflösung im gesamten Modell zu garantieren. Im Modell lassen sich mit Hilfe von Photogrammetrie Texturen besonders gut darstellen. So sind die Blutspuren in ihren Umrissen und Farbnuancen detailliert erkennbar. Durch das präzise Arbeiten werden viel Fotos mit genügend Überlappung benötigt, dass kann bei all zu großen Tatorten zu zeitintensiv sein. [19]

Eine weitere Möglichkeit der Modellerstellung wäre durch terrestrisches Laserscanning. Laserscanning kann innerhalb von kürzester Zeit große Bereiche erfassen und besonders gut die Oberflächenstruktur darstellen. Dafür gibt es bei schwer zugänglichen Bereichen, wie versteckten Ecken, Schwierigkeiten. Deswegen muss der Laserscanner auch von mindestens zwei Standorten aufnehmen um blinde Flecken im fertigen Modell zu vermeiden. Da der Raum in diesem Tatortmodell begrenzt ist und es durchaus schwierig zu erfassende Areale gibt, wird die Photogrammetrie als Ideal betrachtet. [19]

3 Materialien und Methoden

Diese Arbeit stützt sich auf die Arbeiten von Alexander Köhler [20] und Gina Marie Pfeiffer [21]. In dieser Arbeit geht es vorrangig um die Evaluierung von Trajektorien, da die bestehende Methode noch nicht getestet wurde. Es gilt weiterhin zu testen ob das Modell auch in erzeugten Tatorten die Trajektorien der Blutspuren richtig berechnet und eine Area of Origin finden könnte. Die Evaluierung der Methoden soll mit Hilfe von idealisierten Blutspuren erfolgen. Diese werden fotografisch gesichert. Danach werden die Fotografien in beliebiger Größe und Richtung im analogen Tatortmodell platziert um die theoretischen Trajektorien der Blutspuren analog zu ermitteln. Nach der analogen Ermittlung erfolgt die photogrammetrische Erstellung eines 3D-Modells des Tatortmodells. Dieses 3D-Modell ist die Grundlage für die digitale Ermittlung der Trajektorien mit den Blender Add-on von Gina Marie Pfeiffer[21].

3.1 Erstellung eines analogen Tatortmodells

Das hochschulinterne Tatortmodell, welches aus Moderationstafeln fixiert mit Panzertape und überzogen mit Abdeckplane, Müllsäcken und Papier entstand [22], wurde 2023 von Alexander Köhler überarbeitet. Das überarbeitete Tatortmodell besteht nun aus Fichten- beziehungsweise Tannenholz. Es ist 200 cm hoch, 140 cm breit und 180 cm lang. Die Konstruktion ist mit einer eingebauten Tür leicht begehbar. Der Rahmen wird mithilfe von Steckverbindungen befestigt. Für die Wandverkleidung wurde sich für Nut- und Federbretter entschieden, die mithilfe einer Profilleiste leicht gesteckt werden können. Der Innenraum wird nach Montage mit Abdeckfolie ausgekleidet, diese verhindert das Durchsickern von Blut und anderen Flüssigkeiten in das hölzerne Grundgerüst. Danach kann der Raum, je nach Experiment mit anderen Materialien ausgekleidet werden. Bei dieser Konstruktion wurde die Oberseite offen gelassen damit das Licht über dem Modell, den Raum ausleuchten kann. Nach der Arbeit von Alexander Köhler wurde eine abnehmbare Decke hinzugefügt. So ist es nun auch möglich in einem komplett dunklen Raum Versuche mit beispielsweise unterschiedlichen Lichtspektren durchzuführen. Zur Demontage und Remontage dieses Tatortmodells steht eine Anleitung zur Verfügung. Abbildung 3.1 zeigt das Tatortmodell im Zustand dieser Arbeit in zwei verschiedenen Winkeln. [20]

Nach ersten Versuchen mit der Decke des Modells wurde sich entscheiden diese abzunehmen, um eine bessere Beleuchtung zu gewährleisten. Näheres über die frühen Versuche und die Fehler ist im Abschnitt 4.1 nachzulesen. Der Innenraum wurde zudem mit Bahnen von Plotterpapier ausgekleidet.



(a) Tatortmodell im Zustand der Bachelorarbeit



(b) Tatortmodell mit Blick auf das Innere durch die offene Tür

Abbildung 3.1: Tatortmodell von Alexander Köhler

3.2 Erzeugung idealisierter Blutspurenmuster

Um eine kontrollierte Umgebung des Versuchs zu schaffen, werden idealisierte Blutspuren erzeugt. So soll überprüft werden ob die digitale Methode die Trajektorien richtig berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass diese großen idealisierten Blutspuren besser für die Algorithmen erkennbar sind. Zudem sollen die wenigen idealisierten Blutspuren den Berechnungs- und Bearbeitungszeit verkürzen. Die idealisierten Blutspuren werden aus einer definierten Höhe und einem definierten Winkel erzeugt. Folgende Materialien werden benötigt:

Tabelle 3.1: Materialien der idealisierten Blutspuren

Idealisierte Blutspuren	Beschreibung
Untergrund	Weißes Kopierpapier
Schweineblut	Frisches Schweineblut aus der Fleischerei Richter in Mittweida, ohne Zusätze
Pipette	Handelsübliche Kunststoffpipetten
Winkelmesser	Digital der Firma Newaner mit einer Faltlänge von 20 cm und einer Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ$
Lineal	45cm langes Holzlineal
Whiteboard	Mobiles Whiteboard
Magnete	Einfache Magnete

Als Untergrund wird anfangs ein weißes Blatt Papier verwendet. Im weiteren Verlauf des Versuchs kann der Untergrund auch gewechselt werden um die Robustheit der Methoden zu überprüfen. Der Untergrund, beispielsweise Papier, wird mithilfe von Magneten auf dem Whiteboard befestigt. Das Whiteboard wird nun mittels des Winkelmessers auf einen bestimmten Winkel eingestellt (siehe Abbildung 3.2). Die Pipette mit dem aufgezogenen Schweineblut wird über den auf dem Whiteboard befestigten Untergrund senkrecht gehalten. Das Halten der Pipette auf einer bestimmten Höhe erfolgt mit dem Lineal. Es muss eine Höhe von mindestens 25cm bewahrt werden um eine aussagekräftige Blutspur zu erhalten, denn erst ab dieser Höhe gibt es eine gravierende Veränderung der Blutspur [2]. Um andere Winkel einzustellen wird der Winkelmesser an der Tafel angelegt um den Winkel einzustellen. In dieser Arbeit wurden Blutspuren aus den Höhen 25 cm, 35 cm und 45 cm gemacht. Dabei wurden 90° , 70° , 50° und 30° als Winkel eingestellt. Abbildung 3.3 zeigt eine solche idealisierte Blutspur aus einer Höhe von 25 cm in einem Winkel von 30° .

Die Blutspuren werden nun fotografisch gesichert. Dafür wurde immer die Spiegelreflexkamera Panasonic® LUMIX DC-G91M verwendet. Die Fotos wurden mit einem ISO Wert von +1,66 angefertigt um die unzureichende Helligkeit auszugleichen. Nach dem fotografieren wurden die Blutspuren katalogisiert und in beliebigen Größen ausgedruckt. Dafür wurde der Drucker der Hochschule benutzt.

Die idealisierten Blutspuren werden zufällig im Tatortmodell platziert um mit der digitalen und analogen Trajektorien Erstellung fortzufahren. Der präparierte Raum ist in der Abbildung 3.4 zu sehen. Insgesamt wurden 38 Spurenbilder im Tatortmodell verteilt. Diese Anzahl von Spuren ist immer, in jedem Versuch im Tatortmodell vorzufinden.

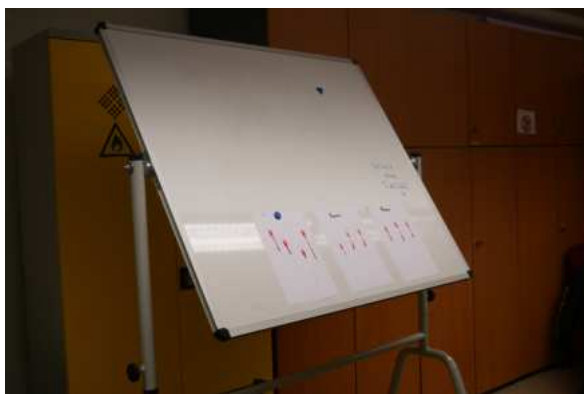


Abbildung 3.2: Aufbau der Vorrichtung um idealisierte Blutspuren zu erzeugen

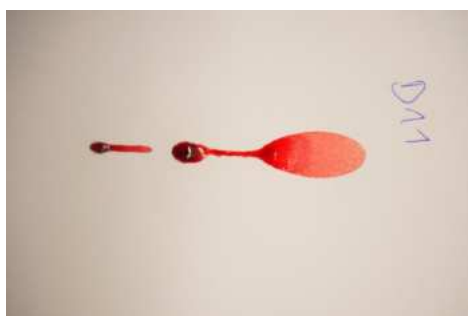


Abbildung 3.3: idealisierte Blutspur aus einer Höhe von ca. 25cm und einem Winkel von 30°



Abbildung 3.4: Tatortmodell mit idealisierten Blutspuren beklebt

3.3 Analoge Visualisierung der Trajektorien

Um die Trajektorien analog zu berechnen und zu visualisieren wird die Stringing Methode verwendet. Bisher sind qualifizierte öffentlich zugängliche Quellen über die Stringing Methode schwer zu finden. Um die Methode möglichst genau Anwenden zu können wurde dabei auf einen kurzen Absatz aus dem Forensic Science International [23] und einem Lehrvideo auf YouTube mit dem Titel "How to String a Crime" [24] zurückgegriffen. Dieses Video vermittelte die Anwendung der Methode verständlich und im Detail. Die verwendeten Materialien zur Durchführung der Stringing Methode werden in Tabelle 3.2 aufgeführt. Allgemein werden für die Methode nicht elastischer Faden und Klebeband

Tabelle 3.2: Materialien Stringing Methode

Stringing Methode	Beschreibung
Faden	Schulgarn 100% Baumwolle
Klebeband	durchsichtiges Klebeband der Firma Tesa
Winkelmesser und Lineal	digitales Winkelmesser der Firma Newaner mit einer Faltlänge von 20cm und einer Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ$
Schere	handelsübliche Bastelschere
Taschenrechner	Casio fx-9860GII1

benötigt. Um die Methode anzuwenden werden geeignete Blutropfen gefunden. Die Blutropfen werden vermessen und es wird wie in Abschnitt 2.5 beschrieben der Auftreffwinkel berechnet. In dieser Arbeit wurde bei der Berechnung des Auftreffwinkel zwei verschiedene Methodiken angewendet. Im ersten Versuch erfolgte die Berechnung der Winkel mithilfe eines Taschenrechners, während im zweiten Versuch die Berechnungen in Excel durchgeführt wurden. Nach der Berechnung ist es wichtig die Richtung zu bestimmen aus der der Blutropfen kam. Ein Blutropfen, der in einem Winkel auf eine Oberfläche trifft, bildet eine elliptische Form. Die längere Achse der Ellipse zeigt die Richtung der Bewegung des Tropfens an. Bei Blutspuren, die durch einen Tropfen verursacht wurden, der in einem Winkel auftraf, entsteht oft ein Schwanz oder kleinere Satellitentropfen am Ende der Ellipse. Diese zeigen in die Richtung, in die der Tropfen unterwegs war. In dem Beispiel der Abbildung 3.5 sieht man, dass es jeweils rechts der Tropfen zu Satellitentropfen und längeren Achsen kommt. Das zeigt auf, dass sich die Blutropfen von links nach rechts bewegten.

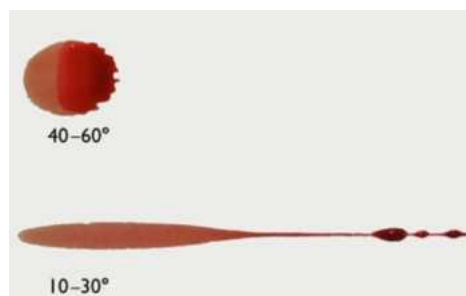
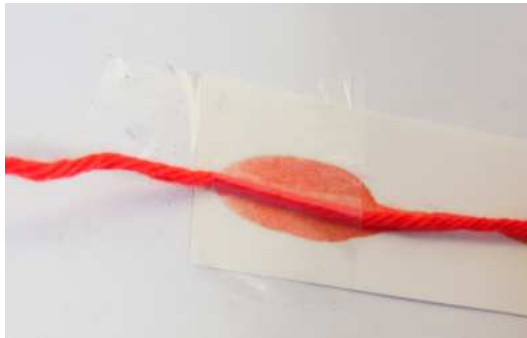


Abbildung 3.5: Morphologie von Blutropfen bei verschiedenen Winkeln (Abb. nach Kunz *et al* [14])

Mit der Kenntnis über Auftreffwinkel und Richtung des Blutropfens kann nun ein Faden gespannt werden. Dieser Faden wird durch die Mitte des Blutropfens gelegt und am Anfang des Tropfens mit Klebeband befestigt (siehe Abbildung 3.6a). Danach wird der Faden in dem Auftreffwinkel, mithilfe eines Winkelmessers, soweit gespannt bis er auf eine Wand trifft um ihn dort zu befestigen. [23, 24]

An realen Tatorten kann sich mit Stativen geholfen werden, um Fäden im Raum zu befestigen. Um die Arbeit bei dem Spannen der Fäden in einem bestimmten Winkel zu erleichtern wurde auf einen digitalen Winkelmesser zurückgegriffen. Die Fäden sollten beim Spannen keinen festen Zug haben, sondern sich natürlich leicht straffen (siehe Abbildung 3.6b). Da das hier durchgeführte Spannen von Fäden an losen Papierbahnen erfolgte, war es schwierig die richtige Zugkraft der Fäden zu erreichen. Mehr zu den Komplikationen und Fehlern in Abschnitt 4.1.



(a) Befestigung des Fadens durch die Blutspur



(b) Gespannter Faden der Stringing Methode

Abbildung 3.6: Durchführung der Stringing Methode

Die Dauer der Stringing Methode wird in Tabelle 3.3 aufgeschlüsselt. In dieser Arbeit wurden zwei Versuche durchgeführt, die annähernd gleich lang gedauert haben. Das Vermessen der Spuren und das anschließende Spannen der Fäden hat dabei am meisten Zeit beansprucht.

Tabelle 3.3: Dauer der Stringing Methode

Zeiten in Minuten	1. Versuch	2. Versuch
Vermessen der Tropfen	73	73
Berechnung der Winkel	13	10
Spannen der Fäden	58	65
Gesamtzeit	144	148

3.4 Erstellung eines digitalen Tatortmodells

Zur Erstellung eines digitalen Tatortmodells wird sich nach der Arbeit von Emely Steinmüller [22] und Gina Marie Pfeiffer [21] gerichtet. Die verwendeten Materialien sind:

Tabelle 3.4: Materialien der Photogrammetrie (a)

Photogrammetrie	Beschreibung
Spiegelreflexkamera	Panasonic® LUMIX DC-G91M
Stativ	CULLMANN® MUNDO 525M
Lampe	Lumatec® SUPERLITE S 04 mit LitePad, benutzt bei einer Wellenlänge von 400-700 nm
Filzstift	Stabilo® Filzstift Nr. 51 der Marke Pelican
Maßband	Handelsübliches gelbes Maßband mit 150cm Gesamtlänge

Zuerst wird das mit Blutspuren ausgekleidete Tatortmodell photogrammetrisch digitalisiert. Um der Software Agisoft Metashape die besten Chancen der Modellerstellung zu geben, müssen ein paar Vorüberlegungen gemacht werden. In dem Modell treten weiße homogene Flächen auf ohne signifi-

Tabelle 3.5: Materialien der Photogrammetrie (b)

Software	Beschreibung
Agisoft Metashape 2.1.2 (Professional-Edition)	Software für die Erstellung von 3D-Modellen, durch die photogrammetrische Verarbeitung von digitalen Bildern
Blender 4.0.0	Open Source Anwendung für die 3D-Modellierung Zusätzliche Pakete, die installiert werden müssen: tensorflow, imutils, opencv.python, mathutils
Hardware	Beschreibung
Laptop	Lenovo IdeaPad S145-15IIL mit Windows 11
PC	RAM: 16GB Grafikkarte: NVIDIA GeForce RTX 2070 SUPER Prozessor: AMD Ryzen 7 3700X 8-Core , 3,60 GHz

kante Unterscheidungen. Damit der Algorithmus auch dort Schlüsselpunkte finden kann müssen die Flächen mit Hilfe von Zahlen beschriftet werden. In den frühen Versuchen im Rahmen dieser Arbeit wurden die weißen und damals auch noch schwarzen Flächen mit gelben Notizzetteln beklebt. Auf ihnen wurde mit schwarzem Permanent Marker der Marke Edding fortlaufende Zahlen geschrieben. Dies führte jedoch zu Fehlern, die im Abschnitt 4.1 näher erläutert werden. Im späteren Verlauf wird für die Markierung der weißen Flächen, der in Tabelle 3.4 beschriebene blaue Filzstift verwendet. Das blau des Filzstifts hebt sich nicht zu sehr von dem weißem Untergrund ab, um bei der Vorverarbeitung (Abschnitt 3.5) zu stören. Die Beschriftung der freien Flächen erfolgt durch fortlaufende Zahlen, jedoch ohne einem bestimmten Muster zu folgen. [19]

Anschließend wurde das Tatortmodell fotografisch aufgenommen. Dafür wurde die in der Tabelle 3.5 erwähnte Spiegelreflexkamera verwendet. Zudem wurde immer das Stativ CULLMANN® MUNDO 525M genutzt, um ein Verwackeln der Bilder zu vermeiden. Genau wie bei Steinmüller [22] erfolgte das Fotografieren der oberen und unteren Kanten, sowie der Decke und des Bodens freihand, da dies mit dem Stativ nicht möglich war. Die Aufnahme der Bilder geschah in einer bestimmten Reihenfolge auch hierbei wurde sich an Steinmüller orientiert [22]. Zuerst wurden alle Seitenwände in verschiedenen Höhen aufgenommen, dann die oberen und unteren Kanten. Das Aufnehmen wird in Abb. 3.7 dargestellt, dabei ist darauf zu achten einen konstanten Abstand zur Wand von 65-70 cm zu wahren. Kontrolliert wurde dies mit einem handelsüblichen Maßband. In den finalen Modellen wurden nur noch die Seitenwände aufgenommen, da die Decke abgenommen wurde und der Boden nicht gut mit Papier ausgekleidet werden konnte.

Bei der photogrammetrischen Modellerstellung ist die einheitliche Ausleuchtung des Raums sehr wichtig. In allen Versuchen war die Beleuchtung für die 3D-Modellerstellung genügend. Erst mit Anwendung des Algorithmus zur Erstellung von Trajektorien traten Probleme auf, die in Abschnitt 4.1 näher beschrieben werden. Für die ersten Versuche wurden die Bilder nur mit dem Kamerablitz aufgenommen. Im Späteren Verlauf nahm man die Decke des Tatortmodells ab, um mehr Lichteinfall im Raum zu haben. Zuletzt wurde auch hier zusätzlich ausgeleuchtet mit Hilfe des forensischen Lichts, welches in Tabelle 3.4 beschrieben wird. Bei der Ausleuchtung der Bilder wurde vor allem darauf geachtet Schatten der überlappenden Papierbahnen zu vermeiden. Außerdem wurden besonders die unteren Bereiche des Tatortmodells ausgeleuchtet, da diese am wenigsten Licht von oben abbekommen. Näheres zu den Fehlern in der Beleuchtung kann im Abschnitt 4.1 nachgelesen werden.

Bei der Photogrammetrie ist es wichtig eine ausreichende Überlappungsdichte zwischen den Bildern zu haben, damit diese im Algorithmus richtig zugeordnet werden können. Die Anzahl der Bilder die, die vollständige fotografische Erfassung de Modells erfordert hängt von der Dichte der Spuren ab und ist somit immer unterschiedlich. Der wichtigste Punkt bei der Fotografie ist die vollständige Erfassung jeder Fläche des Tatortmodells.

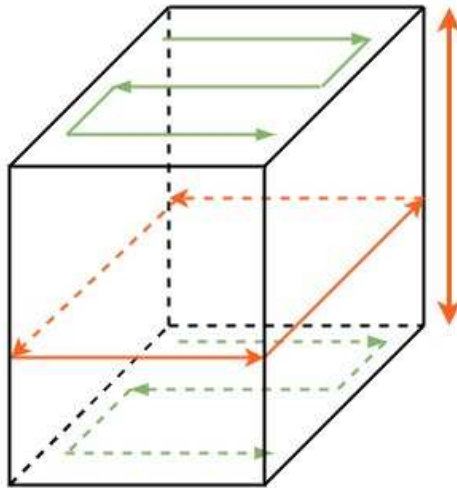


Abbildung 3.7: schematische Darstellung der Bewegungsrichtung während der photogrammetrischen Modellerstellung

Um die 2D-Bilder in eine 3D-Punktwolke zu verarbeiten wird wie oben schon erwähnt die Software Agisoft Metashape (Professional Version) verwendet. Der erste Schritt ist es die aufgenommenen Bilder über *Add Photos* unter dem Reiter *Workflow* in das Programm zu importieren. Im nächsten Schritt *Align Photos* werden die Fotos aligniert, das bedeutet, dass die Schlüsselpunkte detektiert werden. Daraus ermittelt der Algorithmus dann die Position der Kamera [22]. Hierbei wurde eine *Accuracy* der höchsten Stufe gewählt, die restlichen Einstellungen wurden nicht verändert. Dieser Prozess der Schlüsselpunkt-Detektion dauert je nach *Accuracy*-Stufe und Anzahl der zu verarbeitenden Bildern unterschiedlich lang. Anschließend kann der zweite Schritt *Build Model* unter demselben Reiter *Workflow* gestartet werden. Dieser Schritt rekonstruiert ein polygonales Netz-Modell basierend auf den Informationen der Punktwolke. Die Qualität in diesem Prozess muss abhängig von der Leistung des Rechners gewählt werden, da das Rendern mehrere Tage dauern kann. In diesem Modell wurde die *Quality* auf *Medium* gestellt. Nachfolgend wird der letzte Schritt ausgeführt. Unter demselben Reiter wird dazu *Build Texture* gewählt. Alle diese Schritte können in einem Batch-Prozess zusammengefasst werden. Der Batch-Prozess ist ebenfalls im Reiter *Workflow* zu finden. Über *Add > Job Type* können genau die oben genannten Schritte hinzugefügt werden. Nach Starten des individuellen Prozesses wird jeder Schritt nacheinander selbstständig durchlaufen. Am Ende liegt immer ein fertiges 3D-Modell vor, welches als *.obj*- oder *.ply*-Datei exportiert und in Blender implementiert werden kann [21].

In dieser Arbeit wurde zehnmal mit Hilfe von Photogrammetrie ein Modell erstellt. Die unten stehende Tabelle 3.6 zeigt die Anzahl an Bildern, die gefundenen Schlüsselpunkte und die definierten Kameraeinstellungen jedes Modells. Man erkennt in dieser Tabelle, dass mit jedem Versuch die Übung und das Wissen über die richtige Durchführung der Photogrammetrie wuchs. Es mussten in den letzten Modellen weniger Bilder aufgenommen werden um ein 3D-Modell zu erstellen das nicht fehlerhaft ist. Zudem fiel ab dem 6. Versuch die Aufnahme von Decke und Boden weg. Dies verkürzt die Anzahl der Bilder und Dauer der Aufnahmen extrem.

Tabelle 3.6: Daten zur Modellerstellung wie Dauer, Anzahl der Bilder, Anzahl Schlüsselpunkte und Kamera-Einstellungen

Versuch	Bilder	Schlüsselpunkte	Zeit in Minuten	Blendenzahl	Belichtungszeit	ISO
1.	807	545.832	143	F 3.5	1/60	200
2.	348	181.807	147	F 6.3	1/6	320
3.	1396	783.685	144	F 3.5	1/60	400
4.	keine Daten	keine Daten	keine Daten	keine Daten	keine Daten	keine Daten
5.	1024	145.193	141	F 3.7	1/25	320
6.	490	151.510	86	F 9	1/4	400
6.1	431	33.448	86	F9	1/4	400
7.	431	33.408	73	F 10	1/5	400
8.	168	7.115	64	F 11	1/50	400
9.	362	19.735	69	F 11	1/60	400
10	331	24.525	66	F 6.3	1/13	320

3.5 Berechnung von Trajektorien mittels 3D-Modell

Gina Marie Pfeiffer [21] programmierte ein Add-on um die Stringing Methode zu digitalisieren. So werden Trajektorien auf den zuvor detektierten Blutspuren eingezeichnet. Zuerst wird das Add-on in Blender über *Edit>Preferences>Add-ons>Install* installiert. Es ist wichtig alle Pakete die für die Pythonumgebung von Blender wichtig sind zu installieren. Hierzu wird die Power Shell des Geräts geöffnet und mithilfe des Kommandos *cd* in den Pfad gewechselt, in dem Blender abgespeichert ist. Es wird bis in den Ordner *python* gesprungen. Dort werden in der *python.exe* mit dem Befehl *pip install* die benötigten Pakete installiert. In dieser Arbeit wurden folgende Pakete installiert: *tensorflow*, *imutils*, *opencv-python*, *mathutils*, *numpy*, *scikit-image*, *pandas*, *matplotlib*. Für die Installation des Add-ons und möglichen auftretenden Fehlern steht eine Anleitung von Gina Marie Pfeiffer bereit [21]. Zur Aktivierung des Add-ons muss das Häkchen gesetzt werden. In der Seitenleiste von Blender ist nach erfolgreichen installieren das Add-on mit dem Namen *BPA_3D-Modell* zu finden.

Der erste Abschnitt des Add-ons legt die Grundbausteine dar, auf die die folgenden Abschnitte aufbauen. Mit dem ersten Button wird das 3D-Modell als *obj*-Datei mit entsprechender Textur importiert. Um die Textur sehen zu können muss der *Viewport Shading*, der sich in der rechten oberen Ecke des 3D-Viewports befindet, in den *Material Preview Mode* gewechselt werden. Das erfolgreiche Ausführen dieses ersten Schrittes bedarf einer Anpassung des Add-on Codes. Die alte Funktion *bpy.ops.import_scene.obj* wurde ab der Version vier des bpy-Paketes verworfen und muss ersetzt werden durch *bpy.ops.wm.obj_import*. Im ganzem Code sind zwei Stellen zu finden in dem die Funktion angepasst werden muss (siehe Abb. 3.8).

Der zweite Button, das Erstellen der UV-Map ist in dieser Arbeit nicht benutzbar. Um dennoch die folgenden Schritte ausführen zu können wird die UV-Map manuell erstellt. Dies geschieht nach dem in der Arbeit "Prototypische Implementierung eines Ansatzes zur Anlegung von Trajektorien im 3D-Modell der digitalen Blutspurenmusteranalyse" [21] beschriebenen zweiten Vorgehen. Dabei wird aus dem *Object Mode* in den *Edit Mode* gewechselt. Mit dem Button *Select>All* in der oberen Leiste Blenders werden alle Punkte des Modells orange markiert und sind damit ausgewählt. Im *Edit Mode* wird danach unter *UV>Smart UV Project* ausgewählt. Die Voreinstellungen von Blender werden beibehalten. Nun wird in den *UV Editor* gewechselt, um die erstellte UV-Map abzuspeichern. Die


```

150 ##### 3D-Modell einle
151
152 class OBJECT_IMPORT_3DMODEL(bpy.types.Operator):
153     bl_label = "3D-Modell importieren"
154     bl_idname = "import.model"
155     bl_description = "import the 3D-Model"
156
157     filepath: StringProperty()
158
159     def execute(self, context):
160         if bpy.context.area.type != 'CONSOLE':
161             # Konsole aktivieren
162             bpy.ops.wm.console_toggle()
163         Objektname = bpy.context.selected_objects[0].name
164         modelpath = self.filepath
165
166         bpy.ops.wm.obj_import(filepath=modelpath)
167         OBJECT_IMPORT_3DMODEL.path = modelpath
168         return {"FINISHED"}
169
170     def invoke(self, context, event):
171         context.window_manager.fileselect_add(self)
172
173         return {"RUNNING_MODAL"}
174
209 ##### Modell
210
211 class OBJECT_RENEW_MODEL(bpy.types.Operator):
212     bl_label = "Lade 3D-Modell neu"
213     bl_idname = "renew.model"
214     bl_description = "renew the 3D-Model with the texture"
215
216     #filepath: StringProperty()
217
218
219
220     def execute(self, context):
221
222         obj = bpy.context.active_object
223         bpy.context.view_layer.objects.active = obj
224         bpy.ops.object.delete()
225
226         modelpath = OBJECT_IMPORT_3DMODEL.path
227
228         bpy.ops.wm.obj_import(filepath=modelpath)
229
230         return {"FINISHED"}
231
232

```

(a) Angepasste Funktion in Linie 167

(b) Angepasste Funktion in Linie 228

Abbildung 3.8: Modifikation der UV-Map und die Auswirkung auf das Modell

UV-Map ist entscheidend, um die 2D-Koordinaten der Textur zu erhalten, die später benötigt werden. Es ist wichtig, stets sicherzustellen, dass das Modell ausgewählt ist, was an der orangefarbenen Umrandung erkennbar ist. Anschließend wird in den 3D-Viewport zurückgewechselt. Durch die Erstellung der UV-Map wurde die Textur im 3D-Viewport verschoben. Um das Modell in seinen ursprünglichen Zustand zurückzusetzen, kann der dritte Button des Add-ons verwendet werden. Dieser lädt das 3D-Modell neu, sodass die weiteren Schritte fortgesetzt werden können. Hierbei ist besonders darauf zu achten, dass das Modell ausgewählt bleibt, um Fehler zu vermeiden und das versehentliche Löschen des Modells zu verhindern.

Im zweiten Abschnitt des Add-ons werden die Vorverarbeitungsschritte durchgeführt. Zunächst wird das Bild in ein Graustufenbild umgewandelt, was vorteilhaft für bestimmte Bildbearbeitungstechniken ist, da die Farbkanäle reduziert werden. Einige Funktionen erfordern diese Vorbereitung. Um das Bild rauschen zu reduzieren und unwesentliche Details zu entfernen, wird ein Gauß-Filter angewendet. Anschließend wird das Bild invertiert, um bestimmte Bereiche hervorzuheben.

Im Add-on kann dann zwischen dem Canny-Algorithmus und dem Thresholding-Algorithmus gewählt werden. Die oberen und unteren Schwellenwerte können individuell angepasst werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Beim Canny-Algorithmus bestimmen diese Schwellenwerte die Unterscheidung zwischen schwachen und starken Kanten. Dies führt zu einer binären Bilddarstellung, bei der weiße Pixel Kanten und schwarze Pixel den Rest des Bildes repräsentieren. Beim Thresholding-Algorithmus legen die Schwellenwerte fest, wie die Pixel eingestuft werden. Der erste Schwellenwert bestimmt, welche Pixel basierend auf ihrem Grauwert als weiß und welche als schwarz eingestuft werden. Pixel, deren Grauwert gleich oder höher als der Schwellenwert ist, werden als weiß markiert, während die restlichen Pixel schwarz bleiben. Der zweite Schwellenwert gibt an, auf welchen Wert die Pixel gesetzt werden sollen, wobei normalerweise der Wert 255 verwendet wird, um die Pixel weiß erscheinen zu lassen. [21]

Es ist ein ständiges Anpassen der Schwellenwerte notwendig um die richtigen Werte für das jeweilige 3D-Modell zu finden. In dieser Arbeit wurde dem letztem funktionierendem Modell, die Blutspuren mit den Werten 135/255 im Treshold Algorithmus und 75/104 im Canny Algorithmus extrahiert.

Nach der Auswahl des Algorithmus und dem anpassen der Werten, können die einzelnen Blutspuren mit dem nächsten Button extrahiert werden. Dazu wird einfach ein Speicherpfad angegeben.

Nach erfolgreicher Extraktion der Blutspuren werden diese mit dem nächsten Button vermessen. Hierzu wird eine Ellipse über die Spur gelegt und die Haupt- sowie Nebenachse gemessen. Nach dem Abgleich der Achsen stellt die Hauptachse immer die Länge und die Nebenachse die Breite dar. Mit diesen Werten wird wie in Abschnitt 2.5 beschrieben der Auftreffwinkel der Flugbahn des Blutropfens berechnet. Die Werte werden in einer `.csv`-Datei abgespeichert. Ein Ausschnitt aus so einer Datei ist in der Abbildung 3.9 zu sehen.

	A	B	C	D
1	Blutspur-Nummer	Breite (in Pixel)	Länge (in Pixel)	Winkel (in Grad)
2	Blutspur_1:	4,898979664	4,898979664	90
3	Blutspur_2:	8,613769531	12,07488441	45,51
4	Blutspur_3:	10,87296486	13,59330654	53,12

Abbildung 3.9: Ausschnitt der Maßangaben der Blutspuren in einer `.csv`-Datei

Der nächste Abschnitt des Add-ons "Generiere 3D-Koordinaten und implementiere Trajektorien" widmet sich der Generierung der Trajektorien (Flugbahnen) der vermessenen Blutspuren. Hierzu werden die XYZ-Koordinaten aus den UV-Koordinaten generiert. Eine detaillierte Beschreibung dieses Vorgangs kann in "Prototypische Implementierung eines Ansatzes zur Anlegung von Trajektorien im 3D-Modell der digitalen Blutspurenmusteranalyse" [21] nachgelesen werden. Das Einzeichnen der Trajektorien wird ebenfalls mit diesem Button des Add-ons vorgenommen. Es wird ein Pfeil basierend auf den zuvor ermittelten Koordinaten und Maßen auf die Mittelpunkte der Blutspur-Ellipsen eingezeichnet. Der berechnete Auftreffwinkel gibt dabei die Steigung der jeweiligen Trajektorie an. Diese werden nun zusätzlich entlang der Hauptachse ausgerichtet. Durch den letzten Regler im Add-on kann die Länge der Trajektorien angepasst werden. Dies ist überaus wichtig um einen möglichen Schnittpunkt zu ermitteln und damit die Area of Origin an Tatorten zu bestimmen.

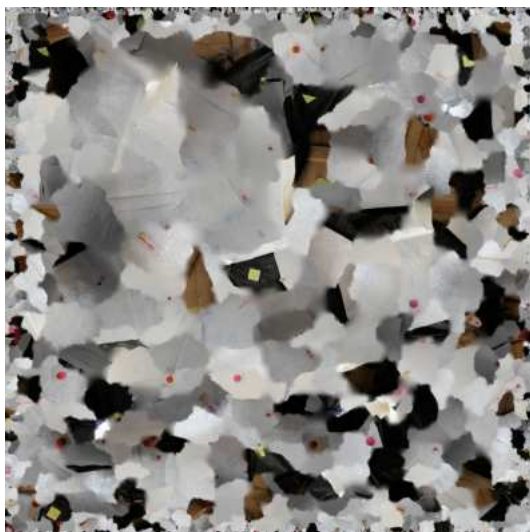
3.6 Modifikationen der Modelle

Um zwischen den Versuchen und dem erneuten Aufnehmen der photogrammetrischen Arbeit trotzdem Fortschritte zu erzielen, wurden Modifikationen an den 3D-Modellen vorgenommen. Man wollte so überprüfen ob beispielsweise eine bessere Ausleuchtung die Erfolge bringt, die man sich vorstellt oder nicht. Es wurden unterschiedliche Modifikationen vorgenommen.

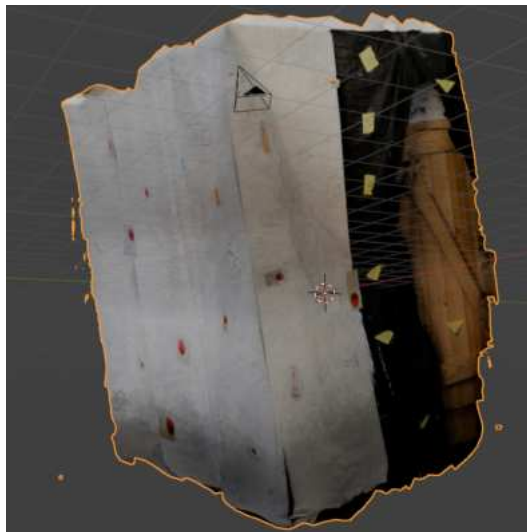
Angefangen bei der initialen 3D-Modellerstellung, wurden hier Bilder die noch immer große Teile schwarze Folie enthalten nicht in die Modellerstellung aufgenommen. Dies betraf vor allem den Teil der Tür. In der Modellerstellung wurde dieser Bereich mit ähnlichen Farben der angrenzenden Fotos vervollständigt. Dadurch gingen aber eventuelle Informationen auf den Bildern verloren auf denen sowohl Bereiche mit als auch ohne Folie zu sehen waren.

Eine andere Methode um Stellen mit schwarzer Folie in der Modellerstellung nicht zu berücksichtigen ist es, Bilder mit eben diesen Stellen zu bearbeiten. Dafür wurde das Microsoft interne Bildbearbeitungsprogramm benutzt um Bereiche schwarzer Folie mit dem magischen Radierer zu bearbeiten. Dieser Radierer übermalt den eingezeichneten Bereich und blendet ihn in die angrenzenden Texturen ein. Das Ergebnis sind Bilder die farblich zu den anderen passen und noch alle Restinformationen der Bereiche ohne Folie haben.

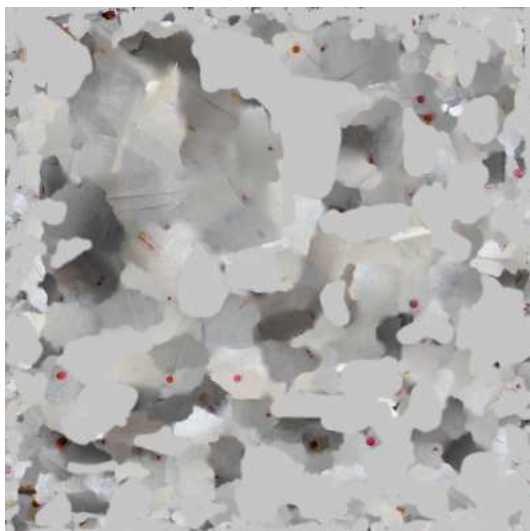
Um nach der Modellerstellung in Blender dunkle Bereiche zu verdecken ist es am einfachsten die Textur zu übermalen. Dies geschah in dieser Arbeit über die UV-Map. Eine normale unveränderte UV-Map ist in der Abbildung 3.10a zu sehen. Dunkle Bereiche und Bereiche mit durchscheinender schwarzer Folie wurden mit dem Stift in der UV-Map übermalt, zu sehen in Abbildung 3.10c. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Farbauswahl mit dem Pipetten-Tool von den umliegenden Strukturen genommen wurde. Da die UV-Map die Textur des 3D-Modells darstellt, werden alle Bereiche die nun geweißt wurden auf dem Modell ebenfalls weiß. Dies ist besonders in der Abbildung 3.10d an der Tür zusehen. So konnte überprüft werden ob man mit Beseitigung des Kontrasts bessere Ergebnisse in der Auswahl der Schwellenwerte bekommt.



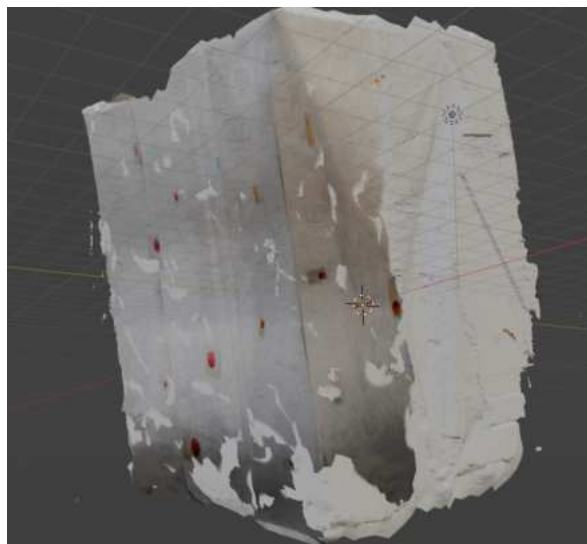
(a) unbearbeitete UV-Map eines Modells



(b) 3D-Modell mit unbearbeiteter UV-Map



(c) übermalte UV-Map eines Modells



(d) 3D-Modell mit übermalter UV-Map

Abbildung 3.10: Modifikation der UV-Map und die Auswirkung auf das Modell

Diese Modifikationen sind in der Praxis nicht machbar, da jede Modifikation ein Verlust einer winzigen Blutspuren bedeuten könnte. In dieser Arbeit wurden die Modifikationen nur genutzt um schneller Ursachen für Probleme zu finden und diese dann zu beheben.

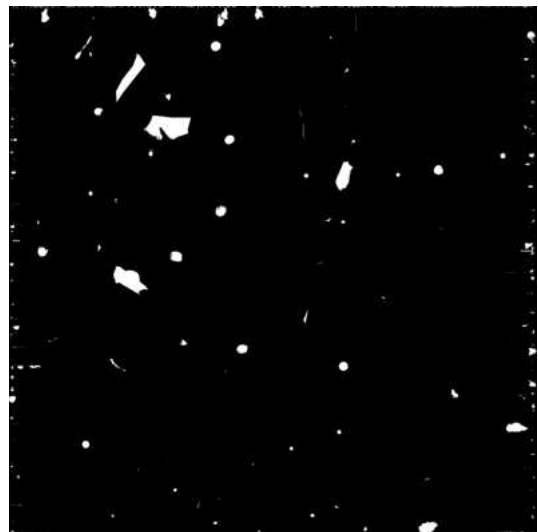
4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der digitalen und analogen Visualisierung von Trajektorien aufgezeigt. Zudem werden Fehler die während der Versuche aufgetreten sind diskutiert, um anderen die Weiterführung oder Prüfung dieser Versuche zu vereinfachen. Die Evaluation der beiden Methoden und welche der Methoden der anderen vorzuziehen ist, wird ebenfalls in diesem Kapitel beschrieben.

Die finale digitale Modellerstellung erbrachte gute Ergebnisse. Das Modell besteht aus vier Seiten, wobei die Bereiche der Tür in den Fotos ausgelassen wurden. Es wurden vermeintliche Blutspuren erkannt und extrahiert. Die erfolgreiche Extraktion der Blutspuren hängt von der Einstellung der Schwellenwerte der beiden Algorithmen ab. In der Abbildung 4.1 sind die Ergebnisse der Vorverarbeitung mit den jeweiligen Algorithmen und deren Schwellenwerten zu sehen. Die Auswahl der Schwellenwerte erfolgt nach der subjektiven Wahrnehmung des Anwenders. Durch konstantes Austesten der Grenzen werden die Werte gefunden, bei denen die meisten brauchbaren Blutspuren detektiert werden, aber am wenigsten falsche Blutspuren. Man erkennt das am Rand der UV-Map viele Artefakte zu finden sind, diese werden bei beiden Algorithmen erkannt. Der Threshold Algorithmus liefert hier etwas bessere Ergebnisse. Es sind häufiger vollständige Blutspuren erkannt worden.



(a) Modell 10 Vorverarbeitung mit Canny Algorithmus
75/105

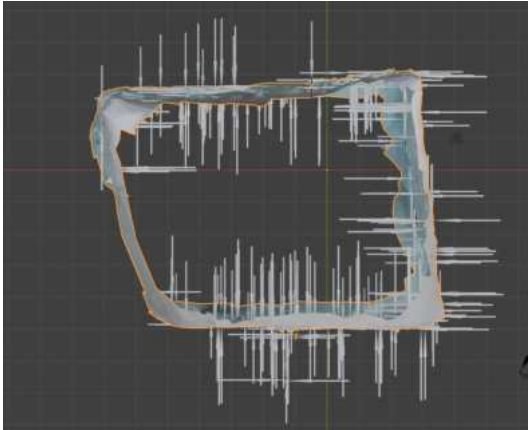


(b) Modell 10 Vorverarbeitung mit Treshold Algorithmus
135/255

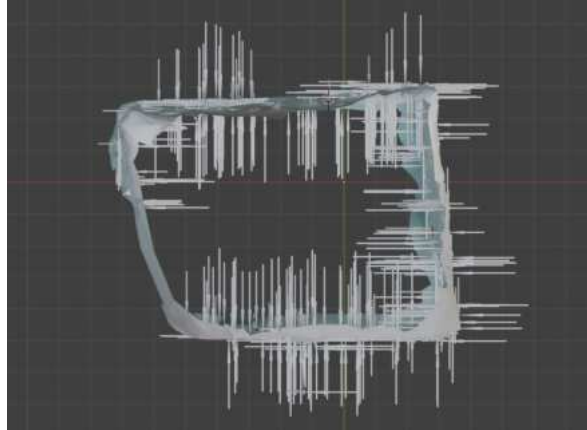
Abbildung 4.1: Ergebnisse der Vorverarbeitung

Die unterschiedlichen Ergebnisse der Algorithmen in der Vorverarbeitung, wirken sich unterschiedlich auf das Modell und die Trajektorienplatzierung aus. Die Bilder (a) und (c) aus der Abbildung 4.2 verweisen auf den Canny Algorithmus, die Bilder (b) und (d) verweisen auf den Treshold Algorithmus. Die Schwellenwerte des Canny Algorithmus betragen 75/105 und die des Treshold Algorithmus 135/255. Besonders die Abbildungen 4.2c und 4.2d verdeutlichen den Unterschied gut. In dem Canny Algorithmus kommt es zur verstärkten Bildung von Clustern an Blutspuren oder vermeintlichen Blutspuren. Der Unterschied in den erkannten Blutspuren wird ebenfalls deutlich: Beim Canny-Algorithmus wurden 2076 Blutspuren identifiziert, während der Threshold-Algorithmus 978 Spuren

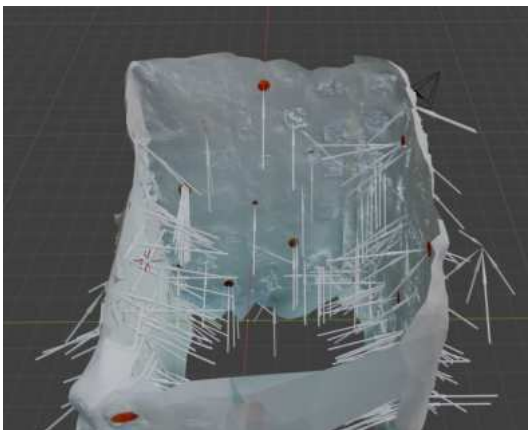
erkannte. Aus der kontrollierten Umgebung in dem die Modelle erstellt worden sind ist die Anzahl an tatsächlichen Blutspuren festgelegt. Es wurden 38 Blutspuren im Tatortmodell gelegt. Die gefundene Anzahl an Blutspuren des Algorithmus entspricht also nicht der tatsächlich gelegten Anzahl.



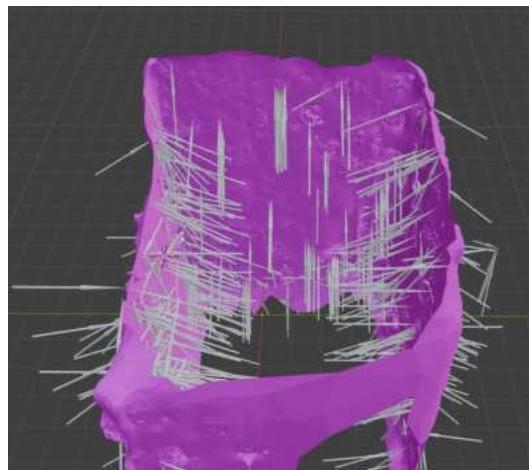
(a) Modell 10 von oben mit Threshold Algorithmus 135/255



(b) Modell 10 von oben mit Canny Algorithmus 75/105



(c) Modell 10 Innenseite mit Threshold Algorithmus 135/255



(d) Modell 10 Innenseite mit Canny Algorithmus 75/105

Abbildung 4.2: Ergebnisse des Modells mit Verwendung der zwei Algorithmen

Die Platzierung von Trajektorien war größtenteils erfolgreich. Wie schon erwähnt gibt es viele Artefakte der Modellerstellung, welche als Blutspuren angesehen werden. Auf ihnen werden auch Trajektorien erstellt. In [Abbildung 4.3a](#) sind Beispiele solcher Artefakte mit Trajektorie zu sehen. Zudem sieht man das in diesem Ausschnitt keine Trajektorien auf die umliegenden Blutspuren platziert werden. Dies kann daran liegen, dass diese Spuren in der UV-Map nicht zu finden sind. Im Kontrast dazu ist in [Abbildung 4.3b](#) die Platzierung von Trajektorien auf richtigen Blutspuren zu sehen. Außerdem sind in [Abbildung 4.2b](#) und [4.2a](#) zu erkennen, das auch außerhalb des Raums Trajektorien platziert werden. Zurückzuführen ist dies auf Unebenheiten der Wände in der Modellerstellung und eine damit verbundenen fehlerhaften Platzierung von Trajektorien.

Bemerkenswert an den Abbildungen (a) und (b) sind die Winkel, in denen die Trajektorien auf die Wand treffen. Diese werden in einem 0° Winkel von unten zur Wand positioniert, wobei der Auftreffwinkel ebenfalls einbezogen wird. Betrachtet man das Modell von oben, wird außerdem

klar, dass die Trajektorien senkrecht zur Wand stehen. Dies liegt daran, dass kein Rotationswinkel übergeben wurde, wodurch die Trajektorien nicht entlang der Längsachsen der Ellipsen verlaufen. [21]



(a) Trajektorien platziert auf Artefakten



(b) Trajektorien platziert auf Blutspuren

Abbildung 4.3: Platzierung der Trajektorien in dem Modell

Das Ergebnis, der in der Praxis selten verwendeten, Stringing Methode ist ein Raum voller Fäden (siehe Abbildung 4.4). Die Fäden geben die ungefähre Flugbahn der Blutropfen an. In der analogen Methode werden alle relevanten Blutspuren vermessen und ein Faden platziert. Es gibt keine falschen Blutspuren auf denen man einen Faden aus Versehen hätte platzieren können. Bei dieser Methode ist die Anwendung weniger einfach als bei der digitalen, da das Spannen der Fäden in den errechneten Auftreffwinkel mindesten zwei Personen erfordert um den korrekten Winkel zu gewährleisten.

Bei einem Vergleich der Positionierung der Trajektorien beider Methoden sieht man durch die Platzierung der digitalen Trajektorien senkrecht zur Wand, rein visuell deutliche Unterschiede. Zudem werden Blutropfen die in einem 90° Winkel auf der Oberfläche trafen in der Stringing Methode nicht beachtet, da es für die Blutspurenmusteranalyse und der Berechnung der Area of Origin keine Relevanz hat. Solche Blutropfen werden in der digitalen Methode betrachtet und auf ihnen werden auch Trajektorien platziert, sofern der Algorithmus diese Blutspur extrahiert hat. Die Trajektorien in Blender kommen eher von unten, statt wie in der Stringing Methode von oben. Die akkurate Visualisierung

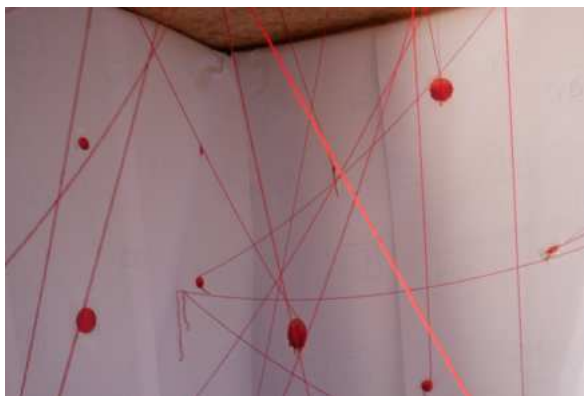


Abbildung 4.4: mit Stringing Methode visualisierte Flugbahnen im Tatortmodell

der Trajektorien ist in der Stringing besser, da die Fäden an der Längsachse der Spuren mit Berücksichtigung des Auftreffwinkels und Rotationswinkels befestigt werden. In der digitalen Methode wird wie schon erwähnt kein Rotationswinkel übergeben.

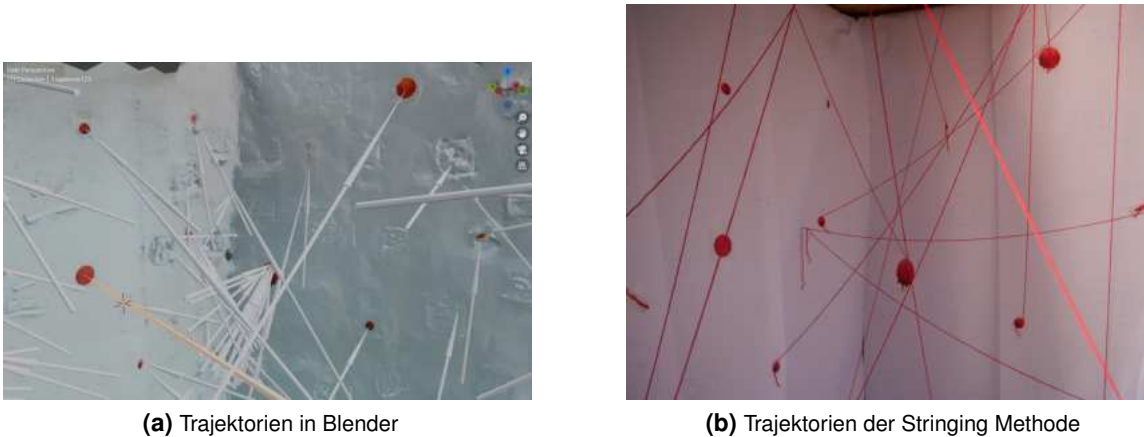


Abbildung 4.5: Trajektorien der Methoden im Vergleich

Es ist zu beachten, dass noch keine Aussagen über eine korrekte Berechnung der Area of Origin getroffen werden können, da diese Versuche keine realen Blutspurenmuster nachbilden in denn es ein Ursprungsareal gibt. Die idealisierten Blutspurenmuster werden wahllos im Tatortmodell verteilt.

4.1 Fehlerprotokoll

Es wurden insgesamt zehn 3D-Modelle erstellt. In den frühen Modellen, die vorrangig der Erarbeitung der Methoden dienten, wurden die ersten Fehler erkannt und ausgebessert. Die ausgedruckten idealisierten Blutspuren wurden rechteckig ausgeschnitten und direkt mit Klebeband auf der schwarzen Abdeckfolie des Tatortmodells befestigt. Freie dunkle Flächen wurden mit hellgelben Notizzetteln, auf denen mit schwarzen Permanentmarker Zahlen geschrieben wurde, beschriftet. Die Fotos für die Photogrammetrie wurden hierbei nur mit dem Kamera eigenen Blitz aufgenommen. Durch den Blitz gab es auf der leicht reflektierenden Abdeckfolie sehr helle Areale. Bei der Erstellung des 3D-Modells aus der Photogrammetrie gab es keine Probleme. Hier kommt die Software Agisoft Metashape trotz des dunklen Untergrund gut mit, sofern die homogenen Flächen ausreichend markiert sind. Probleme traten bei den Vorverarbeitungsschritten des Add-ons auf. Das Add-on wandelt wie in Abschnitt 3.5 beschrieben die UV-Map in ein Graustufenbild um. Auf diesem Graustufenbild werden die Algorithmen zur Extraktion der Blutspuren angewendet. Das Problem liegt im hohen Kontrast der hellen Notizzettel, der Blutspuren auf weißem Papier und den Lichtreflektionen zu der dunklen Folie. So kann keine Einstellung der Schwellenwerte gefunden werden in der vorrangig die Blutspuren erkannt werden. Abbildung 4.6 zeigt die UV-Map des dritten 3D-Modells. Es sind große Unterschiede im Kontrast zu erkennen, die es bei dem Versuchen von Gina Marie Pfeiffer [21] nicht gab. Da sie das Add-on an Modellen getestet hat in denen es eine gut ausgeleuchtete Umgebung gab, ohne große Kontrastunterschiede im Hintergrund der Blutspuren, kann das Add-on auf solchen Modellen nicht erfolgreich angewendet werden. In der Kantendetektion des Canny-Algorithmus werden zum Beispiel die Kanten der Notizzettel sowie der darauf stehenden Zahlen gefunden. Die Blutspuren selbst nur teilweise. Das Ergebnis der Vorverarbeitung des Add-ons mit dem Canny-Algorithmus ist in Abbildung 4.7 zu sehen.



Abbildung 4.6: UV-Map des 3. Modells im Object Mode



Abbildung 4.7: Ergebnis des Canny-Algorithmus mit den Werten 75/104

Ein weiterer Fehler im Laufe der Versuche trat bei Modell 2 auf. Das Modell 2 ist aufgrund von unzureichenden Schlüsselpunkten fehlgeschlagen. Die Erstellung eines 3D-Modells mit Hilfe der Software Agisoft Metashape funktionierte zwar, doch wird das Modell fehlerhaft dargestellt. In [Abbildung 4.8](#) ist zu sehen, dass die kurzen Seitenwände hintereinander dargestellt werden, statt gegenüber. Dies ist auf eine unzureichende Kennzeichnung der freien Flächen ohne markanten Merkmale zurückzuführen. Dort konnten bei der Aneinanderreihung der Bilder keine Schlüsselpunkte erkannt werden beziehungsweise wurden die Bilder an falschen Punkten zusammengesetzt.

Die Auskleidung des Tatortmodells mit Papier gestaltete sich bei dem Boden als schwierig, da die darunterliegende Folie zu viele Unebenheiten hat. An den Ecken des Modells ist es unmöglich ohne Schatten bündig die schwarze Folie abzudecken. Um weitere Fehler in den Bildern zu vermeiden wurde deshalb der Boden nicht mehr mit fotografiert.

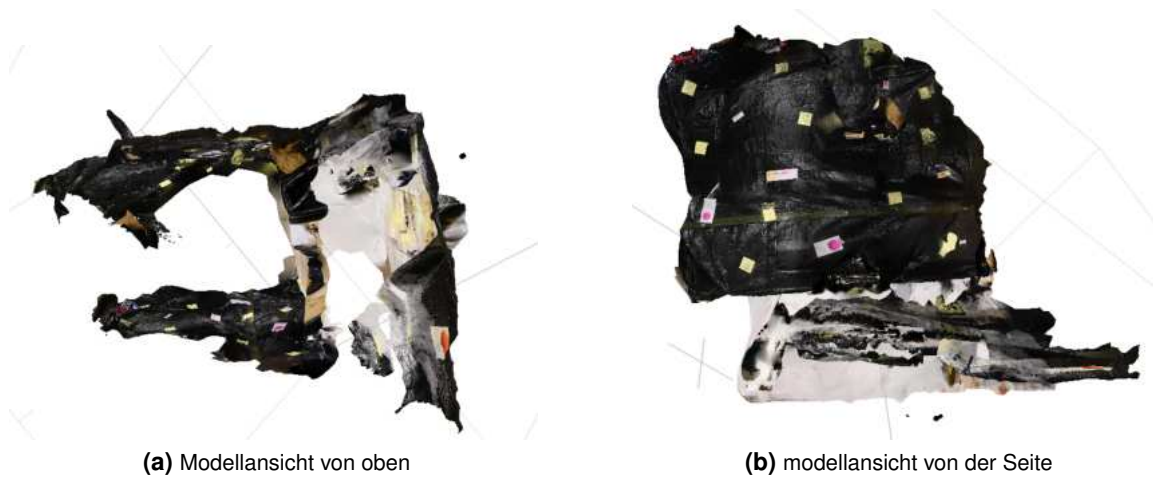


Abbildung 4.8: Darstellung des fehlerhaften zweiten Modells

Nachdem der Innenraum weitestgehend mit Papier ausgekleidet wurde, war das größte Problem in den ganzen Versuchen die einheitliche Ausleuchtung des Tatortmodells. Am Anfang der Versuche war die Decke des Tatortmodells noch montiert, deswegen entschied man sich die Fotos für die Modellerstellung ausreichend. Doch in den Bildern tritt der Vignette Effekt ein. Dieser Effekt beschreibt, dass der Rand des Bildes radial verdunkelt ist. In der Abbildung 4.9 ist zu sehen das die Mitte des Bildes heller ist als der Rand. Die Mitte wird vom Blitz besser beleuchtet als der Rand. In den Vorverarbeitungsschritten im Add-on um die Blutspuren zu extrahieren treten so dunklere und hellere Areale auf. Nun tritt wieder ein Problem auf das zu Anfang dieses Abschnitts schonmal beschrieben wurde. Das Anpassen der Schwellwerte für die Blutspuren gestaltet sich durch andere dunkle Areale wie die Blutspuren, als schwierig.



Abbildung 4.9: Beispielhaftes Bild mit erkennbarem dunkleren Rand

Das Abnehmen der Decke hatte eine verbesserte Ausleuchtung des Tatortmodells zur Folge. In der Arbeit von Alexander Köhler [20] stand das Tatortmodell direkt unter einer Deckenlampe. Der Standort des Modells hat sich bei diesen Versuchen geändert. Nun steht das Tatortmodell nicht mehr direkt unter einer Deckenlampe. Trotzdem werden die oberen Bereiche der vier Wände gut beleuchtet. In der Abbildung 4.10 sind die dunkleren Bereiche im unteren Viertel des Modells gut zu erkennen. Das geradlinige Befestigen der Papierbahnen gestaltet sich in dem Tatortmodell als

schwierig. Es entstehen immer Wölbungen oder Lücken in denen die schwarze Abdeckfolie zu sehen ist. Auch das wirkt sich auf die Beleuchtung und das Add-on aus. Behoben wurden diese Probleme mit einer Lampe, in den finalen Versuchen ist nun der Raum einheitlicher ausgeleuchtet.

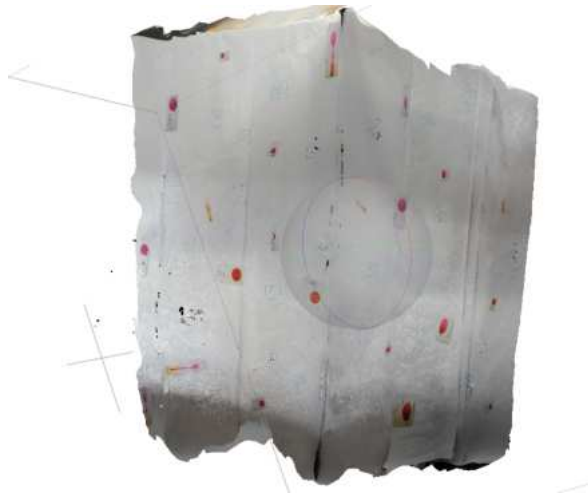


Abbildung 4.10: dunkle untere Bereiche nach Abnehmen der Decke

Auch bei der analogen Methode der Detektion von Trajektorien treten im Tatortmodell Schwierigkeiten auf. Da das Tatortmodell nur lose mit Papier ausgekleidet werden kann, ist das Spannen von Fäden eine Herausforderung. Das Papier bewegt sich mit. Eine akkurate Spannung und Visualisierung von Trajektorien ist so nicht möglich. In [Abbildung 4.11](#) sieht man den Unterschied zwischen Fäden bei denen der Untergrund nachgibt und Fäden bei denen eine Spannung erzeugt werden konnte. Bei den durchhängenden Fäden ist eine festere Spannung nicht vorteilhaft, da so mit dem Heben des Papiers die Position der Blutspur und damit auch der Winkel verändert wird.

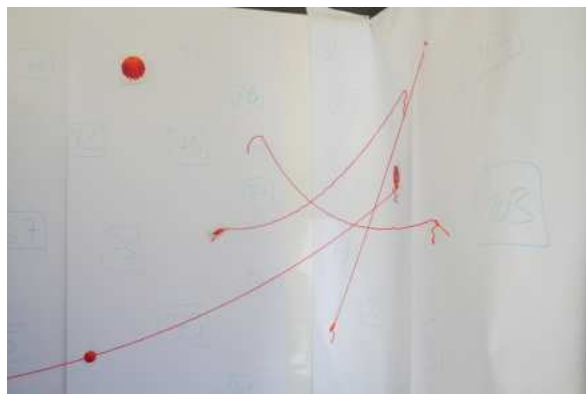


Abbildung 4.11: Spannungsverlust der Fäden durch bewegliches Papier

4.2 Evaluierung

Die Evaluierung bewertet Methoden anhand von festgelegten Kriterien. In dieser Arbeit wird die digitale Visualisierung von Trajektorien mit Hilfe der analogen Stringing Methode evaluiert. Es soll anhand von Genauigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit und praktischer Anwendbarkeit evaluiert werden.

4.2.1 Stringing Methode

Genauigkeit Die Stringing Methode, die auf der physischen Platzierung von Fäden zur Darstellung von Trajektorien basiert, zeigt eine gewisse Genauigkeit, ist jedoch stark von der manuellen Durchführung abhängig. Die Genauigkeit kann durch menschliche Fehler und die physische Beschaffenheit der Fäden beeinflusst werden, was zu Ungenauigkeiten in der Trajektorienbestimmung führen kann.

Robustheit Die Robustheit der Stringing Methode ist im Vergleich zur digitalen Methode höher, da sie weniger anfällig für äußere Bedingungen wie Beleuchtung oder Oberflächenbeschaffenheit ist. Jedoch kann die Methode durch physische Hindernisse oder das Vorhandensein mehrerer Blutspuren an einem Ort beeinträchtigt werden, was die Platzierung der Fäden erschwert und die Robustheit verringert.

Zuverlässigkeit Die Zuverlässigkeit der Stringing Methode ist im Allgemeinen gut, da die physische Platzierung der Fäden eine direkte Visualisierung der Trajektorien ermöglicht. Allerdings ist sie zeitaufwendig und erfordert präzises Arbeiten, um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Zudem besteht die Gefahr, dass durch das Anbringen der Fäden Blutspuren beschädigt werden, was die Zuverlässigkeit der Beweissicherung beeinträchtigen kann.

Anwendbarkeit Die Stringing Methode ist in der Praxis anwendbar, allerdings mit erheblichen Einschränkungen. Der zeitliche Aufwand und die Notwendigkeit einer sorgfältigen Durchführung machen sie weniger geeignet für schnelle Analysen. Außerdem erfordert sie in der Regel die Anwesenheit von mindestens zwei Personen. Trotz dieser Herausforderungen bleibt die Methode eine nützliche Ergänzung zur digitalen Analyse, insbesondere in Kombination mit digitalen Techniken, um umfassendere und genauere Ergebnisse zu erzielen.

Fazit Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Stringing Methode zwar in der Lage ist, Trajektorien von Blutspuren darzustellen, jedoch sowohl in der Genauigkeit als auch in der Zuverlässigkeit Einschränkungen aufweist. Ihre Anwendbarkeit in der Praxis ist durch den hohen Zeitaufwand und das Potenzial für Spurenbeschädigungen begrenzt. Die Methode bietet jedoch eine wertvolle visuelle Unterstützung und kann in Verbindung mit digitalen Techniken zu umfassenderen Analysen beitragen.

4.2.2 Digitale Trajektorien Bestimmung

Genauigkeit Die digitale Methode zur Trajektorienbestimmung in der Blutspurenmusteranalyse zeigt in den durchgeführten Versuchen eine hohe Genauigkeit. Die Nutzung von Algorithmen wie dem Canny- und Threshold-Algorithmus kann eine präzise Detektion der Blutspuren auf den Modellen ermöglichen. Allerdings variiert die Anzahl der erkannten Blutspuren stark je nach verwendeten

Schwellenwerten und Algorithmen. Während der Canny-Algorithmus tendenziell mehr Blutspuren detektiert, neigt er auch zu einer höheren Anzahl von falsch-positiven Ergebnissen, was die Genauigkeit beeinträchtigen kann. Die Platzierung der Trajektorien funktionierte ebenfalls, jedoch traten hierbei Herausforderungen auf, wie Artefakte, die fälschlicherweise als Blutspuren erkannt wurden. Dies führt zu einer suboptimalen Darstellung der Flugbahnen der Blutropfen.

Robustheit Die Robustheit der digitalen Methode ist weniger überzeugend. Verschiedene Untergründe und Beleuchtungsbedingungen beeinflussen die Algorithmen erheblich, was zu inkonsistenten Ergebnissen führt. Besonders problematisch ist die Detektion auf ungleichmäßigen oder schlecht beleuchteten Flächen, wie in den Modellversuchen gezeigt wurde. Diese Probleme erschweren eine zuverlässige Anwendung der Methode unter variierenden Bedingungen.

Zuverlässigkeit Die Zuverlässigkeit der digitalen Methode leidet unter den oben genannten Faktoren. Obwohl die Methode in kontrollierten Umgebungen gute Ergebnisse liefert, ist ihre Anwendbarkeit in realen Szenarien, wo Lichtverhältnisse und Oberflächenbeschaffenheit stark variieren können, eingeschränkt. Zudem können Artefakte in den Modellen zu Fehlinterpretationen führen, was die Zuverlässigkeit der Trajektorienplatzierung beeinträchtigt.

Anwendbarkeit Die digitale Methode zeigt großes Potenzial für die Zukunft der Blutspurenmusteranalyse, insbesondere im Hinblick auf die Automatisierung und Effizienzsteigerung. Die Implementierung und Verbesserung digitaler Algorithmen könnten die Genauigkeit und Zuverlässigkeit weiter erhöhen. Die Methode bietet zudem die Möglichkeit, Analysen ohne physische Manipulation des Tatorts durchzuführen, was die Integrität der Beweise wahrt. Jedoch erfordert die aktuelle Version noch erhebliche Verbesserungen, um in der Praxis voll anwendbar zu sein. Zukünftige Arbeiten sollten auch die Beleuchtungsbedingungen bei der Erfassung von Tatortdaten optimieren und gegebenenfalls Algorithmen zur Lichtkorrektur integrieren.

Fazit Zusammenfassend bietet die digitale Methode zur Erzeugung von Trajektorien der Blutspurenmusteranalyse eine hohe Genauigkeit und erhebliche Vorteile in der Anwendbarkeit. Die Methode ist jedoch derzeit in ihrer Robustheit und Zuverlässigkeit eingeschränkt, insbesondere durch Schwierigkeiten bei der Verarbeitung unterschiedlicher Untergründe. Diese Schwächen müssen durch weitere Forschung und Optimierung der Algorithmen adressiert werden, um die Methode in der Praxis vollständig nutzbar zu machen. Dennoch stellt die digitale Methode einen bedeutenden Fortschritt dar und hat das Potenzial, die traditionelle analoge Methode in vielen Bereichen zu ergänzen oder sogar zu ersetzen.

4.2.3 Vergleich

Die Stringing Methode bietet eine hohe Genauigkeit durch direkte physische Vermessung und Visualisierung der Trajektorien, ist jedoch anfällig für menschliche Fehler und subjektive Entscheidungen. Die digitale Methode ermöglicht präzise und konsistente Analysen durch Photogrammetrie und Algorithmen, wodurch menschliche Fehler minimiert werden, jedoch können bildliche Artefakte die Genauigkeit beeinträchtigen. In der Stringing Methode wurden 38 von 38 möglichen Blutspuren erkannt und vermessen. Die digitale Methode erkennt durch Modellfehler und Artefakten immer

mehr als 38 Spuren. In dem letztem 3D-Modell wurden 978 Spuren erkannt, 952 Spuren vermessen und 844 Trajektorien platziert. Es können durch Unebenheiten im Modell und Bildfehler mehrere Trajektorien auf einer vermeintlichen Spur platziert werden.

Die Stringing Methode ist robust gegenüber verschiedenen Umgebungsbedingungen, leidet jedoch unter der manuellen Durchführung, die die Zuverlässigkeit beeinträchtigen kann. Im Gegensatz dazu ist die digitale Methode weniger robust, da unterschiedliche Untergründe die Algorithmen zur Extraktion von Blutspuren verwirren können, was die Zuverlässigkeit der Ergebnisse reduziert. Zu sehen ist der Unterschied in den Untergründen in einem Versuch indem das Tatortmodells noch nicht mit weißem Papier ausgelegt war (siehe Abbildung 4.12). Die Stringing Methode ist auf dem holzigen Untergrund der Decke, der braunen Pappe und auf der dunklem Abdeckfolie anwendbar. In der digitalen Visualisierung von Trajektorien hat das Add-on zu diesem Zeitpunkt noch Probleme. Aufgrund von hohen Kontrasten und unzureichender Beleuchtung wurden weder verwendbare Blutspuren erkannt noch Trajektorien bestimmt.



(a) Trajektorienbestimmung mittels Stringing Methode



(b) 3D-Modell des Tatortmodells ohne erfolgreicher Trajektorienbestimmung

Abbildung 4.12: Vergleich der Robustheit in Bezug auf einen dunklen Untergrund

Die Stringing Methode ist zeitaufwendig und erfordert umfangreiche Materialien sowie mindestens zwei Personen zur Durchführung, was ihre Anwendbarkeit einschränkt. Je mehr Blutspuren vorhanden sind desto mehr Zeit wird in der Durchführung benötigt. Zudem ist durch das direkte Arbeiten am Tatort das Risiko der Verunreinigung des Tatorts höher. Auch das Befestigen der Fäden kann Beschädigungen des Tatorts verursachen. Die digitale Methode hingegen bietet eine schnellere und effizientere Alternative mit weniger Materialbedarf vor Ort und der Möglichkeit zur Nachbearbeitung, was ihre Anwendbarkeit in der Praxis erheblich verbessert. Die Zeit der photogrammetrischen Modellerstellung ist Abhängig von der Raumgröße und nicht von der Anzahl der Spuren. Der Tatort selbst ist bei dieser Methode weniger gefährdet, da man nicht direkt an den Blutspuren arbeitet und nach dem Fotografieren den Tatort für die weiterführenden Schritte verlassen kann. In der Tabelle 4.1 sieht man denn Vergleich der gesamten Verarbeitungszeit bis ein Tatortmodell mit Trajektorien entsteht. Außerdem ist die Anzahl an physischen Material ebenfalls daraus abzulesen. Der Materialbedarf variiert in der digitalen Methode je nach Lichtverhältnissen vor Ort.

Tabelle 4.1: Vergleich Materialbedarf und Zeit

Methoden	Stringing	Digital
Zeit bis fertige Trajektoriendarstellung	148 Minuten	97 Minuten
Materialanzahl	5	3-5

Beide Methoden haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Die Stringing Methode überzeugt durch ihre Robustheit und Genauigkeit unter kontrollierten Bedingungen, während die digitale Methode durch ihre Effizienz und den geringeren Ressourcenbedarf besticht, jedoch durch algorithmische Schwächen in ihrer Robustheit eingeschränkt ist. Eine Kombination beider Methoden könnte die jeweiligen Stärken optimal nutzen und die forensische Blutspurenmusteranalyse insgesamt verbessern. Die digitale Methode stellt einen bedeutenden Fortschritt dar und hat das Potenzial, die traditionelle analoge Methode in vielen Bereichen zu ergänzen oder sogar zu ersetzen. Dennoch müssen die Schwächen der digitalen Methode durch weitere Forschung und Optimierung der Algorithmen adressiert werden, um die Methode in der Praxis vollständig nutzbar zu machen. Trotz ihrer Nachteile bleibt die Stringing Methode eine zuverlässige Methode zur Visualisierung von Trajektorien, insbesondere in komplexen forensischen Untersuchungen.

5 Diskussion

Die Untersuchung der Methoden zur Erzeugung von Trajektorien in der Blutspurenmusteranalyse hat mehrere wesentliche Ergebnisse und Herausforderungen aufgezeigt. Die Stringing-Methode erwies sich als robust und genau, ist jedoch zeitaufwendig und erfordert umfangreiche manuelle Eingriffe, was die Anwendbarkeit in schnellen oder ressourcenbegrenzten Szenarien einschränkt. Im Gegensatz dazu bietet die digitale Methode eine schnellere und effizientere Alternative mit weniger Materialbedarf und der Möglichkeit zur Nachbearbeitung, leidet jedoch unter algorithmischen Schwächen, insbesondere bei der Verarbeitung unterschiedlicher Untergründe, was ihre Robustheit und Zuverlässigkeit beeinträchtigt.

Ein zentrales Problem der digitalen Methode ist die mangelnde Robustheit gegenüber unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten am Tatort. Variationen in den Untergründen können die Algorithmen zur Extraktion der Blutspuren verwirren und zu Fehlinterpretationen sowie ungenauen Ergebnissen führen. Zukünftige Arbeiten sollten darauf abzielen, die Algorithmen weiter zu optimieren und ihre Fähigkeit zur Anpassung an verschiedene Bedingungen zu verbessern. Hier könnte eine intensivere Nutzung von Machine-Learning-Techniken helfen, die Algorithmen widerstandsfähiger und adaptiver zu gestalten.

Ein weiteres signifikantes Problem ist die fehlende Validierung der Methode mit idealisierten Blutspuren. In der vorliegenden Arbeit wurde diese ohne umfassende Validierung angewendet, was die Zuverlässigkeit der Ergebnisse einschränkt. Um die digitale Methode praxisreif zu machen, sollten zukünftige Studien idealisierte Blutspuren unter kontrollierten Bedingungen systematisch testen und validieren. Dies würde sicherstellen, dass die digitale Methode auch in realen Anwendungsszenarien zuverlässig funktioniert.

Die digitale Methode, die auf dem Blender Add-on von Gina Marie Pfeiffer basiert, bietet bereits einige vielversprechende Ansätze zur Verbesserung der Blutspurenmusteranalyse. Pfeiffer erwähnte in ihrer Arbeit die Möglichkeit, die Positionierung der Trajektorien an der Längsachse der Blutspuren zu optimieren, was die Genauigkeit der Trajektorienberechnung weiter erhöhen könnte. Dies sollte in zukünftigen Entwicklungen des Add-ons berücksichtigt werden.

Zudem sollte das neue Tatortmodell in Kombination mit dem Blender Add-on umfassend für reale Spurenmuster getestet werden. Es ist notwendig, das Zusammenspiel dieser beiden Komponenten unter realistischen Bedingungen zu evaluieren, um die Methode zu verfeinern und ihre Anwendbarkeit in der Praxis zu bestätigen. Dabei muss auch die Photogrammetrie des Tatortmodells verbessert werden, da Schwächen in der Beleuchtung die Modellgenauigkeit beeinträchtigen können.

Abschließend lässt sich sagen, dass beide Methoden, sowohl die analoge als auch die digitale, ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben. Eine Kombination beider Methoden könnte die jeweiligen Stärken optimal nutzen und die forensische Blutspurenmusteranalyse insgesamt verbessern. Die digitale Methode stellt einen bedeutenden Fortschritt dar, jedoch sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um ihre Schwächen zu adressieren und die Methode in der Praxis vollständig nutzbar zu machen.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Grassberger und H. Schmid, *Todesermittlung: Befundaufnahme und Spurensicherung*. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart, 2009, ISBN: 978-3-8047-3201-8.
- [2] Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde, *Allgemeine Forensik III - Biologische Spuren: Vorlesungsfolien*, 24.10.2021.
- [3] D. Labudde und M. Mohaupt, *Bioinformatik im Handlungsfeld der Forensik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. DOI: [10.1007/978-3-662-57872-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57872-8).
- [4] O. Peschel, F. Ramsthaler und M. Rothschild, *Forensische Blutspurenmusteranalyse*. Lehmanns, 2015, ISBN: 9783865417954. Adresse: <https://books.google.de/books?id=urHtCgAAQBAJ>.
- [5] E. Dr. Piotrowski, *Über Entstehung, Form, Richtung und Ausbreitung von Blutspuren nach Hiebwunden des Kopfes*. 1895.
- [6] Uniklinik RWTH Aachen, *Was ist Blut und dessen Aufgaben?* Adresse: <https://www.ukaachen.de/kliniken-institute/transfusionsmedizin-blutspendedienst/blutspendedienst/wissenswertes-ueber-blut/was-ist-blut-und-dessen-aufgaben/>.
- [7] S. H. James, P. E. Kish und P. Sutton, *Principles of Bloodstain Pattern Analysis: Theory and Practice*. 2005. Adresse: https://books.google.de/books?id=8_fKBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=de&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false.
- [8] American Society of Hematology, *Blood Basics*, 2022. Adresse: <https://www.hematology.org/education/patients/blood-basics>.
- [9] S. N. Kunz, T. Klawonn und C. Grove, „Möglichkeiten und Grenzen der forensischen Blutspurenmusterverteilungsanalyse“, *Wiener medizinische Wochenschrift*,
- [10] L. Mountrakis, E. Lorenz und A. G. Hoekstra, „Scaling of shear-induced diffusion and clustering in a blood-like suspension“, *Europhysics Letters*, Jg. 114, Nr. 1, S. 14 002, 2016. DOI: [10.1209/0295-5075/114/14002](https://doi.org/10.1209/0295-5075/114/14002).
- [11] M. Ciaston und E. Pibiri, „Oberflächenspannung: Eine Hausarbeit zu der Vorlesung Physikalische Grenzflächenchemie“, Diss., Technische Universität Carola-Wilhelmina, Braunschweig, 2006.
- [12] W. Jelkmann, „Allgemeine Eigenschaften des Blutes“, in *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*, R. Brandes, F. Lang und R. F. Schmidt, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 285–305, ISBN: 978-3-662-56468-4. DOI: [10.1007/978-3-662-56468-4_textunderline23](https://doi.org/10.1007/978-3-662-56468-4_textunderline23).
- [13] E. Mützel, S. Kunz und O. Peschel, „Blutspurenmuster- Verteilungsanalyse – Aspekte für die klinisch-forensische Praxis“, in *Klinisch-forensische Medizin: Interdisziplinärer Praxisleitfaden für Ärzte, Pflegekräfte, Juristen und Betreuer von Gewaltopfern*, M. Grassberger, K. Yen und E. E. Türk, Hrsg., Vienna: Springer Vienna, 2013, S. 163–177, ISBN: 978-3-211-99468-9. DOI: [10.1007/978-3-211-99468-9_textunderline18](https://doi.org/10.1007/978-3-211-99468-9_textunderline18).
- [14] S. N. Kunz, T. Klawonn und C. Grove, „Möglichkeiten und Grenzen der forensischen Blutspurenmusterverteilungsanalyse“, *Wiener medizinische Wochenschrift (1946)*, Jg. 164, Nr. 17-18, S. 358–362, 2014. DOI: [10.1007/s10354-014-0297-6](https://doi.org/10.1007/s10354-014-0297-6).

- [15] O. Peschel, S. N. Kunz, M. A. Rothschild und E. Mützel, „Blood stain pattern analysis“, *Forensic Sci Med Pathol*, Nr. 7, S. 257–270, 2011. DOI: [10.1007/s12024-010-9198-1](https://doi.org/10.1007/s12024-010-9198-1).
- [16] K. Schindler und W. Förstner, „Photogrammetry“, in *Computer Vision: A Reference Guide*, K. Ikeuchi, Hrsg., Boston, MA: Springer US, 2014, S. 597–599, ISBN: 978-0-387-31439-6. DOI: [10.1007/978-0-387-31439-6{\textunderscore}139](https://doi.org/10.1007/978-0-387-31439-6{\textunderscore}139).
- [17] C. Heipke, Hrsg., *Photogrammetrie und Fernerkundung: Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, ISBN: 978-3-662-47094-7.
- [18] C. Villa und C. Jacobsen, „The Application of Photogrammetry for Forensic 3D Recording of Crime Scenes, Evidence and People“, in *Essentials of Autopsy Practice: Reviews, Updates and Advances*, G. N. Ritty, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 1–18, ISBN: 978-3-030-24330-2. DOI: [10.1007/978-3-030-24330-2{\textunderscore}1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24330-2{\textunderscore}1).
- [19] T. Bergmann, S. Becker und D. Labudde, *Untersuchung der Eignung von Photogrammetrie und Laserscan zur Digitalisierung in der forensischen Blutspurenmusteranalyse*, 2022.
- [20] Alexander Köhler, „Konstruktion und Optimierung einer dauerhaften Übungsumgebung zur Erzeugung digitaler Zwillinge von Tatorten mit forensische relevanten Blutmuster“, Diss., Mittweida, 2023.
- [21] Gina Marie Pfeiffer, „Prototypische Implementierung eines Ansatzes zur Anlegung von Trajektorien im 3D-Modell der digitalen Blutspurenmusteranalyse“, Diss., Mittweida, 2023.
- [22] E. Steinmüller, „Erarbeitung einer Pipeline zur Überführung von analogen zu digitalen Versuchsmodellen für die computergestützte Blutmusteranalyse mit Fokus auf die Photogrammetrie“, Praktikumsbericht, 2021.
- [23] Philip Joris u. a., „HemoVision: An automated and virtual approach to bloodstain pattern analysis“, *Forensic Science International*, Jg. 251, S. 116–123, 2015, ISSN: 0379-0738. DOI: [10.1016/j.forsciint.2015.03.018](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.03.018). Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379073815001243>.
- [24] R. Blake, *How to String a Crime Scene for Bloodstain Patterns*, 2019.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich – Alina Malik – an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

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

Mittweida, 12. August 2024

Ort, Datum

Alina Malik