

Aus dem Institut für Rechtsmedizin
der Medizinischen Fakultät
der Universität des Saarlandes, Homburg/Saar
(Leiter: Univ.-Prof. Dr. P. Schmidt)

**Die Abhängigkeit beschleunigter Blutspurenmuster von
Laufgeschwindigkeiten und bewegungsassoziierten
Armpendelbewegungen.**

*Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät*

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2017

Vorgelegt von: Ann-Katrin Kröll

geb. am: 13.05.1986 in München

„Alles Wissen und alle Vermehrung unseres Wissens endet nicht mit einem Schlußpunkt, sondern mit Fragezeichen. Ein Plus an Wissen bedeutet ein Plus an Fragestellungen, und jede von ihnen wird immer wieder von neuen Fragestellungen abgelöst.“

Hermann Hesse

Meinem Großvater

Prof. Dr. med. Theodor Stolze

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	1
1.1. Summary	3
2. Einleitung.....	5
2.1. Die Blutspurenmusteranalyse	5
2.2. Geschichtlicher Überblick.....	6
2.3. Physikalische Grundlagen der Blutspurenballistik	7
2.3.1. Physikalische Einflussgrößen.....	7
2.3.2. Grundsätze der Blutspurenballistik.....	10
2.4. Morphologische Systematik der Blutspurenmuster.....	13
2.4.1. Methoden der Blutspurenmusteranalyse	14
2.5. Ziele und Hypothesen	14
3. Material und Methoden	16
3.1. Allgemeine Richtlinien der Blutspende	16
3.2. Das Transfusionssystem.....	18
3.3. Aufbau der Laufstrecke	20
3.4. Ausstattung der Probanden.....	23
3.5. Versuchsablauf	24
3.6. Methodik der Blutspurenmusteranalyse	25
3.7. Messparameter und Messmethode	25
3.8. Statistische Auswertung.....	31
4. Ergebnisse.....	33
4.1. Morphologisch-deskriptive Analyse der Blutspurenmuster	36
4.1.2. Bewegungsgeschwindigkeit	36
4.1.3. Blutspurenmuster bei frei schwingendem Arm	36
4.1.4. Blutspurenmuster bei am Körper fixiert gehaltenem Arm	40
4.2. Quantitative Auswertung der Blutspurenmuster	42
4.2.1. Zusammenhang zwischen Bewegungsgeschwindigkeiten und Formausprägungen der Blutspurenmuster	43
4.2.2. Eigenschaften der „loops“ und der „waves“ in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit	48
4.3. Klassifikation der Blutspurenmuster	58
5. Diskussion.....	63

5.1.	Experimentelles Design	63
5.2.	Morphometrische Analysen der Blutspurenmuster	65
5.2.1.	Geschwindigkeitsabhängige Eigenschaften der Blutspurenmuster in Relation zu bewegungsassoziierten Armhaltungen und Armpendelbewegungen.....	66
5.2.2.	Diskriminanzmodell zur Schätzung der Zugehörigkeit zu einer Geschwindigkeitsklasse anhand metrischer Merkmalsausprägungen der Blutspurenmuster	72
5.3.	Schlussfolgerungen und praktische Anwendung	74
6.	Literaturverzeichnis	77
7.	Anhang.....	80
7.1.	Publikationen	80
7.2.	Kongressbeiträge	80
7.3.	Buchbeiträge.....	81
7.4.	Danksagung.....	81

1. Zusammenfassung

Blutende Opfer, oder Tatbeteiligte mit Blutanhaftungen hinterlassen typischerweise beim Fortbewegen, bzw. beim Verlassen von Tatorten Blutspuren in Form von Tropfspuren, deren Form und Verteilung mögliche Rückschlüsse auf die jeweilige Bewegungsgeschwindigkeit und Bewegungsrichtung gestatten. Die vorliegenden Experimente wurden mit dem Ziel durchgeführt, unter kontrollierten und standardisierten Bedingungen Bodenspuren in Abhängigkeit von drei Bewegungsgeschwindigkeiten (Gehen, Joggen und Rennen) und mit jeweils zwei unterschiedlichen bewegungsassoziierten Armpendelbewegungen (frei schwingender Arm und festgehaltener Arm) zu generieren. Mittels eines frei schwingenden Arms wurde ein kontrollierter und harmonisch koordinierter Bewegungsablauf z.B. beim Verlassen von einem Ort des Geschehens nachgestellt, wohingegen ein am Körper fixiert gehaltener Arm als Modell für eine blutende, bzw. blutbehaftete Person diente. Diesbezüglich stellt sich unter anderem auch die Frage nach der verbliebenen Handlungsfähigkeit, mit der eine verletzte Person einen Tatort verlässt. Hierbei spielt neben der Morphologie einzelner Blutstropfen auch die Erkennung und Interpretation der entstandenen Spurenkomplexe eine wichtige Rolle. Anhand der Ausprägung und Formgebung der Bodenspuren kann neben der metrischen Analyse der einzelnen Blutstropfen eine zusätzliche Untersuchung der Bewegungsgeschwindigkeit erfolgen. Hierzu wurden von 5 Probanden jeweils unter standardisierten Bedingungen auf einer mit reifsten Papier ausgelegten Laufstrecke von insgesamt 10 Metern Tropfpfade erzeugt. Diese Strecke wurde in jeweils drei Geschwindigkeiten (Gehen, Joggen und Rennen) sowie mit einem schwingenden und einem am Körper fixiert gehaltenen Arm zurückgelegt. Die blutende Verletzung wurde durch eine am rechten Arm handrückenseitig angebrachte, artifizielle Blutungsquelle (Öffnung eines Transfusionsschlauches) imitiert. Für die Erzeugung der Blutspuren wurde im Vorfeld der Experimente humanes Blut durch die hiesige Blutbank entnommen. Auf Grundlage der erwarteten Blutspurenverteilungsmuster wurden im Vorfeld verschiedene Variablen definiert. Die experimentell erzeugten Blutspurenmuster wurden fotodokumentiert, deskriptiv kategorisiert und anschließend mittels der Analysesoftware *Digimizer*[®] in Bezug auf metrische und geometrische Eigenschaften semiquantitativ ausgewertet. Anhand eines schrittweisen Vorgehens erfolgte die Auswertung und Interpretation der entstandenen Blutspurenkomplexe. Zunächst wurde die morphologische und deskriptive Analyse der Blutspurenmuster in Relation zu den Bewegungsgeschwindigkeiten und den bewegungsassoziierten Armpendelbewegungen vorgenommen. Hierbei konnte bereits durch eine rein visuelle Interpretation der Spurenbilder eine Unterscheidung in die drei

Geschwindigkeiten sowie zwischen den durchgeführten Armhaltungen erfolgen. Mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit entstanden charakteristische bogenförmige Blutspurenmuster, die an Schleifen (englisch „*loops*“) erinnerten, wobei die Länge und Breite der „*loops*“ in Abhängigkeit von der Schrittlänge ($p < 0,05$) und der Geschwindigkeit ($p < 0,001$) statistisch signifikant zunahm. Im Unterschied dazu, erhielt man vornehmlich bei gehenden Bewegungsgeschwindigkeiten mit am Körper fixiert gehaltenem Arm spitz zulaufende Blutspurenmuster, die an Wellen erinnerten (englisch „*waves*“) und ebenfalls einen statistisch hochsignifikanten und geschwindigkeitsabhängigen Zuwachs ihrer Länge und Breite aufwies ($p < 0,001$). Ferner fielen bei beiden Spurenbildern sogenannte „*Tropf-in-Tropfmuster*“ auf, wobei statistisch hochsignifikant mehr „*Tropf-in-Tropf Spuren*“ beim „Gehen“, als beim „Rennen“ resultierten ($p < 0,001$). Mittels einer Diskriminanzanalyse wurde in einem letzten Schritt geprüft, ob anhand der erfassten Länge und Breite der vorliegenden Spurenbilder eine Schätzung der Bewegungsgeschwindigkeit gelingt. Versucht man eine Differenzierung zwischen allen drei Geschwindigkeiten, so gelang eine korrekte Klassifikation nur in ca. 59% der Fälle. Beschränkt man sich nur auf die Geschwindigkeiten „Gehen“ und „Rennen“, so werden hochsignifikant ca. 89% der Fälle richtig-positiv zugeordnet ($p < 0,001$). Berücksichtigt man zusätzlich die Schrittlänge, so kann man eine richtig-positive Zuordnung der Spurenbilder in 99% der untersuchten Fälle erzielen ($p < 0,001$). Durch die Vermessung der Spurenlängen ließen sich innerhalb der untersuchten Geschwindigkeitsklassen statistische Differenzen nachweisen ($p < 0,0001$). Eine neu vorgestellte Diskriminanzfunktion ermöglicht die Einteilung der Spurenbilder in „Gehen“ und „Rennen“. Jedoch kann allein anhand einer solchen Längenbestimmung und ohne Zuordnung in die beiden Formklassen „*loop*“ und „*wave*“ keine definitive Aussagen darüber erfolgen, ob der blutbehaftete Arm nun geschwungen, oder fixiert am Körper gehalten wurde. Somit sind Rekonstruktionen zum vermeintlichen Bewegungsablauf bei Fällen insbesondere dann problematisch, wenn eine eindeutige Musterzuweisung durch Artefakte nicht gelingt, oder eine unscharfe Abgrenzung zwischen überlagerten Blutspurenbildern vorliegt. Insbesondere durch sogenannte Nachtatverhalten, wie z.B. durch Rettungskräfte zusätzlich verursachte Blutspurenmuster, können primär dem eigentlichen Tatgeschehen zuzuordnende Blutspurenmuster überlagert werden und die Interpretation von Blutspuren erschweren. Letztendlich zeigen die vorliegenden Untersuchungen auf, dass die Analyse und Interpretation von Blutspurenmustern im Abgleich mit systematischen wissenschaftlichen Untersuchungen gelingt, sodass hierdurch eine praktische Anwendung auf einen konkreten Fall aus dem rechtsmedizinischen Alltag möglich ist.

1.1. Summary

The correlation between accelerated bloodstain patterns and speed of motion in accordance to different arm movements.

When leaving a crime scene, bleeding victims or blood stained assailants typically leave bloodstain patterns with a characteristic distribution and shape depending on the direction and speed of travel. Following experiments were conducted with the objective of generating bloodstain patterns with three different motion speeds (walking, jogging and running) and two different associated arm movements. By using a swinging arm with an artificial blood source, a mock crime scene with a controlled and coordinated leaving of a person was imitated, whereas a person with a missing arm swing was chosen to imitate a possible bleeding injury. In this regards, the question of a remaining actionability of a severely injured person might be of high importance. Concerning the methodology of analysis of these blood stain patterns, it is advisable to not only take a look at the shape and morphology of a single blood stain but rather considering an overall view of the analyzed bloodstain pattern complexes. This starts by recognizing and evaluating the shape and distribution of the drip trails, exhibiting a series of bloodstains and possibly reflecting the dynamic of a chain of action behind a bloodshed event. An exclusive formal and systematic analysis of the drip trails might not reflect a sufficient view of a mostly multidynamical chain of action. In this study we aimed to experimentally verify such reconstructive analysis of bloodstain patterns. Studies were performed by using a test course with underlying tear-resistant paper and a total distance of ten meters. Five test persons were selected, irrespective of gender and age. The distance was covered by each test person with three different motion speeds (walking, jogging and running) and two different arm movements ("swinging arm" and "no swinging arm"). In order to imitate an artificial bleeding source, an open transfusion lane was standardized fixed on the back of the right hand. Prior to this, human blood was obtained by blood donation in corporation with local blood donation services, respecting medical guidelines regarding the experimental use of human blood. Furthermore, all experiments were approved by the Ethics Committee of the University of Saarland. In the forefront of the trials, metric variables were defined according to the expected outcome of the bloodstain patterns. The resulting bloodstain patterns were photo documented, followed by a descriptive categorization of the patterns and finally analyzed by using *Digimizer*[®] as analysis software for obtaining metric and geometrical values. Through using a stepwise approach, the interpretation and analysis of bloodstain patterns started with a descriptive and morphological categorization of the geometrical formation of the bloodstains in relation to the motion speed and arm movement.

At first sight, one could easily identify characteristic patterns of the experimental generated drip patterns. When moving slowly with a swinging arm, typical “loops” were created. In contrast, a slow movement with a non-swinging arm resulted in patterns resembling “waves”. The length and width of these looped and waved drip trails significantly increased in correlation to the step length ($p < 0.05$) and speed of motion ($p < 0.001$). Morphometrical analysis of blood stains revealed no significant differences between stain diameters in relation to the speed of motion and arm movement. Despite that, satellite spatters resulting from blood dripping into blood were detected at both arm movements, whereas deposition was reciprocal to increase in speed. Thus, a higher number of drop-in-drop stains were counted at slow movements ($p < 0.001$). By using a discriminant analysis, it was tested if an estimation of speed by means of the length and width of these patterns was succeeded. Including all speeds (walking, jogging and running), a correct classification was achieved in 59% of the cases. When limiting the classification to “walking” and “running”, a significant, correct classification was achieved in at least 89% ($p < 0.001$). Furthermore, a maximum classification result of nearly 99% could be attained, by additionally referring to the step length ($p < 0.001$). In conclusion, a decisive analysis of the distribution and dimension of loop- and wave-like drip patterns, including the speed of movement and biomechanical properties of a moving person (i.e. arm movement), highly benefits a professional crime-scene reconstruction. Moreover, additional information on the motion sequence offers further knowledge on a remaining actionability of a person of interest. By referring to the length and width of these characteristic formed blood trails, a classification of speed can be generated. A new discriminant formula for differentiating between blood trails caused by walking and running movement is presented. The given results prove the fact, that a personal examination and measurement of bloodstain patterns by the bloodstain analyst is necessary, especially when scene processing efforts, like artefactual created bloodstains by the emergency medical technicians, have to be considered. In summary, it is advisable to compare experimental findings with concrete realistic case works, thus underlining the necessity of conducting experimental studies when examining realistic case works.

2. Einleitung

2.1. Die Blutspurenmusteranalyse

Bei der sogenannten Blutspurenmusteranalyse handelt es sich um eine wissenschaftliche Methode, bei der durch die Analyse von Form und Verteilung der Blutspritzer differenzierte Detailfragen zu Tathergängen beantwortet werden können. Hierbei spielt die Erfassung, Kategorisierung und Interpretation der Form und Verteilung tatrelevanter Blutspuren eine wesentliche Rolle und wird als bedeutendes Element in der funktionellen, medizinisch-naturwissenschaftlichen Tatortrekonstruktion gesehen (Peschel et al., 2011). Nach Brinkmann (1988) entstehen bei mehr als der Hälfte aller Tötungsdelikte Formspuren, die ein wesentliches Element in dieser funktionellen Rekonstruktion darstellen. Die Rekonstruktion von Tatabläufen unterteilt sich in mehrere Schritte, wobei der erste Schritt zumeist in der visuellen Begutachtung der Blutspurenmuster am Tatort besteht. Eine erste Inspektion des Tatortes bei noch unveränderter Lage des Leichnams und die Betrachtung von unveränderten frischen Blutspurenmustern vor Ort kann bereits zu diesem Zeitpunkt wichtige Informationen liefern, die unter anderem nachfolgende Ermittlungsschritte beeinflussen können. Bereits an dieser Stelle muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass nur eine sehr detaillierte und gründliche Bestandsaufnahme und Interpretation der Blutspuren unter Kenntnis etwaiger Verletzungsbilder und in Betracht kommender Waffen zu validen, abschließenden Befunden und Ergebnissen führen kann. Generell gilt die Auffassung, dass hierdurch noch vor der morphologischen Befunderhebung durch die Obduktion wesentliche Informationen zum Tatablauf erhoben werden (Peschel et al., 2011). Zu dieser Erkenntnis kam bereits der junge polnische Arzt, Dr. Eduard Piotrowski, der im Jahre 1895 die ersten systematischen Versuche der Blutspurenkunde unternahm und erkannte, dass die Interpretation von Blutspuren ein wesentliches Element in der Aufklärung von Tötungsdelikten sein kann:

„It is of the highest importance for the field of forensic science to give the fullest attention to bloodstains found at the scene of crime because they can throw light on a murder and provide an explanation for the essential moments of the incident“. (Piotrowski, 1901)

2.2. Geschichtlicher Überblick

Eduard Piotrowski veröffentlichte in seinem Werk „*Über Entstehung, Form, Richtung und Ausbreitung der Blutspuren nach Hiebwunden des Kopfes*“ (Piotrowski, 1895) an Hand von Versuchen durch Hammerschläge auf Kaninchenschädel erstmalig experimentelle Befunde auf dem Gebiet der Blutspurenmusteranalyse. Durch seine Blutspurenexperimente verhalf er zu einer wissenschaftlichen und analytischen Betrachtungsweise von Blutspurenmustern. Durch gezielte Hammerschläge auf Kaninchenschädel versuchte er, an Hand der resultierenden Spritzmuster einen Zusammenhang zwischen Tropfenform und Flugrichtung herzustellen. Er legte den Grundstein für die Durchführung reproduzierbarer Versuche, auch wenn aus heutiger Sicht solch martialische Tierexperimente begründeter Weise ethische Bedenken begegnen und durch modernere Studiendesigns ersetzt wurden. Jedoch überdauern die Skizzierungen des Wissenschaftlers bis heute und finden sich in zahlreichen modernen Lehrbüchern der Blutspurenmusteranalyse wieder (Ramsthaler et al., 2015). Mit den Fortschritten der modernen Naturwissenschaften zu Anfang des 20. Jahrhunderts schlossen sich weitere Wissenschaftler Piotrowskis praktischen Überlegungen an und eröffneten neue Möglichkeiten auf dem Gebiet der praktischen Tatrekonstruktion. Im Jahre 1914 wurde der Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Tropfenform dargestellt (Ziemke, 1914). Den trigonometrischen Zusammen zwischen Auftreffwinkel einzelner Blutspuren und der Spurenform, der Tropfenlänge und –breite arbeiteten Balthazard et al. (1939) heraus. In der forensischen und ermittlungsseitigen Fallarbeit haben wissenschaftlich fundierte Blutspurenmusteranalysen eine zunehmende Akzeptanz erfahren, auch wenn sie als primär erfahrungswissenschaftliches Verfahren immer wieder kritisch hinterfragt werden. Bachhiesl (2010) fasst die Diskussion über den Wert von Blutspurenmusteranalysen als anerkannte Wissenschaft in seinem Werk „Blutspuren. Zur Bedeutung des Blutes in der Kriminalwissenschaft um 1900“ zusammen.

Moderne Lehrmeinungen der Blutspurenmusteranalyse sind aus den Lehrbüchern von *Herbert Leon MacDonell* (1971; 1992), *Bevel* und *Gardner* (2008) und *James et al.* (2005) zu entnehmen. Hervorgehoben wird, dass die Blutspurenmusteranalyse ein erfahrungs- und evidenzbasiertes Teilgebiet der forensischen Medizin darstellt und multidisziplinär Erkenntnisse mehrerer Wissenschaften (wie der Physik und der Mathematik) nutzt und themenbezogen zusammensetzt. Diesbezüglich spielt nicht nur die genaue Differenzierung und Zuordnung von Blutspuren für die Interpretation eine wichtige Rolle, sondern auch eine exakte Dokumentation der Spurenbilder, die aus wissenschaftlicher Sicht zu jeder Zeit reproduzierbar und auch nachvollziehbar sein soll. Die moderne Blutspurenmusteranalyse

gliedert sich in mehrere Schritte, angefangen mit einer detaillierten Tatortbegehung und Dokumentation tatrelevanter Spurenbilder, dem morphologischem Abgleich mit den Befunden am Täter oder am Opfer, bis hin zur EDV-basierten Auswertung der Bilddateien (beispielsweise mittels computerisierten Rekonstruktionsprogrammen, z.B. *HemoSpat*TM). Um einen allgemeinen, wissenschaftlichen Konsens herbeizuführen, hat sich im Jahr 1983 im angloamerikanischen Raum die *International Association of Bloodstain Pattern Analysis (IABPA)* gegründet, die im deutschsprachigen Raum durch eine im Jahr 2005 entsprechende Arbeitsgruppe der *Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin* repräsentiert wird.

2.3. Physikalische Grundlagen der Blutspurenballistik

Für die Interpretation von Blutspurenmustern sind vereinzelte themenbezogene biophysikalische Eigenschaften von Blut hervorzuheben, die als Grundlage für die Interpretation vorliegender Blutspurenkomplexe zu betrachten sind. So sind zum einen ballistische Eigenschaften eines Blutstropfens in Hinsicht auf die jeweiligen Flugeigenschaften von einer sich bewegenden Blutungsquelle auf eine Oberfläche zu beachten, zum anderen spielen weitere physikalische Eigenschaften, wie das Fließverhalten von Blut beim Auftreffen auf eine Oberfläche eine wichtige Rolle. Letztendlich sind diese Kenntnisse für die Durchführung von reproduzierbaren Untersuchungen unter standardisierten Bedingungen erforderlich.

2.3.1. Physikalische Einflussgrößen

Die Betrachtung der physikalischen Eigenschaften von Blut richtet sich bei den vorliegenden Untersuchungen in erster Linie auf mögliche Einflussgrößen, die die Flug- und Fließeigenschaften von Blut bestimmen können. Generell haben Flüssigkeiten das Bestreben, ihre Oberfläche so gering wie möglich zu halten. Dies gilt auch für den Blutstropfen, der im freien Fall ohne den Einfluss weiterer Kräfte die typische Kugelform beibehält (deGennes et al., 2003). Dies lässt sich auf die Oberflächenspannung zurückführen, die infolge von Kohäsivkräften zwischen den Molekülen entsteht und von der Temperatur abhängt. Hiernach verringert sich die Oberflächenspannung bei zunehmender Temperatur (James et al., 2005). Generell ist die Oberflächenspannung als relativ stabil anzusehen, insbesondere in Hinsicht auf das Lebensalter, Geschlecht, Vorhandensein von Gerinnungshemmern oder von Alkohol im Blut. Eine Oberflächenspannung entsteht im Regelfall im Grenzbereich zwischen einer Flüssigkeit und einem Gas und verhält sich ähnlich wie eine elastische Folie. Bevor sich nun ein Blutstropfen von einer blutigen Wunde, oder von einer blutigen Messerspitze löst, muss zunächst die Oberflächenspannung überwunden

werden. Dies geschieht beispielsweise durch einen Schlag auf eine blutende Wunde, oder wenn die Blutmenge die Oberflächenspannung bzw. die Kohäsivkräfte überwindet. Experimentell wurden bisher deutlich unterschiedliche Tropfenvolumina detektiert, die zwischen 0,013 und 0,16ml gelegen haben (Laber, 1985). In Zeitlupe betrachtet, löst sich ein Tropfen in elliptischer Form von der Gesamtmasse ab und nimmt dann die typische Kugelform an. Diese kugelige Form wird im weiteren freien Fall beibehalten und weist allenfalls feinste Oszillationen auf, die durch die Anziehungskräfte der Moleküle untereinander entstehen und in Abhängigkeit von Gravität und Luftwiderstand sind (Attinger et al., 2013). Fliegende Blutstropfen sind immer kugelförmig, bzw. können als kugelförmig betrachtet werden und können nur durch die Einwirkung einer größeren Energie bzw. Arbeit in kleinere Blutstropfen geteilt werden (Ramsthaler et al., 2015). Laut MacDonell (1992) lassen sich unter statischen Bedingungen identische und weitgehend reproduzierbare Tropfen mit einer Größe von 50µl erzeugen, die er als den sogenannten „typischen Tropfen“ bezeichnete. Bei hochrasanten Auftreff- bzw. Aufschlagereignissen sind jedoch kleinere Tropfen zu erwarten, die allerdings auch bei solchen hohen Geschwindigkeiten einen Durchmesser von 4-5mm und eine Flugdistanz von 120cm nicht überwinden (Peschel et al., 2011). Es sei jedoch darauf verwiesen, dass sich der „typische“ Tropfen nur unter statischen Bedingungen experimentell erzeugen lässt. In der Praxis findet man eine Vielzahl an unterschiedlichen Tropfen, da dem Verspritzen von Blut nicht statische, sondern dynamische Handlungsabläufe zugrunde liegen (beispielsweise bei Abwehrhandlungen oder beim fluchtartigen Verlassen eines Tatortes) und man eine Vielzahl an unterschiedlichen Zieloberflächen (zum Beispiel glatte Fliesen, Teppich oder Kleidung) antrifft. Die Zieloberfläche hängt aus physikalischer Sicht von der jeweiligen Elastizität, der Permeabilität, der Porosität, der Rauheit und von dem sogenannten Benetzungswinkel (alternativ Randwinkel, Kontaktwinkel) ab (**Abb. 1**).

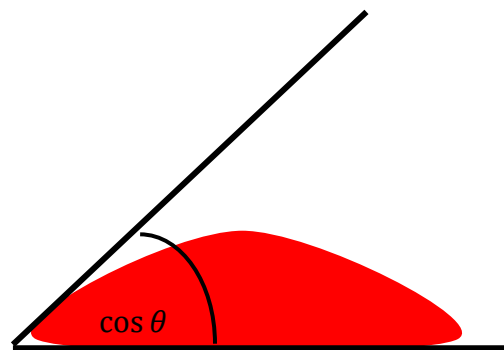


Abbildung 1. Der Auftreffwinkel $\cos \theta$ eines Blutropfens (rote Fläche), der die Tropfenform auf einer festen Oberfläche definiert.

Dieser Benetzungswinkel ist näher definiert als derjenige Winkel, der die Tropfenform auf einer festen Zieloberfläche definiert (Ramsthaler et al., 2015). Liegt der Benetzungswinkel bei weniger als 90° , so wird von einer sogenannten Benetzung der Zieloberfläche gesprochen. Liegt der Benetzungswinkel bei 0° , so wird man von einer hydrophilen Oberfläche sprechen können. Bei einem Benetzungswinkel über 120° perlt der Tropfen ab, sodass von einer hydrophoben Zieloberfläche ausgegangen werden kann (Attinger et al., 2013).

Zusätzlich spielt die Fließeigenschaft von Blut, die sogenannte Viskosität, bei der Verteilung und Ausbildung der jeweiligen Blutspur auf einer Oberfläche eine wichtige Rolle. Hierunter ist im Wesentlichen die sogenannte Zähflüssigkeit des Blutes zu verstehen, die laut MacDonell (1971) ebenfalls von der Temperatur abhängig ist. Die Viskosität steigt mit zunehmendem Gehalt an Erythrozyten, sodass mit steigendem Hämatokritwert und mit sinkender Strömungsgeschwindigkeit eine erhöhte Viskosität zu erwarten ist (Silbernagel und Despopoulos, 2007). Die Viskosität des Blutes ist mit der von Wasser ($\eta = 1$) vergleichbar, sodass das Spritzverhalten von Blut hinsichtlich der Morphologie dem des Wassers ähnlich ist und bisher keine Unterschiede beschrieben wurden (Peschel et al., 2011). Weitere mögliche Einflussgrößen, wie die individuelle Gerinnungsaktivität, zeigten bisher ebenfalls keine relevanten Einflüsse auf die Entstehung von Blutspurenmuster (Peschel et al., 2011). Neben den Fließeigenschaften von Blut ist die gute Adhäsionskraft hervorzuheben. Selbst kleine Blutmengen weisen eine sehr gute Übertragungsfähigkeit von Gegenstand zu Gegenstand auf.

„A little blood can go a long way in contaminating everything with which it comes into contact.“ (Bevel und Gardner, 2008)

2.3.2. Grundsätze der Blutspurenballistik

Lassen sich an einem Tatort mehrere unterschiedliche Blutspurenmuster detektieren, stellt sich nicht nur die Frage nach der individuellen Zuordnung dieser Spuren (durch molekularbiologische Methoden), sondern auch die Frage nach dem Mechanismus, der zu der vorgefundenen Verteilung der Blutropfen geführt haben könnte. Eine weitverbreitete Methode zur Analyse von Blutspuren am Tatort ist die Schätzung des sogenannten „*point of origin*“, auch Ursprungsort der Blutropfen (de Bruin et al., 2011). Dabei kann die Blutungsquelle an Hand parabolischer Funktionen ermittelt werden (Carter, 2001), Buck et al. (2011). Somit ist die eigentliche Flugkurve, die der Bluttropfen auf dem Weg von seinem Ursprung, dem sogenannten „*point-of-origin*“ zu der Zieloberfläche zurücklegt, aus wissenschaftlicher Sicht mit der sogenannten Wurfparabel im Vakuum beschrieben worden (Ramsthaler et al., 2015). Aufgrund des Luftwiderstands erhält man sogenannte ballistische Kurven (**Abb. 2**).

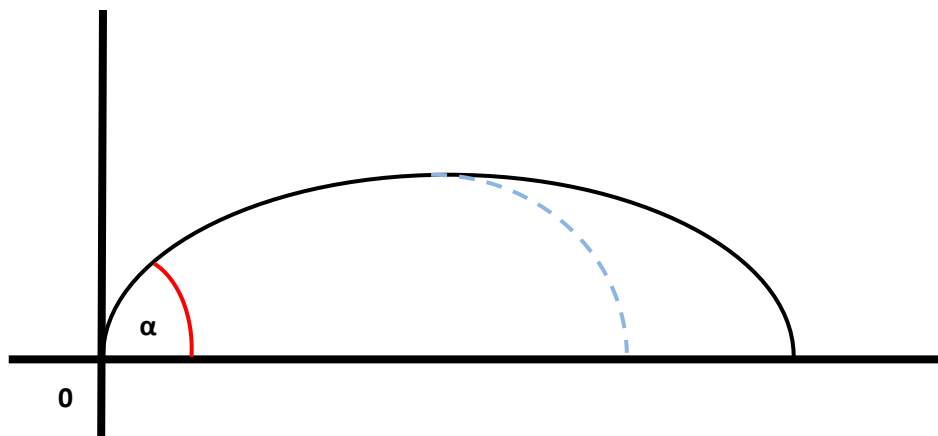


Abbildung 2. Sogenannte ballistische Wurfparabel (durchgezogene Linie). Exemplarisch im Vergleich eine ballistische Kure (gestrichelte Linie) bei jeweils gleicher Geschwindigkeit und gleichem Wurfwinkel α .

Ein Blutropfen mit einem Durchmesser von weniger als 1mm (zum Beispiel bei einer Schussverletzung) würde selbst bei hohen Geschwindigkeiten auf Grund des Luftwiderstands nur begrenzt von der Blutungsquelle „wegfliegen“, bzw. keine größere „Wurfweite“ erreichen als langsam fliegende, größere Blutstropfen über 1mm (Ramsthaler et al., 2015).

Bisherige experimentelle Versuche, anhand des Tropfendurchmessers auf die jeweilige Geschwindigkeit des Tropfens zu schließen, bedienten sich zunächst einer deskriptiven Einteilung der Tropfen anhand der durchschnittlich vorgefundenen Größe (fein, klein, mittel und groß) oder in die drei Geschwindigkeitsklassen (langsame, mittlere und hohe

Geschwindigkeiten) (Hulse-Smith und Illes, 2007; Laber, 1985; MacDonell, 1971). Nach Hulse-Smith und Illes (2007) lässt sich jedoch vorab sagen, dass, wenn ein großer Blutropfen weniger Ausziehungen hat, dieser am ehesten von einem großen Tropfen resultiert, der mit geringer Geschwindigkeit getropft ist. Im Gegensatz dazu stammt ein großer Blutstropfen mit vielen Ausziehungen von einem großen Blutstropfen, der mit höherer Geschwindigkeit zu Boden getropft ist. Jedoch ist die Geschwindigkeit eines fallenden Blutropfens maßgeblich abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit der sich bewegenden Personen oder des geschwungenen blutbehafteten Tatwerkzeuges (Hammer, Messer etc.). Aus physikalischer Sicht müssen hierbei ebenfalls die unterschiedlichen Phasen des typischen Auftreffens eines Blutropfens auf einer Zieloberfläche näher betrachtet werden. Beim Auftreffen eines Blutropfens auf eine Zieloberfläche bzw. auf ein Zielobjekt lässt sich an Hand modernster Technik (unter Verwendung einer sogenannten High-Speed-Kamera) die Bewegungs-mechanik des Blutropfens in unterschiedliche Phasen unterteilen. Hierbei erfolgt gemäß der Gravitation eine vertikale Ausrichtung des fallenden Tropfens in Richtung der Zieloberfläche. Aus biomechanischer Sicht lassen sich vier Phasen des Auftreffens eines Blutropfens auf eine Oberfläche beschreiben (**Abb. 3**).

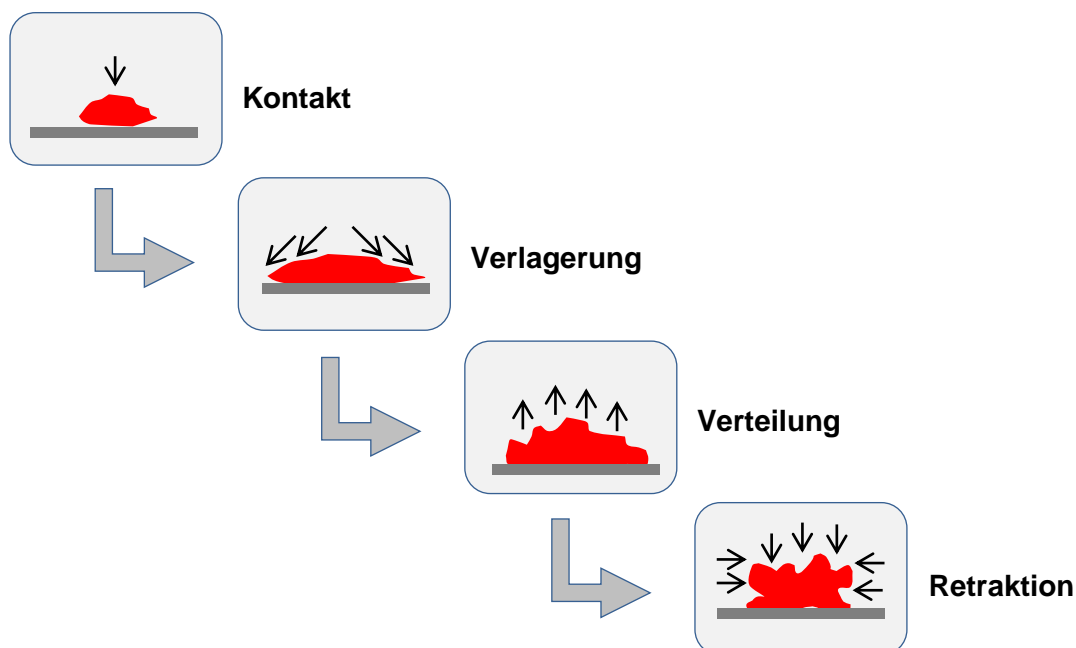


Abbildung 3. Die vier Phasen des Auftreffens eines Blutropfens auf eine horizontale Oberfläche.

Der *Kontakt* mit einer Zielfläche führt zu einer Zerstörung der sphärischen oszillierenden Form des Tropfens. Nach (Raymond et al., 1996) oszillieren fallende Blutropfen in den ersten Zentimetern zwischen einer abgeflachten und länglichen Form, wobei bei einer Fallhöhe von 25cm eine sphärische Tropfenform vorzuliegen scheint. Bei einer Fallhöhe von

50cm erwartet man eine Abflachung des fallenden Blutropfens. Mittels High-Speed-Aufnahmen konnte Raymond et al. (1996) aufzeigen, dass bei einer Fallhöhe von 40cm keine detektierbaren Oszillationen des fallenden Tropfens zu sehen waren. Beim Auftreffen auf eine horizontale Oberfläche verlagert sich der Tropfen je nach Oberflächenbeschaffenheit mit typischen radiären Ausziehungen. Generell gilt, je glatter, härter und non-poröser die Oberfläche, desto weniger Ausziehungen entstehen. Hierbei können in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit und der Tropfhöhe feine Ausläufer, sogenannte Satellitenspuren entstehen. Diese werden ebenfalls in der Umgebung von sogenannten *Tropf-in-Tropf Spuren* beobachtet, nämlich wenn „Blut in Blut“ tropft (James et al., 2005). Hiernach haben die resultierenden Satellitenspritzer einen Durchmesser von 1mm bis 4mm, wobei die Größe von dem initialen Volumen des Blutropfens abhängt. Bei einer Tropfhöhe unter 30cm wird man bei *Tropf-in-Tropf* Spuren auf einer glatten, harten Oberfläche keine Satellitenspritzer erhalten. Bei einem Auftreffwinkel von weniger als 90° kann im niedrigen Geschwindigkeitsbereich die typische „*Bärentatzenform*“ vorgefunden werden, die am freien Rand charakteristische stachelige oder runde Ausziehungen, sogenannte „*spines*“ (*englisch* Dorn, Stachel) aufweist (Allen, 1975), die auch als sogenannte „*fingers*“ (*englisch* Finger) beschrieben wurden (Hulse-Smith et al., 2005).

Im Unterschied zu der lateralen Verlagerung bezeichnet die nachfolgende *Dispersion* des Tropfens eine nach oben bzw. rückwärts gerichtete, das heißt entgegengesetzte Bewegung. In der letzten Phase des Auftreffens, der *Retraktion*, überwiegt letztendlich wieder die Oberflächenspannung und der Tropfen geht somit in die energetische Ausgangsform zurück. Es muss jedoch darauf verwiesen werden, dass diese physikalischen Grundlagen unter statischen und somit reproduzierbaren Bedingungen erarbeitet wurden und die eigentliche Dynamik, die sich aus der Interaktion von den an der Blutspur beteiligten Komponenten (Täter und/oder Opfer, Tatwerkzeug) zusammensetzt, allein durch diese Betrachtungen nicht wiedergegeben werden kann. Denn laut Hulse-Smith und Illes (2007) sind die meisten für eine Tatrekonstruktion wesentlichen Variablen (Tropfenvolumen, Geschwindigkeit des Blutropfens beim Auftreffen auf eine Oberfläche) am Tatort nicht bestimmbar. Auch wenn versucht werden kann, anhand der Anzahl der Ausziehungen der Tropfen Rückschlüsse auf die Dynamik eines Tatgeschehens zu bekommen, ist die quantitative Bestimmung dieser sogenannten „*spines*“ jedoch oftmals subjektiv geprägt (Hulse-Smith und Illes, 2007). Neben einer (semi-) quantitativen Bewertung der Blutstropfen ist aus empirischer Sicht eine zusätzliche morphologisch-deskriptive Betrachtungsweise der Spurenbilder für eine umfassende Tatrekonstruktion unerlässlich und erforderlich. Denn laut

Ramsthaler et al. (2015) erfordert die Verteilungsmusteranalyse auch ein Verständnis dafür, wie aus bewegten bzw. dynamischen Bewegungsabläufen statische Bilder und Muster entstehen können. Hierfür sollte sich der Analyst auf einen Katalog aus stringent definierten Standardformen und Bezeichnungen beziehen, auch wenn sich die Interpretation eines komplexen Spurenbildes nicht allein auf die Betrachtung eines einzelnen Tropfens stützen sollte.

2.4. Morphologische Systematik der Blutspurenmuster

Der Katalog der „Systematik der Blutspurenmuster“ basiert auf deskriptiven Aspekten von Blutspuren, die einer einheitlichen morphologischen Terminologie bedürfen. Die an Tatorten vorgefundenen Spurenbilder müssen somit nachvollziehbar für Dritte (Polizisten, Juristen, technische Mitarbeiter) mittels einer einheitlichen Terminologie in der Blutspurenmuster-Analytik dokumentiert werden. Durch eine einheitliche Terminologie lassen sich die Blutspurenmuster deskriptiv kategorisieren, womit eine erste vorläufige Einschätzung über die Entstehung der Spuren ermöglicht wird. Dies bedeutet, dass beispielsweise „blutige Fußabdrücke“ an einem Tatort nicht als solche zu dokumentieren, sondern vereinheitlicht als sogenannte *Kontaktspur* zu beschreiben sind. Grundsätzlich unterscheidet man drei Basiskategorien (**Tab. 1**).

Tabelle 1. Kategorisierung der Blutspuren gemäß der Nomenklatur der „Arbeitsgruppe für Blutspurenmuster-Verteilungsanalyse“ der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin (2005).

Passivspuren	Kontaktspuren	Projektionsspuren	Varia
Geronnenes Blut	Abdruckspur	Arterielle Blutung	Adhäsionsspur
Serumseparation	Wischspur	Schleuderspur	Insektenspur
Abtropfspur	Durchwischspur	Spritzspur	Spritzschatten
Ablaufspur		Expirationsspur	Konturenschatten
Blutlache		Fadenförmige	Blasenringe
Bluttränkung		Auszieher	
		Rückwärtsspur	

Diese Kategorisierung ist nicht zuletzt einer Vielzahl von praktischen Fallbeispielen geschuldet (Kettner et al., 2010) und fußt auf dem Konsens der *Arbeitsgruppe für Blutspurenmuster-Verteilungsanalyse der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin* (2005).

2.4.1. Methoden der Blutspurenmusteranalyse

Die Blutspurenmusteranalyse ist eine praktische Tätigkeit, die durch eine objektive bzw. objektivierbare Dokumentation und durch die im Vorfeld bereits beschriebene einheitliche Terminologie von Blutspuren auch noch Wochen nach Erhebung in die Tatrekonstruktion mit einbezogen werden und beweisrelevante Hinweise liefern kann. Bei einer Tatortrekonstruktion muss der jeweilige Sachverständige mehrere Faktoren in seine Überlegungen mit einbeziehen (Ramsthaler et al., 2015). Hierbei empfiehlt sich ebenfalls ein schrittweises Vorgehen, das zunächst mit einer sorgfältigen Fotodokumentation am Tatort beginnt. Ein vorher festgelegtes Schema bietet den Vorteil eines standardisierten Vorgehens (Woolson, 1995): Fotoaufnahmen sollten immer mit einem Maßstab gefertigt werden. Dies gilt sowohl für Übersichtsaufnahmen, als auch für Detailaufnahmen. Diese sollten jederzeit dem Gesamtbild zugeordnet werden können. Als Grundvoraussetzung für eine optimale Fotodokumentation ist eine ausreichende Erleuchtung des Tatortes erforderlich. Die verwendete Kamera sollte wenn möglich zur Vermeidung von Verzerrungen mit einem 50mm Objektiv ausgestattet sein. Nach der Dokumentation der Spurenbilder erfolgt der Abgleich mit den jeweiligen Obduktions- oder Verletzungsbefunden. Schlussendlich kann meist EDV-basiert eine quantitative Analyse der Spuren erfolgen und eine objektivierbare Rekonstruktion des Tatgeschehens versucht werden.

2.5. Ziele und Hypothesen

Ziel der Arbeit ist es, an Hand von typischen Tropfspurenmustern, wie sie regelmäßig bei Gewalttaten mit blutenden Verletzungen am Tatort auftreten, Erkenntnisse z.B. über die Dynamik und über bestimmte Handlungs- bzw. Bewegungsabläufe im Nachtatverhalten, d.h. beim Entfernen vom Tatort zu gewinnen und diese u.a. für eine Klassifikation der Blutspurenentstehung in drei Bewegungsgeschwindigkeiten (Gehen, Joggen und Rennen) der blutspurenverursachenden Person zu nutzen. Es wurde ferner die Frage formuliert, ob ein Zusammenhang zwischen den erzeugten Blutspurenkomplexen und individuellen Bewegungsmustern der „blutbehafteten“ Arme (Armpendelbewegungen) erkennbar wird.

Ausgehend von diesen Überlegungen ergaben sich folgende konkrete Fragestellungen und Zielsetzungen für diese Arbeit:

1. Sind bei unterschiedlichen Laufgeschwindigkeiten (Gehen, Joggen, Rennen) einer blutbehafteten und Blutropfen hinterlassenden Person unterscheidbare Blutspurenbilder zu erwarten?
2. Welche Bedeutung haben dabei morphologische und metrische Eigenschaften der einzelnen Blutropfen sowie der entstandenen Tropfspurenbilder?
3. Welchen potenziellen Einfluss nehmen neben der Geschwindigkeit unterschiedliche Armhaltungen (frei schwingender Arm und am Körper fixiert gehaltener Arm) und hierdurch veränderte Lauf- und Bewegungsmuster auf die Verteilung, Formgebung und Geometrie der Blutspurenkomplexe?
4. Lassen sich reziprok anhand zuverlässig erfassbarer morphometrischer Eigenschaften der Tropfspurenmuster zuverlässige Schätzungen zur Entstehungsgeschwindigkeit (Gehen, Joggen und Rennen) und zu Armhaltungen der blutspurenverursachenden Armseite abgeben?

3. Material und Methoden

In der vorliegenden experimentellen Studie wurden im Sommer 2014 Laufversuche mit je fünf freiwilligen Probanden unabhängigen Alters und Geschlechts durchgeführt. Für die Durchführung der Versuche wurde humanes Blut in Form einer zuvor erfolgten Eigenblutspende durch den Probanden verwendet.

3.1. Allgemeine Richtlinien der Blutspende

Die Eigenblutspende wurde in Kooperation mit der Blutbank des Universitätsklinikums Homburg, Institut für Klinische Hämostaseologie und Transfusionsmedizin (Leitung Prof. Dr. med. Eichler) und unter Aufsicht medizinischen Fachpersonals durchgeführt. Im Vorfeld der Studie wurde die experimentelle Verwendung des Blutes durch die Ethikkommission der Landesärztekammer des Saarlandes (Kenn- Nr. 173/12) mit einem positivem Votum vom 13.09.2012 bewilligt. Die allgemeinen „*Richtlinien zur Gewinnung von Blut und Blutbestandteilen und zur Anwendung von Blutprodukten (Hämotherapie)*“, gemäß der Paragraphen 12a und 18 des Transfusionsgesetzes (Bundesärztekammer, 2010) stellten hierbei die notwendigen Handlungsgrundlagen in der Gewinnung der Blutprodukte und dienten als Grundlage für die sachgerechte Durchführung der Blutentnahmen. Ein Formular mit detaillierten Informationen über den Ablauf der Blutspende, inklusive aller relevanten medizinischen Risiken und Nebenwirkungen einer Blutspende wurde jedem Probanden zur Unterschrift vorgelegt und galt jeweils als Voraussetzung für die Teilnahme an der Studie. Mit der Unterschrift wurde ebenfalls die wissenschaftliche Verwendung der Blutprodukte bewilligt. Als Voraussetzung zur Entnahme der Blutspenden musste sich jeder Proband im Vorfeld sachgemäß in der Blutbank als Spender registrieren (sogenannte Spendererfassung). Alle erhobenen Spenderdaten (Name, Vorname, Geburtsdatum, Adresse) wurden digital erfasst und unterliegen sowohl der ärztlichen Schweigepflicht, als auch den Bestimmungen des allgemeinen Datenschutzes. In Hinblick auf die jeweilige gesundheitliche Verfassung wurde vor der Blutentnahme zunächst die individuelle Spendentauglichkeit durch einen medizinischen Fachangestellten der Transfusionsmedizin des hiesigen Institutes für Hämostaseologie des Universitätsklinikums Homburg im Rahmen einer orientierenden körperlichen Untersuchung beurteilt.

Tabelle 2. Untersuchung zur Eignung als Spender gemäß der Bundesärztekammer 2010.

Kriterium	Anforderungen
Hämoglobin oder Hämatokrit (Spenderblut)	Frauen: Hb \geq 125g/l oder Hkt \geq 0,38/l Männer: Hb \geq 135g/l oder Hkt \geq 0,40/l
Alter	18-68 Jahre sowie nach individueller Entscheidung
Körpergewicht	Mindestens 50kg
Blutdruck (RR)	Systolisch: 100-180mmHg Diastolisch: unter 100mmHg
Puls	Normofrequenz (50-100/Minute)
Temperaturmessung	Keine erhöhte Temperatur
Gesamteindruck	Keine erkennbaren Krankheitszeichen
Haut an der Punktionsstelle	Frei von Läsionen

Diese ärztliche Beurteilung der Spendentauglichkeit garantierte, dass sich jeder freiwillige Spender zum Zeitpunkt der Spende in einem unbedenklichen Gesundheitszustand befand. Vor jeder Spende wurden einschlägige dauerhafte Ausschlusskriterien überprüft (**Abb. 4**):



Abbildung 3. Auflistung der Ausschlusskriterien zur Blutspende.

Als Erkrankungen wurden insbesondere solche als wichtig erachtet, bei denen die Blutspende eine Gefährdung des Spenders nach sich ziehen kann (schwere Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems, bösartige Neoplasien). Bei den Infektionskrankheiten spielen insbesondere solche eine wichtige Rolle, die durch Blutkontakt von Mensch zu Mensch übertragen werden können (HIV-1, oder HIV-2, HBV, HCV, HTLV Typ 1 und Typ 2, Protozoonosen, Syphilis, andere chronische bakterielle Erkrankungen). Zum einen konnte hierdurch der jeweilige Gesundheitsschutz des Probanden dokumentiert werden, zum anderen wurden dadurch eine risikoarme Entnahme, die sachgerechte Herstellung und Aufbereitung sowie auch die bedenkenlose wissenschaftliche Verwendung der Blutpräparate garantiert. Jeder Proband wurde ebenfalls über mögliche Nebenwirkungen einer venösen Blutentnahme, wie beispielsweise Hämatome an der Einstichstelle, mögliche Infektionsgefahren, sowie durch den relativen Blutverlust mögliche Kreislaufprobleme (Entnahme von circa 10% der vorhandenen Blutzellen), aufgeklärt. Um eine Verwechslung der Blutproben zu vermeiden, wurde im Vorfeld der Entnahme jeder Transfusionsbeutel mit „Name, Vorname und Geburtsdatum“ etikettiert.

3.2. Das Transfusionssystem

Für die Gewinnung der Vollblutkonserven wurden sogenannte *Vollblut Inlinesysteme* (*CompoSelect[®] WB, Fresenius Kabi*) verwendet. Hierbei handelt es sich um Blutbeutelssysteme mit einem integriertem, bzw. zwischengeschaltetem Leukozytenfilter, der zur nachfolgenden Aufarbeitung der Blutproben dient. Dieser spezielle Filter besteht aus einem Polyester-Vlies und einer nichtionisch beschichteten Faseroberfläche. Laut Hersteller *Fresenius Kabi[®]* kann durch eine hohe Biokompatibilität und hervorragende Benetzung des Filtermaterials eine schnelle (ca. 15 Minuten) und effiziente Leukozytendepletion erreicht werden, ohne dabei wesentliche Volumenverluste in Kauf nehmen zu müssen. Das transparente Filtergehäuse ermöglicht zudem eine direkte Kontrolle des Filtrationsvorganges (**Abb. 5**).



Abbildung 5. Das transparente Filtergehäuse erlaubt eine schnelle Filtration der Leukozyten mit einem minimalen Volumenverlust ($\varnothing < 30\text{min.}$). Diese kann bis zu 20 Stunden nach der Blutentnahme erfolgen.

Des Weiteren sichert das verwendete Blutbeutelssystem einen minimalen Volumenverlust des gefilterten Erythrozytenkonzentrates (Erythrozyten-Ausbeute $> 90\%$). Dieses System eignet sich insbesondere für die Versuche, da jeder Beutel im Vorfeld durch den Hersteller mit jeweils 70 ml eines Antikoagulanz (CPD bzw. Citrat-Phosphat- Dextrose) versehen wurde.

Die venöse Blutentnahme von insgesamt 500ml Vollblut erfolgte in Anwesenheit eines Arztes der hiesigen Transfusionsmedizin und unter dessen medizinischer Verantwortung. Hierzu wurde eine sachgerechte Venenpunktion gemäß allgemeiner Empfehlungen des Bundesgesundheitsamtes (2011) durchgeführt. Die Punktionsstelle wurde jeweils in Hinsicht auf eine einfache Durchführung der Entnahme sowie auch zur Verhinderung einer bakteriellen Kontamination des Blutprodukts gewählt. Diesbezüglich wurde im ersten Schritt zunächst entsprechend der *Liste des Verbunds für angewandte Hygiene (VAH)* eine sorgfältige lokale Hautdesinfektion mittels eines sterilisierten Tupfers durchgeführt. Die Gesamteinwirkungszeit des hierbei verwendeten Desinfektionsmittels richtete sich nach den jeweiligen Angaben des Herstellers. Gemäß den Empfehlungen des Robert Koch-Instituts (RKI) wurden entsprechende Hygienemaßnahmen eingehalten, wie die Verwendung von keimarmen Einmalhandschuhen. Nach erfolgreicher Blutspende schloss sich eine mindestens 30-minütige Ruhepause unter ärztlicher Aufsicht an. Gemäß dem Paragraphen 11 des Transfusionsgesetzes wurde bei jeder Spendenentnahme die ordnungsgemäße Protokollierung durchgeführt. Zu Anfang jeder Blutentnahme wurden jedem Spender ca. 15ml des initialen Blutvolumens von ca. 500ml entnommen. Diese Probe diente zum einen einer Verringerung einer möglichen bakteriellen Kontamination der Blutspende, zum anderen wurde die notwendige Spenderdiagnostik (nachfolgende Labordiagnostik der Blutspende in

freundlicher Kooperation mit dem Institut für Laboratoriumsmedizin der Universitätskliniken des Saarlandes) zum Ausschluss infektiöser Erkrankungen durchgeführt. Erst dann konnte die jeweilige Blutkonserve für die sichere Durchführung der wissenschaftlichen Versuche bedenkenlos freigegeben werden (**Tab. 3**).

Tabelle 3. Laboruntersuchungen vor Freigabe der Spende (Bundesärztekammer 2010).

Parameter	Anforderungen
Anti-HIV-1/-2-Antikörper	Negativ
Anti-HCV-Antikörper	Negativ
HBs-Antigen	Negativ
Anti-HBc	Negativ
HCV-Genom	Negativ
HIV-1-Genom	Negativ
Antikörper gegen Treponema pallidum	Negativ
Antikörpersuchtest	Keine nachweisbar

Die leukozytendepletierten Vollblutkonserven wurden nachfolgend ordnungsgemäß bei konstanten 4° Celsius in separaten und verschlossenen Plastikbehältern gelagert und eine Woche später für die Durchführung der Experimente verwendet.

3.3. Aufbau der Laufstrecke

Die Durchführung der Experimente erfolgte auf einer ebenen Asphaltfläche im Untergeschoss des Parkhauses des Universitätsklinikums Homburg. Dadurch konnten umweltbedingte Einflüsse (wie Wind, Regen oder Sonne) exkludiert und somit ein bezüglich der Umweltbedingungen standardisiertes Vorgehen gewährleistet werden. Die von dem jeweiligen Probanden zurückgelegte Laufstrecke betrug 10 Meter und wies eine zusätzliche An- und Auslaufstrecke von je weiteren 10 Metern auf. Als seitliche Begrenzung dieser Laufstrecke wurde ein aus Holzlatten angefertigtes Standgerüst aufgebaut. Diese Wand wurde mit einer Lage eines reißfesten Packpapiers (mit einer Papierdichte von ca. 90g/m³) bespannt (**Abb. 6**).



Abbildung 6. Übersichtsaufnahme der Laufstrecke im unteren Parkdeck Parkhauses des Universitätsklinikums Homburg. Unmittelbar neben der Laufstrecke, zwischen Meter 5 und Meter 6, wurde eine auf einem Stativ angebrachte Videokamera zur Dokumentation der Durchgänge aufgestellt.

Dieses reißfeste Papier wurde als absorbierende Unterlage für die Laufstrecke auf den Boden ausgerollt und mit stabilem Panzertape (*Tesa® Duct Tape, Farbe Grau, Reiskraft 30 N/cm*) auf dem Asphaltboden fixiert. Die Breite der Laufstrecke wurde auf 1,40 Meter festgelegt. Um Verschmutzungen durch Blutspritzer zu vermeiden, wurde die unmittelbare Umgebung großzügig mit weiteren Papierlagen ausgelegt. Die exakte Länge der Strecke wurde durch ein Maßband standardisiert erfasst, welches seitlich an die Wandkonstruktion aus Packpapier aufgeklebt wurde (**Abb. 7**).

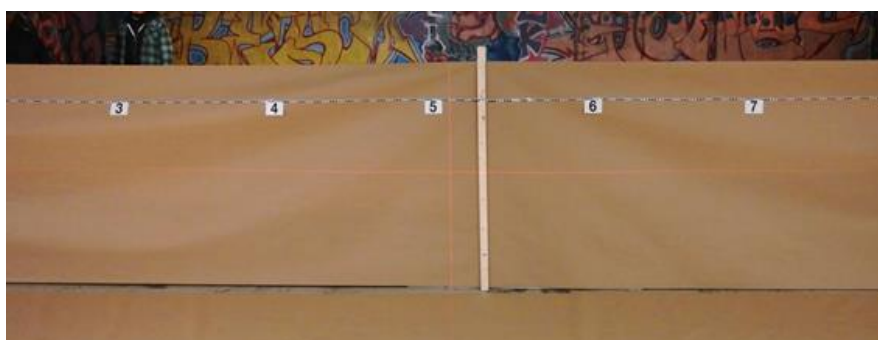


Abbildung 7. Seitlich der Laufstrecke wurde eine mit Packpapier bespannte Wandkonstruktion aufgestellt.

Gleichzeitig wurde durch handschriftliche Markierungen in Meterabständen die Distanz auf dem Laufband festgehalten (**Abb. 8**).



Abbildung 8. Ausschnitt der insgesamt 10m langen und 1,40m breiten mit reisfestem Packpapier ausgelegten Laufstrecke. Der jeweilige Streckenabschnitt wurde in Meterabschnitten markiert (Pfeile), die entstandene Blutspur sowie der Fußabdruck (Asterisk) mittels eines Maßstabes unter Verwendung eines dreibeinigen Stativs fotografiert.

Um eine zuverlässige Untersuchung der Spurenmuster aller Probanden zu ermöglichen, wurde die Laufstrecke vor jedem Durchgang mit neuem Papier ausgelegt. Zum anderen erfolgte eine Etikettierung der Laufbänder (**Abb. 9**) mit Vergabe von zwei Nummern (1. Nummer: Proband 2. Nummer: jeweiliger Durchgang).

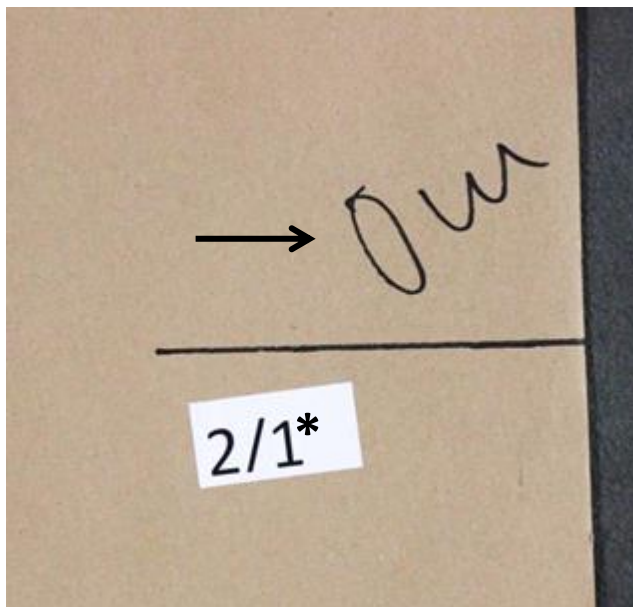


Abbildung 9. Etikettierung (Asterisk) jedes Laufbandes am Anfang der Strecke (Meter 0, Pfeil) mittels einer Probanden-ID (Proband / Durchgang).

3.4. Ausstattung der Probanden

Alle Probanden erhielten eine spezielle Schutzkleidung (handelsübliche Einmalschutzanzüge der Marke Tyvek®) sowie vom Institut für Rechtsmedizin bereitgestellte Trainingschuhe. Als weitere Infektionsschutzmaßnahme wurde jeder Proband mit einem Mundschutz (Braun® Visma tie-on), einer Schutzbrille aus Plexiglas (Uvex®) sowie Nitrilhandschuhen zum Einmalgebrauch (Meditrade Nitril® 3000 Größe S-XL) ausgestattet. Der rechte Arm wurde mit einem sogenannten 90cm langen Schulterhandschuh (veterinärmedizinischer Einweghandschuh mit Schulterschutz, 90cm lang, 5-Fingerausführung der Firma Krutex®) versehen. Das verwendete Einmalinfusionsbesteck (Intrafix SafeSet, Braun®) inklusive einer maximalen Schlauchlänge von 180cm wurde zirkulär um den Arm mit Fixierpflastern (Leukosilk® 1,25cm, BSN Medical) befestigt und auf Höhe des Handrückens mittig ausgeleitet (Abb. 10 A, B). Dieses Transfusionsbesteck wurde nach Einmalgebrauch sachgemäß in bereitgestellten Müllbeuteln entsorgt.



Abbildung 10 A, B. Die Blutkonserve wurde mittels einer Rucksackkonstruktion angebracht (A) und über eine Transfusionsleitung über den rechten Arm (Pfeil) am rechten Handrücken (Asterisk) ausgeleitet. Die Tropfmenge wurde über die am Transfusions Schlauch angebrachte Rollklemme (gestrichelter Pfeil) reguliert (B).

Am Rücken wurde über eine Rucksackkonstruktion eine Beutelmanschette angebracht, die die jeweils unmittelbar vor der Durchführung der Laufexperimente in einem Wasserbad auf Körpertemperatur (circa 37°Celsius) erwärmte Blutkonserve des Probanden enthielt (**Abb. 10 A**). Durch einen manuell bedienbaren Blasebalg an der Beutelmanschette wurde diese unmittelbar vor jedem Durchlauf auf circa 100mmHg aufgepumpt. Laut Hersteller (*Braun*[®]) ist die Tropfengröße so ausgelegt, dass 20 Tropfen 1ml ergeben. Die Rollklemme zur Regulierung der Tropfgeschwindigkeit wurde vollständig aufgedreht (**Abb. 10 B**). Um einen etwaigen Zusammenhang zwischen Schrittfolge und entstandenem Blutspurenmuster untersuchen zu können, wurden die Schuhsohlen beidseits unmittelbar vor Durchführung mit handelsüblicher schwarzer Stempelfarbe (*Pelikan*[®] *Tinte schwarz*) bestrichen, sodass zusätzlich zu den intentionierten Tropfspuren aus Blut ein Fußspurenabdruckmuster entstand.

3.5. Versuchsablauf

Jeder Proband musste mit drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Gehen, Joggen, Rennen) die Strecke von 10 Metern zurücklegen. Bei jeder Geschwindigkeit wurden jeweils zwei unterschiedliche Armhaltungen (frei schwingender Arm und am Körper fixiert gehaltener Arm) ausgeführt, sodass alle 5 Versuchsprobanden insgesamt 6 Durchläufe ausführen mussten. Die jeweilige Geschwindigkeit des Probanden wurde über die Messung der Zeit pro zurückgelegte Strecke erfasst und in Meter pro Sekunde angegeben (**Tab. 4**).

Tabelle 4. Übersicht der Laufdurchgänge inklusive der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit (m/s). Insgesamt wurden je 6 Läufe durchgeführt, davon je 3 Durchläufe mit „schwingendem Arm“ und „festgehaltenem Arm“.

Lauf	Bewegungsgeschwindigkeit	Armpendelbewegung
1	Gehen (1-3m/s)	Schwingender Arm
2	Gehen (1-3m/s)	Festgehaltener Arm
3	Joggen (3-4m/s)	Schwingender Arm
4	Joggen (3-4m/s)	Festgehaltener Arm
5	Rennen (5-6m/s)	Schwingender Arm
6	Rennen (5-6m/s)	Festgehaltener Arm

Nach jedem Durchgang erfolgte die fotografische Dokumentation in Meterschritten durch die Untersucherin. Es wurden pro Versuch 10 Übersichtsaufnahmen, jeweils in Meterschritten mit Maßstab angefertigt. Für alle Fotografien wurde eine SL-Kamera CANON (600 D, Objektiv 18-55mm; f/3,5) verwendet. Als Objektabstand (Objektiv-Boden) wurde mittels Stativ 120cm gewählt, um einen 1m umfassenden Bildausschnitt zu gewähren. Ergänzend wurden Detailaufnahmen von Einzelspuren der Tropfspurenkomplexe angefertigt.

3.6. Methodik der Blutspurenanalyse

Die systematische Auswertung der experimentell erzeugten Blutspuren erfolgte in drei Schritten. Als erstes wurden die Blutspurenmuster an Hand ihrer geometrischen Verteilung, Ausdehnung und Formgebung deskriptiv beschrieben und kategorisiert. Der zweite Schritt beinhaltete die Vermessung und quantitative Auswertung der Blutspurenmuster unter Einbeziehung von individualtypischen Merkmalen (Schrittlänge, Bewegungsausmaß der Armschwingung). Nach vorheriger Prüfung bestehender statistischer Zusammenhänge zwischen den erhobenen Parametern unter Berücksichtigung der eingangs formulierten Zielsetzungen und Hypothesen wurde abschließend in einem Diskriminanzmodell zu der Frage getestet, ob anhand stetiger Merkmalsausprägungen der morphologisch abgrenzbaren Tropfspurenkomplexe eine Unterscheidung der drei Bewegungsgeschwindigkeiten möglich ist (**Abb. 11**).

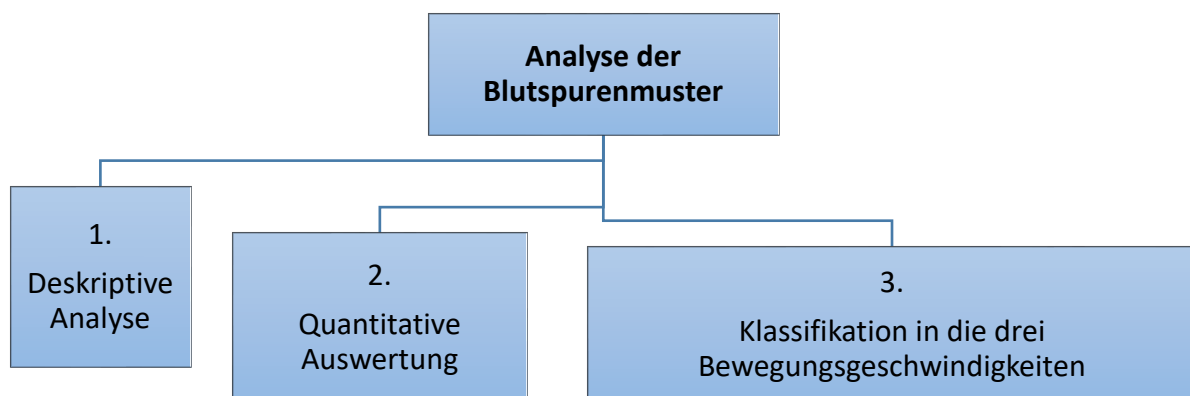


Abbildung 11. Methodik der Blutspurenanalyse.

3.7. Messparameter und Messmethode

Bei den Laufversuchen wurden nachfolgende Parameter und Merkmalsausprägungen erfasst (**Tab. 5**).

Tabelle 5. Liste der erhobenen Variablen.

Proband	Blutspuren
Schrittlänge (cm)	Länge des Blutspurenbildes (cm)
Anzahl der Schritte	Breite des Blutspurenbildes (cm)
Länge der Armschwingung (cm)	Anzahl der Tropf-in-Tropf Spuren
Bewegungsgeschwindigkeit (m/s)	Anzahl der Tropfen
Armlänge (cm)	Durchmesser der Tropfspuren (mm)

Die Erfassung der Blutspuren und der Schuhabdruckspuren erfolgte fototechnisch unmittelbar nach jedem Laufversuch. Unter Zuhilfenahme eines dreibeinigen Stativs wurde ein konstanter Objektabstand von 120cm gewährleistet. Aufgrund der beschränkten Lichtverhältnisse vor Ort wurde ein automatischer Blitz verwendet. Zusätzlich erfolgte die seitliche Videodokumentation (AF, Auflösung 1.280 × 720, 50B/s) des jeweiligen Probanden zur Ermittlung der Armlänge sowie auch der Länge der Armschwingung (**Abb. 12 A, B**).

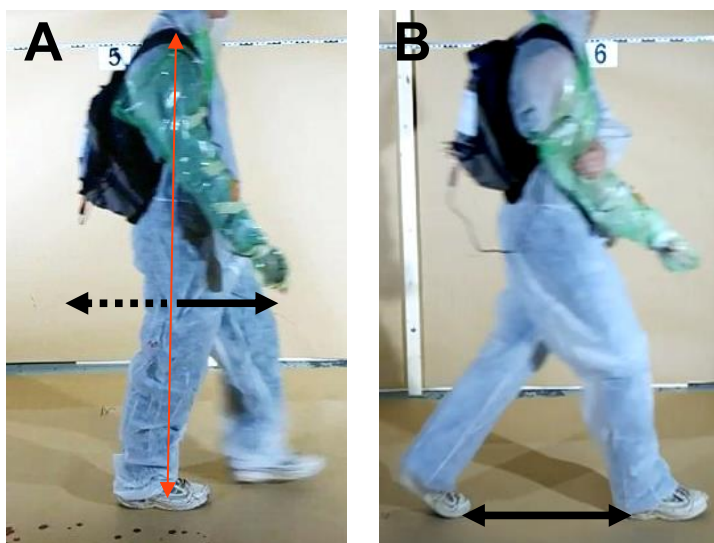


Abbildung 12 A, B. Seitliche Videodokumentation der Probanden zur Messung der Länge der Armschwingung (Pfeil, **A**) und Schrittlänge (Pfeil, **B**).

Die Vermessung der in Tabelle 5 gelisteten Messstrecken und der Parameter der einzelnen Blutspuren sowie die anschließende Auswertung der erhobenen metrischen Daten erfolgte rechnergestützt anhand der angefertigten digitalen Fotoaufnahmen (*jpeg*-Format). (**Abb. 13 A, B**).

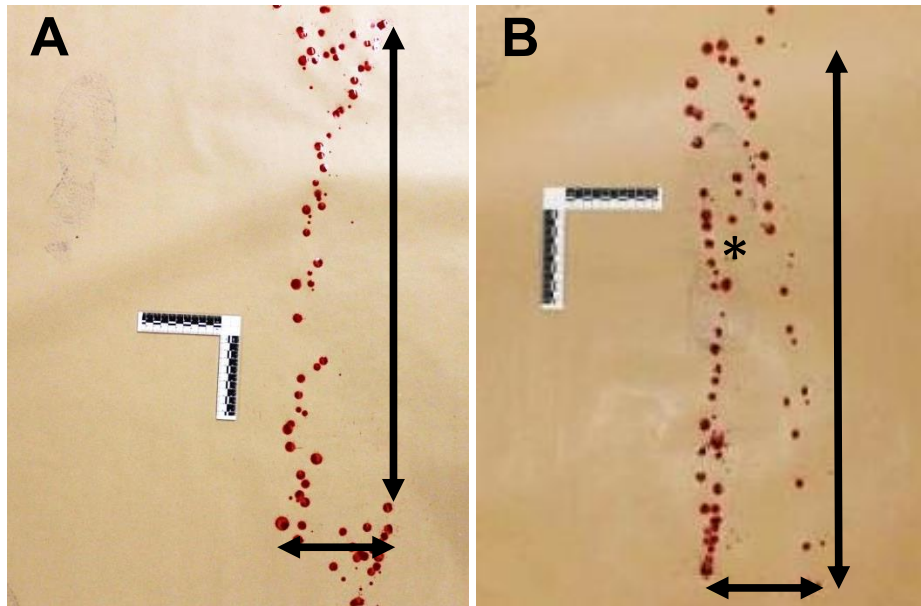


Abbildung 13 A, B. Fotodokumentation der entstandenen Fußspuren (Asterisk) mit den korrespondierenden Verteilungsmustern der Blutspuren zur Messung der Länge (senkrechte Pfeile) sowie Breite (horizontale Pfeile) der Blutspuren.

Exemplarisch zeigt die Abbildung 14 A, B eine Übersicht der Blutspuren eines Durchlaufes über die Gesamtlänge von 10 Metern, jeweils mit frei schwingendem Arm (**Abb. 14 A**) und am Körper fixiert gehaltenem Arm (**Abb. 14 B**).

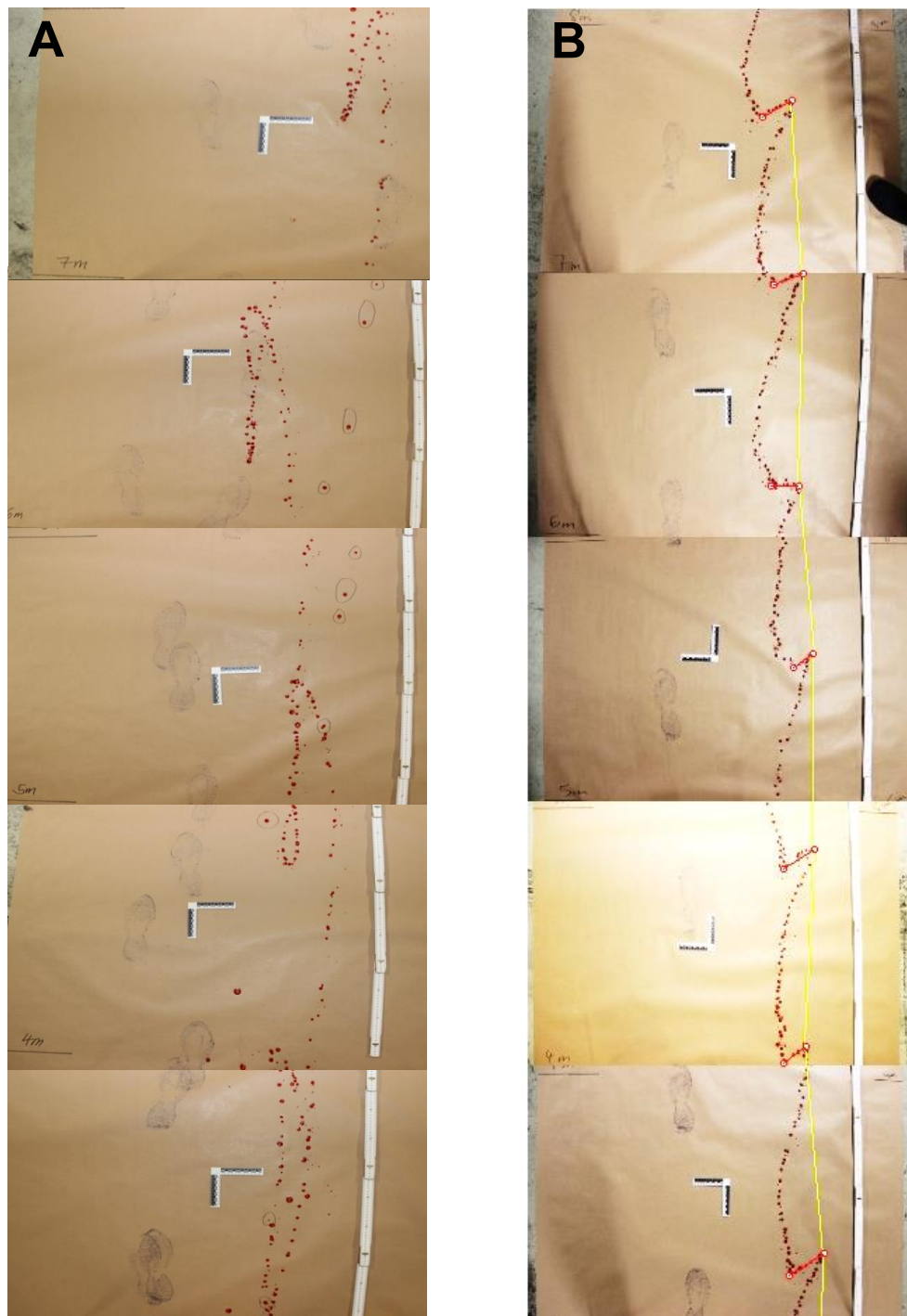


Abbildung 14 A, B: Darstellung der Blutspuren generiert bei frei schwingendem Arm (A) und am Körper fixiert gehaltenem Arm (B) über die gesamte Laufstrecke.

Dabei wurde die Bildanalysesoftware *Digimizer*[®] (Version 4.5.2, © 2005-2015 MedCalc Software bvba, Belgium) genutzt, um nach Kalibrierung mithilfe des abgebildeten Maßstabes, die Distanzen und Messstrecken der ausgewählten Parameter wie folgt zu bestimmen:

a) Vermessung der Schrittlänge:

Die Schrittlänge von jedem Probanden [cm] wurde an Hand der Fußabdrücke jeweils gleichermaßen von Fußspitze zu Fußspitze gemessen. Die in *Digimizer* in einer Datenbank angelegten Messwerte wurden anschließend in Tabellen übertragen (Microsoft Excel 2010[®]) (**Abb.15 A, B**).

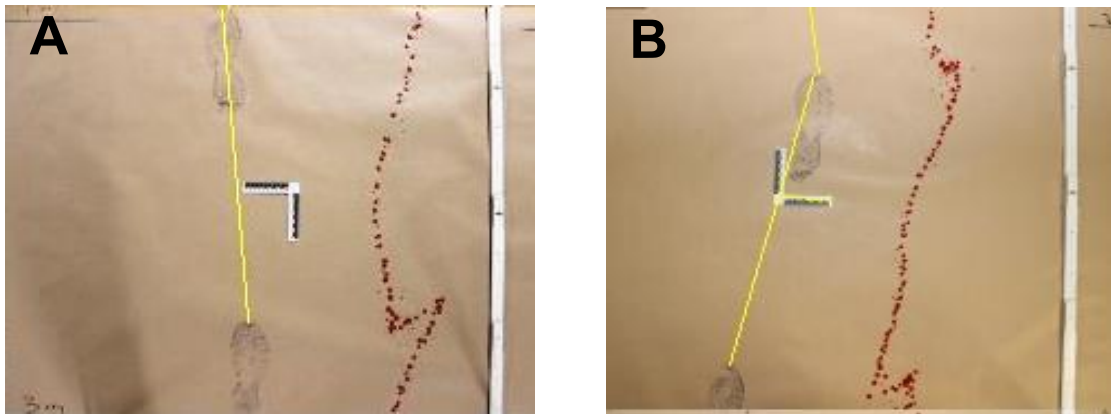


Abbildung 15 A, B. Exemplarische Darstellung der digitalen Vermessung (gelbe Messlinie) der Schrittlänge mittels *Digimizer*[®] jeweils von Fußspitze zu Fußspitze bei Proband 1 (**A**) und Proband 2 (**B**).

b) Vermessung der Breite und Länge der Blutspur:

Die Länge (gelbe Messlinie) sowie auch die Breite (rote Messlinie) der resultierenden bogen- und wellenförmigen Blutspurenmuster wurden durch Bestimmung der jeweils maximalen Ausdehnung vermessen (**Abb. 16 A, B**).

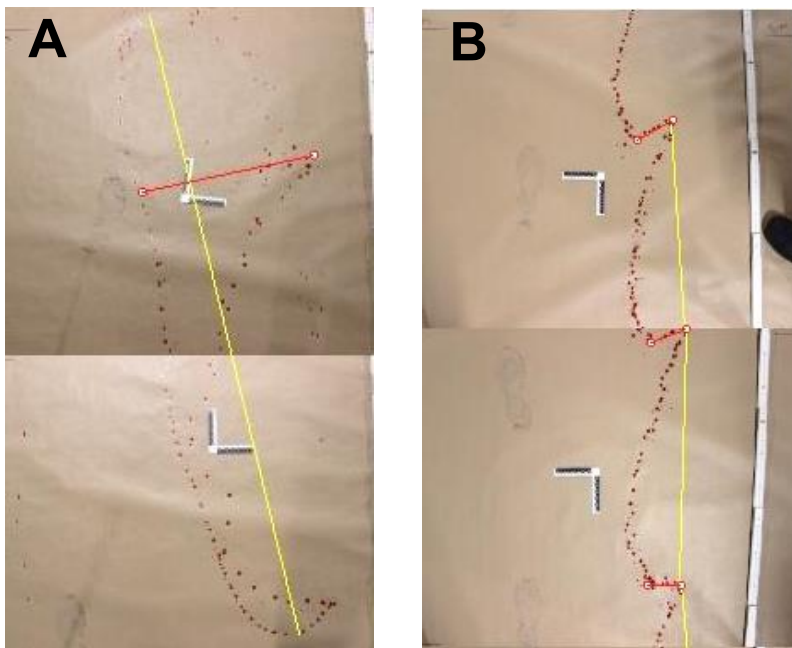


Abbildung 16 A, B. Exemplarische Darstellung der digitalen Vermessung der Spurenlänge (gelbe Messlinie) und der Spurenbreite (rote Messlinie) mittels Digimizer®.

c) Vermessung der Armschwungung:

An Hand der archivierten Videodokumente konnte die Armschwungung vermessen werden (**Abb. 17 A, B**), indem die Bildsequenzen mit der jeweils maximalen Auslenkung nach vorne (Vorschwung) und nach hinten (Rückschwung) selektiv ausgewertet wurden.

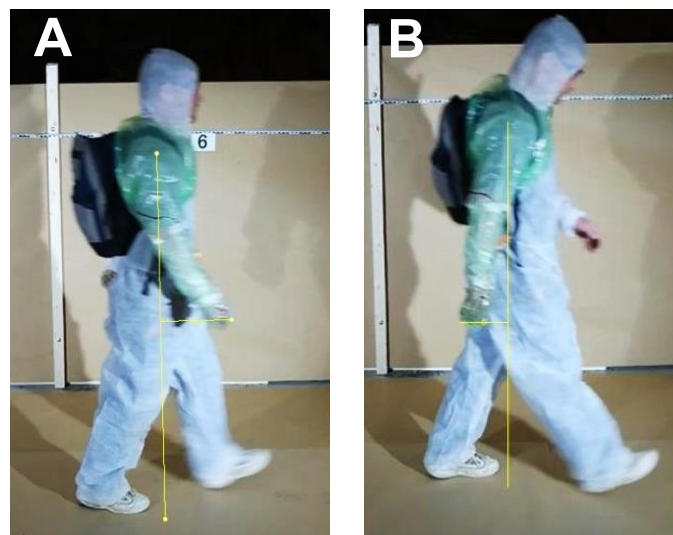


Abbildung 17 A, B. Exemplarische Darstellung der Messung Armschwungung (gelbe Messlinie) mittels Digimizer®, wobei diese sich aus der Summe aus dem Vorschwung (A) und dem Rückschwung (B) ergibt.

Im Anschluss erfolgte bei allen Durchgängen eine Zählung und Vermessung der sogenannten *Tropf-in-Tropf Muster* über die gesamte Laufstrecke von 10 Metern. Dabei wurde als einzelnes Muster eine dichte, eng lokalisierte und einander überlagernde Ansammlung von Blutropfen gezählt, die zusätzlich, als Ausdruck des „Ineinandertropfens“, begleitende, kleine Sekundärspritzer, sogenannte Satellitenspuren aufwiesen.

3.8. Statistische Auswertung

Neben der deskriptiv statistischen Erfassung und Auswertung der Blutspurenmuster erfolgte die explorative, statistische Auswertung der gemessenen Datensätze mittels SPSS (IBM® SPSS® Statistics Version 22). Für alle in dieser Arbeit verwendeten statistischen Verfahren wurde die größte Irrtumswahrscheinlichkeit α (Signifikanzniveau) vorab auf 0,05 festgelegt.

In einem ersten Schritt wurden die metrischen Eigenschaften der Blutspuren als Einzelspuren und als Spurenkomplexe (Muster) erfasst und auf statistische Gruppenunterschiede hin getestet (ANOVA, t-student Test nach Welch), (Armitage et al., 2002). In den Fällen, bei denen die Voraussetzungen der Normalverteilung für einen t-Test nicht erfüllt waren, kam als Nachweisverfahren möglicher Gruppenunterschiede (sogenannte Tendenzen) der Mann-Whitney-U-Test zum Einsatz. Ferner wurden mittels Korrelationsanalyse nach *Pearson* und durch die Berechnung des sogenannten Bestimmtheitsmaßes R^2 die Variablen auf mögliche lineare Zusammenhänge hin getestet. Als primäres, strukturprüfendes Verfahren wurde die sogenannte kanonische Diskriminanzanalyse eingesetzt. Mittels der Güte bzw. der Trennkraft der Diskriminanzfunktion (D_f), die Unterschiedlichkeiten der Gruppen widerspiegelt, wurde ein Klassifikationsversuch nach *Fisher* mit Schätzung der tatsächlichen Gruppenzugehörigkeit vorgenommen. Geprüft wurde die Frage, ob anhand der metrisch erfassten Länge und Weite der Blutspurenmuster eine Einordnung der Bewegungsgeschwindigkeit des Probanden in eine der drei Klassen (Gehen, Joggen oder Rennen) gelingt. Zur Prüfung der Diskriminanzstärke wurde das Gütemaß *Wilks' Lambda* verwendet. Die praktische Vorgehensweise der hier angewandten Diskriminanzanalyse entsprach einem kombinierten Vorgehen. Hier wurden die beiden Merkmalsvariablen gleichzeitig in die Diskriminanzfunktion eingebunden. Unter Annahme ausgeglichener a-Priori-Wahrscheinlichkeiten wurden die Ergebnisse in Klassifikationstabellen zusammengefasst und eine Diskriminanzfunktion (D_{f1}) in folgender Form entwickelt:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2$$

Y = Diskriminanzfunktion

b_0 = Konstante der Diskriminanzfunktion Df1

b_1 = kanonischer DF-Koeffizient der ersten Messvariable x_1

b_2 = kanonischer DF-Koeffizient der zweiten Messvariable x_2

Als Trennwert (T) wurde der Mittelwert der Gruppenzentroide verwendet.

4. Ergebnisse

Die deskriptiv morphologische und anschließend statistische Auswertung der vorliegenden Untersuchungen zur Abhängigkeit experimentell generierter Tropfspurenmuster von verschiedenen Laufgeschwindigkeiten (Gehen, Joggen und Rennen) und von bewegungsassoziierten Armpendelbewegungen (frei schwingender Arm und am Körper fixiert gehaltener Arm) umfasste von insgesamt fünf Probanden erzeugte Blutspurenmuster, die auf eine Gesamtstrecke von 300 Metern entstanden sind. Bei den 30 durchgeführten Laufversuchen je 10 Meter Einzelaufstrecke wurden insgesamt 2,5 Liter leukozytendeplizierte Blutkonserven verwendet. Nach jedem absolviertem Durchlauf schloss sich eine Fotodokumentation in 1-Meter-Schritten an, sodass eine Gesamtzahl von 300 Bildern digital erfasst und diese im Anschluss der Versuche sowohl beschreibend, als auch quantitativ ausgewertet wurden. Hierbei zeigten sich bereits bei erster Inspektion der Form nach gut voneinander unterscheidbare und charakteristische, aus Tropfspurengruppen gebildete Spurenbilder, die erkennbar durch die Armpendelbewegungen und durch die unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten geprägt wurden.

Morphologisch konnten insgesamt 180 untereinander abgrenzbare Blutspurenmuster gezählt werden, die aufgrund ihrer Formbildung in schleifenförmige Blutspurenbilder („*loops*“) und in wellenförmige Blutspurenbilder („*waves*“) unterteilt werden konnten. Diese beiden einfach voneinander unterscheidbaren Spurenbilder wurden durch entsprechend angeordnete Tropfspurenpfade und Tropf-in-Tropfmuster gebildet. Von allen Spurenbildern ließen sich 129 (72% der Fälle) als schleifenförmige Blutspurenmuster („*loops*“) beschreiben, während 51 Muster (28% der Fälle) als wellenförmige Spurenbilder („*waves*“) beobachtbar waren. Dabei zeigte sich, dass letztere ausschließlich bei gehender Bewegungsgeschwindigkeit mit am Körper fixiert gehaltenem Arm entstanden sind. Aus der Verteilung und Anzahl der Muster ließ sich schlussfolgern, dass die jeweilige „*loop*“ bzw. „*wave*“ Entstehung synchron zu einer Schrittabfolge erfolgte. Insbesondere bei langsamen Geschwindigkeiten konnten zusätzlich *Tropf-in-Tropf* Spurenbilder detektiert werden. Von den insgesamt 312 als *Tropf-in-Tropf* Spuren definierten Spurengruppen konnten 160 (51% der Fälle) Bewegungsabläufen mit einem „frei schwingendem Arm“ zugeordnet werden. Als *Tropf-in-Tropf* Spurengruppen wurden dabei solche Spurenbilder klassifiziert, die aus einer überlagerten Spurengruppe von mindestens zwei ineinander getropften Einzelspuren entstanden sind und sogenannte *Satellitenspuren* hervorgerufen haben (**Abb. 18**).

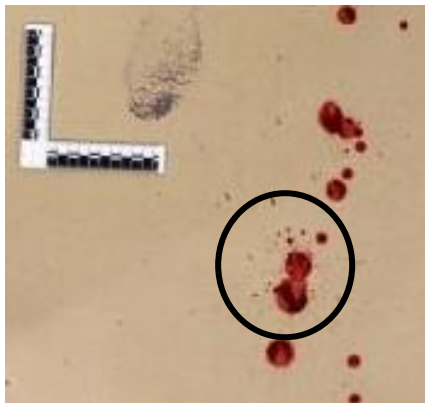
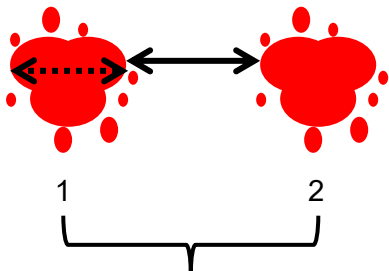
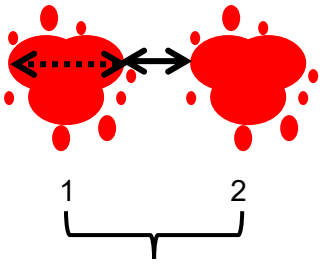


Abbildung 18. Tropf-in-Tropf-muster, charakterisiert durch ein Ineinandertropfen von mindestens 2 Blutropfen unter Entstehung von typischen Satellitenspuren in der Umgebung des Spurenkomplexes (schwarzer Kreis).

Wie in der Tabelle 6 schematisch dargestellt, wurden jeweils solche *Tropf-in-Tropf* Spurenbilder getrennt gezählt, die in einem Abstand von mehr als die Hälfte des maximalen Durchmessers des betreffenden Spurenkomplexes entfernt lagen (**Tab. 6**).

Tabelle 6. Schematische Darstellung zur Quantifizierung der Tropf-in-Tropf Spurenbilder.

Tropf-in-Tropf-Spurenbilder	Kriterien zur Quantifizierung der Tropf-in-Tropf-Spurenbilder
 <p>Zwei Tropf-in-Tropf Spurenbilder</p>	<p>Der Abstand zwischen den Spurenbildern 1 und 2 (<i>Doppelpfeil</i>) beträgt mehr als die Hälfte des maximalen Durchmessers des 1. Spurenbildes (<i>gestrichelter Doppelpfeil</i>).</p>
 <p>Einzelnes Tropf-in-Tropf Spurenbild</p>	<p>Der maximale Abstand (<i>Doppelpfeil</i>) zwischen den Spurenbildern 1 und 2 beträgt weniger als die Hälfte des maximalen Durchmessers des 1. Spurenkomplexes (<i>gestrichelter Doppelpfeil</i>).</p>

Betrachtet man sich die durchschnittliche Größe der entstandenen einzelnen Blutropfen, so ließ sich zwischen den bewegungsassoziierten Armpendelbewegungen kein statistisch signifikanter Unterschiede zeigen ($p = 0,106$; **Tab. 7**).

Tabelle 7. Durchmesser der Blutstropfen ($n = 349$) in cm jeweils zwischen Meter 5 und Meter 6 gemessen (Standardabweichung = SD).

Armpendelbewegung	Bewegung	n	Mittelwert	Median	SD	Min/Max
Schwingerer Arm	Gehen	74	0,8	0,7	0,3	0,3/2,0
	Joggen	64	0,8	0,8	0,3	0,1/1,6
	Rennen	62	0,5	0,5	0,1	0,1/1,0
Festgehaltener Arm	Gehen	70	0,8	0,7	0,3	0,3/1,8
	Joggen	50	0,7	0,7	0,2	0,3/1,3
	Rennen	29	0,6	0,5	0,3	0,3/1,4

Vergleicht man nunmehr innerhalb der beiden Gruppen „schwingerer Arm“ und „festgehaltener Arm“ jeweils die mittleren Tropfendurchmesser der drei Geschwindigkeitsklassen, so erhält man bei schwingendem Arm hochsignifikante Unterschiede zwischen „Joggen“ und „Rennen“ ($t = 5,8$; $p < 0,0001$) und zwischen „Gehen“ und „Rennen“ ($t = 7,0$; $p < 0,0001$). Bei fixiertem Arm ließen sich signifikante Differenzen, die mittlere Tropfengröße betreffend nur zwischen „Gehen“ und „Rennen“ nachweisen ($t = 2,7$; $p = 0,008$) (**Abb. 19**).

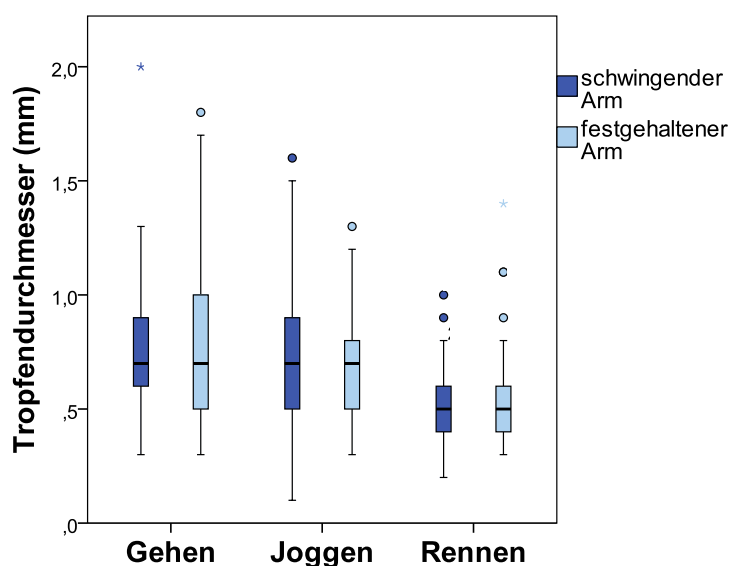


Abbildung 19. Boxplots über die Verteilung der Tropfendurchmesser ($n = 349$) in Abhängigkeit von der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit (Gehen, Joggen, Rennen) und der Armpendelbewegung (schwingerer Arm und festgehaltener Arm).

4.1. Morphologisch-deskriptive Analyse der Blutspurenmuster

Betrachtet man sich zunächst die geometrische Verteilung der experimentell erzeugten Blutspurenmuster unter Berücksichtigung der drei unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten (Gehen, Joggen, Rennen), so wird man an Hand der charakteristischen Blutspurenmuster bereits auf den ersten Blick Unterschiede in Form und Verteilung der Muster feststellen.

4.1.2. Bewegungsgeschwindigkeit

Vor der weitergehenden Analyse der zu unterscheidenden Blutspurenpfade wurde eine Erfassung der Geschwindigkeiten durch Messung der Wegstrecke (Meter in Sekunden) in Abhängigkeit der drei Bewegungsarten (**a** = Gehen, **b** = Joggen, **c** = Rennen) sowie der bewegungsassoziierten Armpendelbewegungen (schwingender und festgehaltener Arm) durchgeführt. Hierbei ergaben sich überlappungsfreie Unterschiede in den gemessenen Geschwindigkeiten (**a** = 1,3m/s; **b** = 2,2-2,5m/s; **c** = 4,0-4,2m/s; **Abb. 20**).

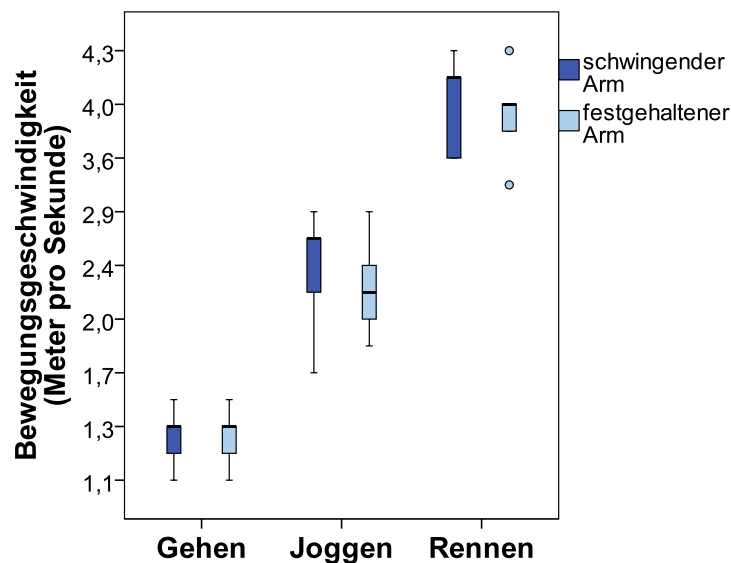


Abbildung 20. Bewegungsgeschwindigkeit (Meter pro Sekunde) der drei Geschwindigkeitsklassen (Gehen, Joggen, Rennen) in Abhängigkeit der durchgeführten Armpendelbewegungen (schwingender Arm versus festgehaltener Arm).

4.1.3. Blutspurenmuster bei frei schwingendem Arm

Bei den Bodenspuren, die bei gehender Geschwindigkeit mit durchschnittlich 1,3m/s und mit frei schwingendem Arm generiert wurden, ließen sich bei allen Probanden ähnlich geformte Spurbilder erkennen. Sie lassen sich auf Grund ihrer annähernd bogen- bis schleifenförmigen Form als „loops“ (englisch für Schleifen) beschreiben (**Abb. 21 A-D**).

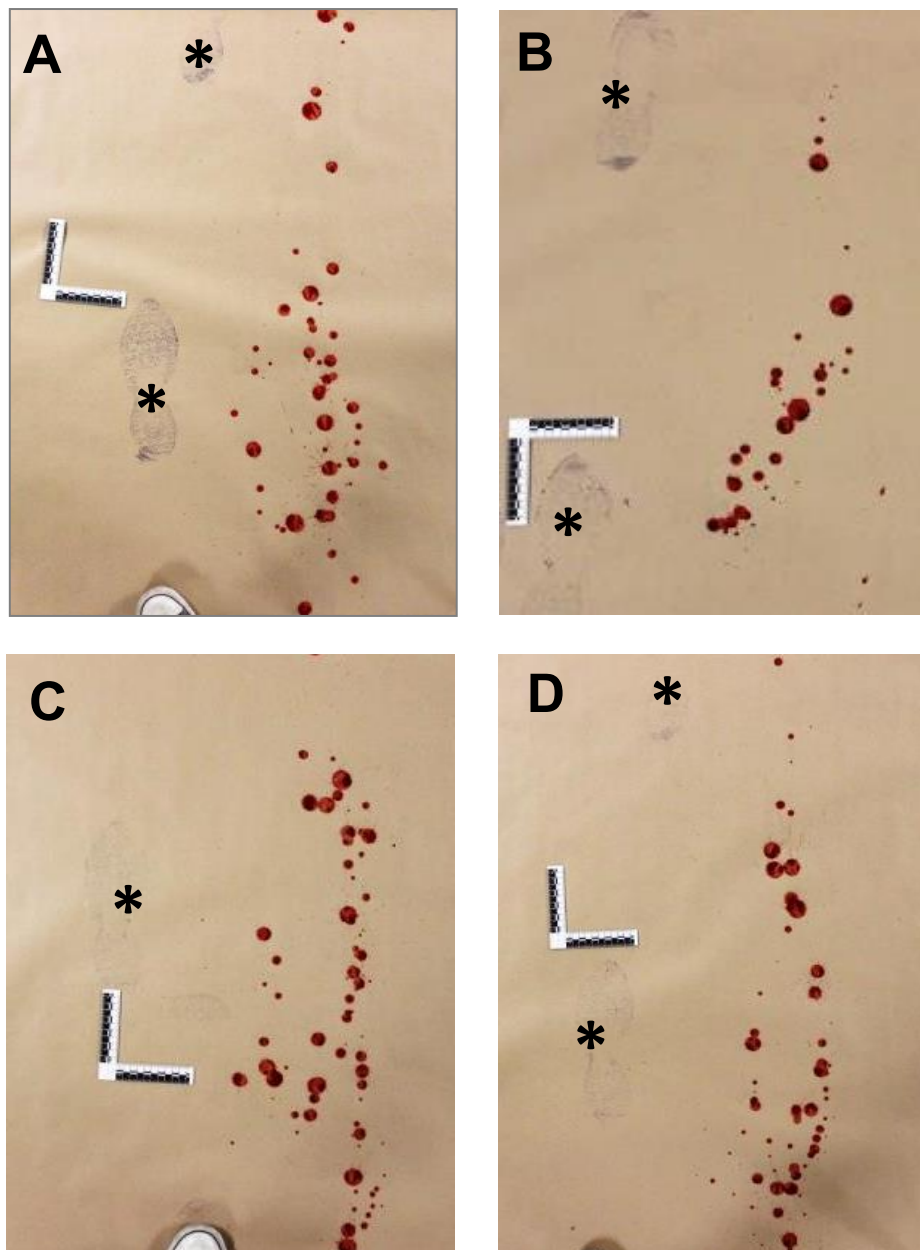


Abbildung 21 A-D. Blutspurenbilder bei langsamer Geschwindigkeit (Gehen) mit schwingendem Arm. Hierbei entstehen charakteristische Spurenbilder, die als „loops“ zu bezeichnen sind. Die Länge und Breite dieser „loops“ sind in Abhängigkeit des jeweiligen Schrittmusters (Asterisken) bei unterschiedlichen Probanden (A-D) abgebildet.

Bei näherer Betrachtung der „loops“ fällt auf, dass die einzelnen Blutstropfen unabhängig der Bewegungsart annähernd kreisrund bleiben und nur beim Rennen eine beginnend ovale Form annehmen. Beim Gehen waren zusätzlich einzelne *Tropf-in-Tropf-* Muster abgrenzbar. Diese sind sowohl an den Polen, als auch im Zentrum der „loops“ sichtbar (**Abb. 22**).

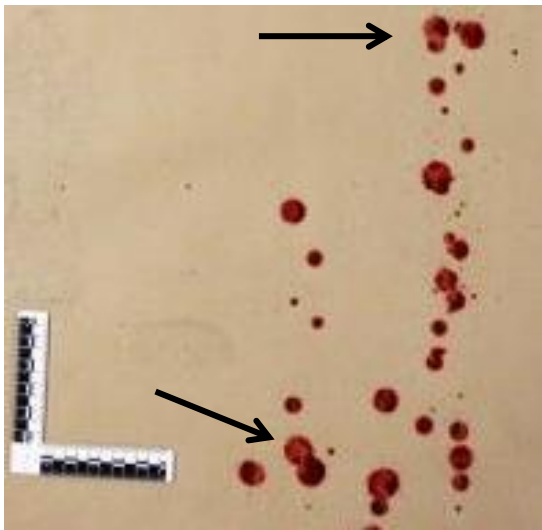


Abbildung 22. Man erkennt sowohl an den Polen der „loops“, als auch im Zentrum sogenannte Tropf-in-Tropf Muster (Pfeile).

Bei schnelleren Geschwindigkeiten (Joggen und Rennen) erkennt man „loops“, die sich insbesondere in Hinsicht ihrer Länge und Breite verändern. Dabei nehmen nicht nur Breite und Länge der „loops“ zu, sondern auch der schleifenförmige Charakter der Spuren (**Abb. 23 A-D**).

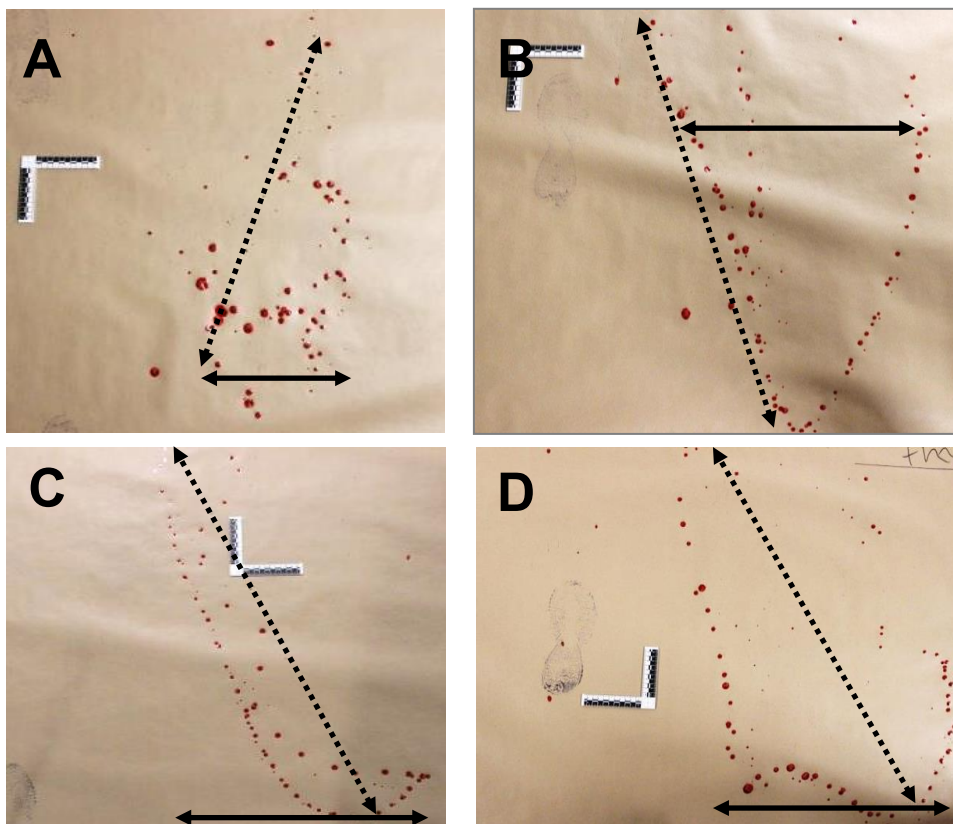


Abbildung 23 A-D. In A, B sind die Spurenbilder bei mittlerer Geschwindigkeit (Joggen) mit schwingendem Arm dargestellt. Bei Betrachtung der Spurenbilder bei schneller Geschwindigkeit (Rennen) sieht man, dass die „loops“ in ihrer Breite (Pfeile) und Länge (gestrichelte Pfeile) zunehmen (C, D).

Unter Einbeziehung der Profilabdrücke des jeweiligen Probanden ist zudem zu beobachten, dass die Schleifenbildung zum individuellen Schrittmuster korrespondiert. Die Schleifenbildung erfolgt jeweils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schritten (**Abb. 24 A-D**).

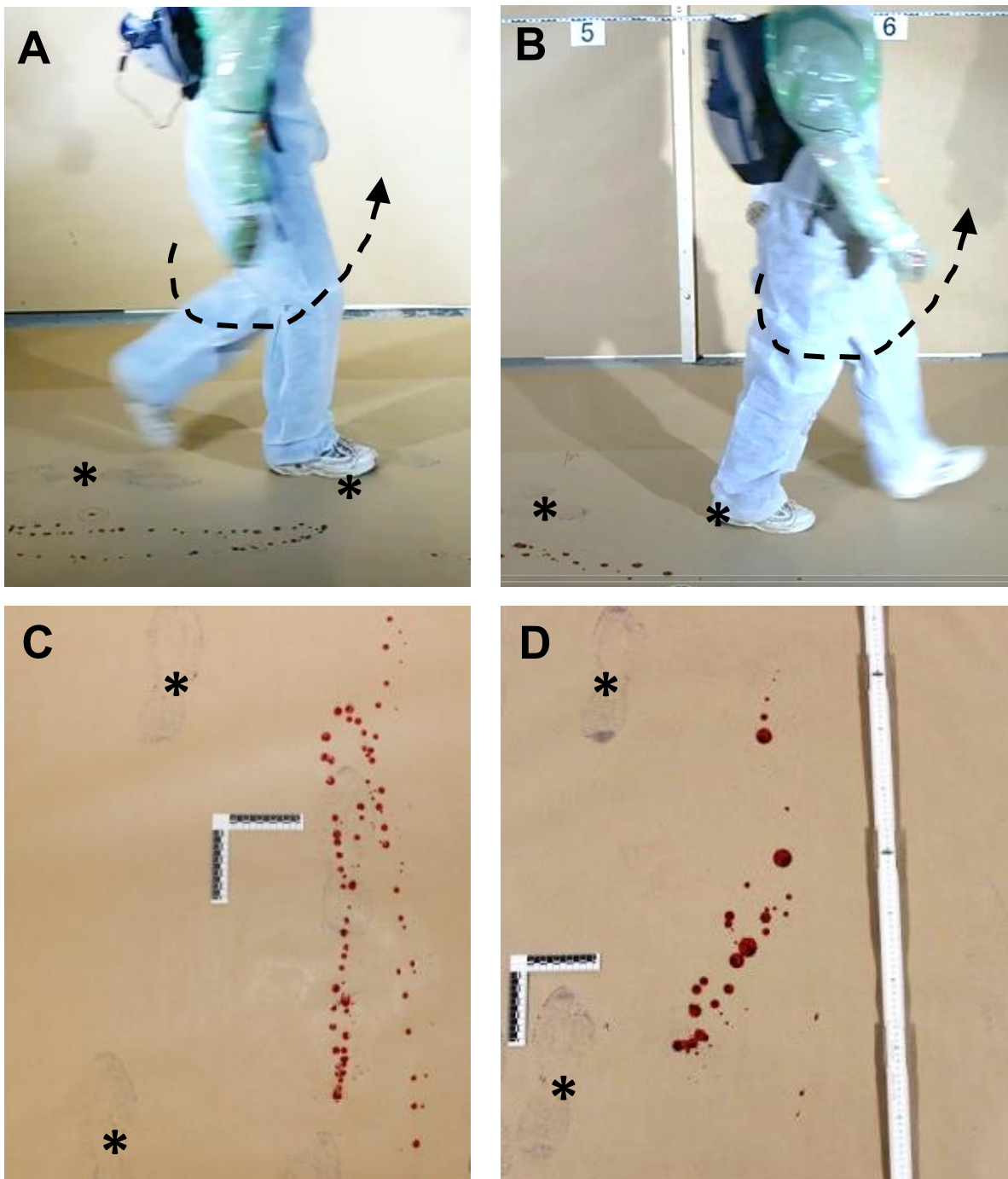


Abbildung 24 A-D. Übersichtsaufnahme einer Schrittfolge mit schwingendem Arm (gebogener Pfeil, **A, B**) sowie die die korrespondierende Bodenspur (**C, D**) in Abhängigkeit einer Schrittfolge (Asterisken).

Bei schnelleren Geschwindigkeiten (Rennen) bleibt das Verhältnis zwischen einer Schrittfolge und einer Schleifenbildung augenscheinlich konstant (**Abb. 25 A-B**).

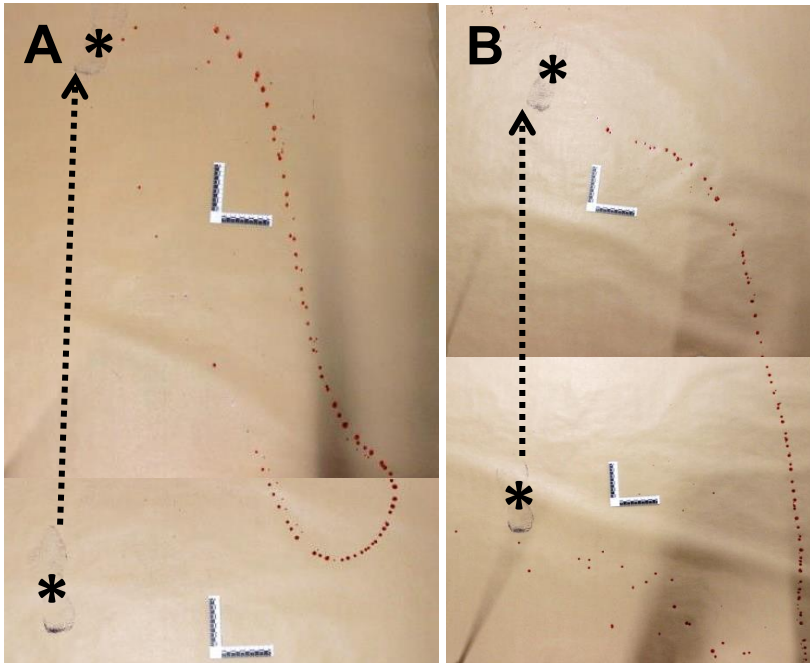


Abbildung 25 A, B. Schleifenbildung in Abhängigkeit der Schrittfolge (Asterisk) bei schneller Bewegungsgeschwindigkeit (Rennen) mit frei schwingendem Arm. Man erkennt, dass die Schleifen jeweils zwischen einer Schrittfolge gebildet werden.

4.1.4. Blutspurenmuster bei am Körper fixiert gehaltenem Arm

Bei Blutspurenmustern, entstanden durch Bewegungen mit einem am Körper festgehaltenem Arm, waren bei gehender Schrittgeschwindigkeit keine „loops“, sondern vermehrt wellenartige Spurenbilder („waves“) zu identifizieren. Die Entstehung der „waves“ erfolgt analog zu den Schleifenmustern wiederum synchron zu zwei aufeinanderfolgenden Schritten des jeweiligen Probanden (**Abb. 26 A, B**).

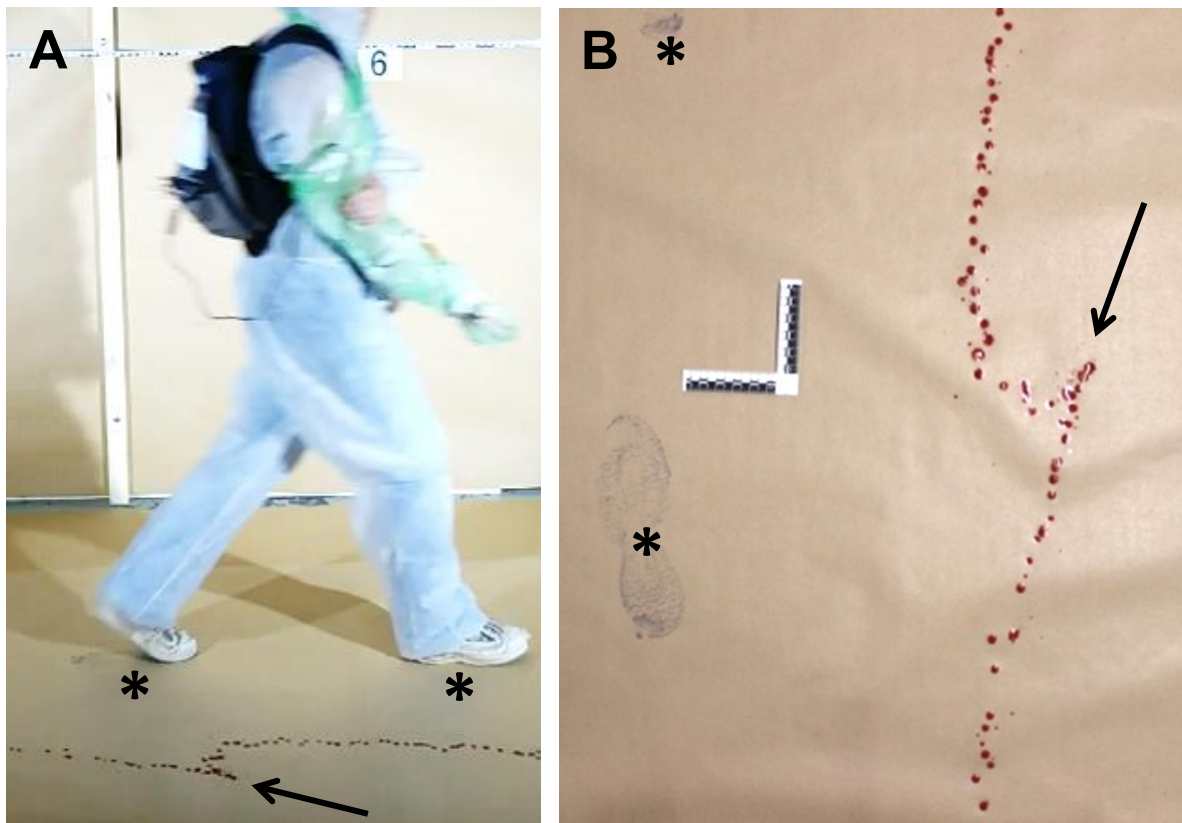


Abbildung 26 A, B. „Waves“ (Pfeile) bei gehender Geschwindigkeit mit am Körper festgehaltenem Arm in Abhängigkeit zur individuellen Schrittabfolge (Asterisken) des jeweiligen Probanden. **A** = Seitenansicht; **B** = korrespondierende Bodenspur.

Bei schnelleren Bewegungsgeschwindigkeiten (Joggen und Rennen) nehmen die „waves“ nicht nur in ihrer Länge und Breite zu, sondern zeigen nunmehr zunehmend bogenförmige Formanteile (**Abb. 27**).



Abbildung 27. Bodenspur (gestrichelter Pfeil) bei schnellen Bewegungsgeschwindigkeiten (Rennen) mit am Körper festgehaltenem Arm. Die anfänglich bei gehender Geschwindigkeit beobachteten „waves“ entrunden mit zunehmender Geschwindigkeit und zeigen bei rennender Geschwindigkeit ebenfalls schleifen- bzw. bogenförmige Muster.

Die Tropfenform der einzelnen Spuren bleibt auch bei fixiertem Arm annähernd rund und beginnt erst bei rennenden Bewegungsgeschwindigkeiten (durchschnittlich 4m/s) eine ovale Form anzunehmen. Zwischen den beobachteten „waves“ waren - überwiegend bei den langsamen Bewegungsabläufen- erneut vereinzelt *Tropf-in-Tropf* Muster erkennbar (**Abb. 28 A, B**).

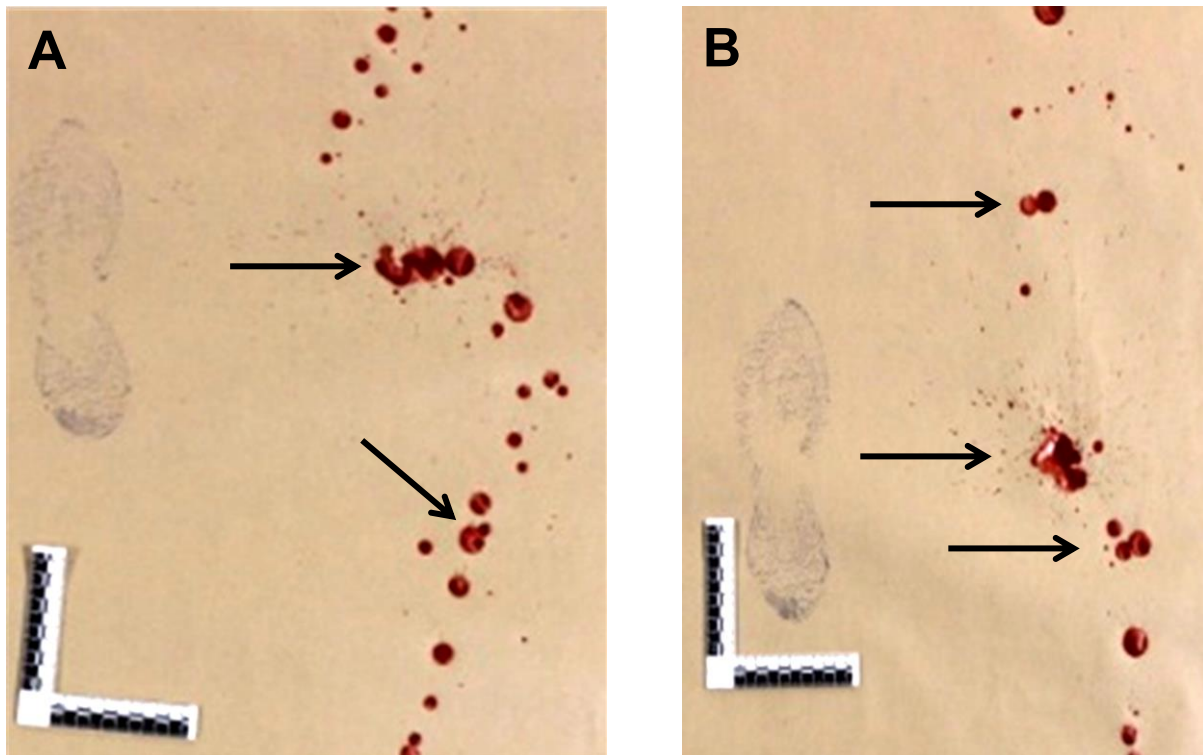


Abbildung 28 A, B. *Tropf-in-Tropf* Muster (Pfeile) bei gehender Geschwindigkeit mit festgehaltenem Arm bei unterschiedlichen Probanden.

4.2. Quantitative Auswertung der Blutspurenmuster

Bereits morphologisch-deskriptiv zeigten sich Unterschiede der experimentell erzeugten Blutspurenmuster in Abhängigkeit vom Ausmaß der eingesetzten Armpendelbewegungen („frei schwingender Arm“ und am Körper „fixiert gehaltener Arm“) und der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit (Gehen, Joggen, Rennen).

Nachfolgend sollen die Ergebnisse der explorativ-statistischen Zusammenhänge vorgestellt werden, die sich in allererster Linie mit der Frage befassen, ob anhand der metrischen Formenunterschiede eine Klassifikation der betreffenden Geschwindigkeit mit hinreichender Prognosesicherheit gelingt.

4.2.1. Zusammenhang zwischen Bewegungsgeschwindigkeiten und Formausprägungen der Blutspurenmuster

Die Erfassung sowohl der Länge, als auch der Breite der „loops“ und „waves“ ergab einen Zuwachs der Messwerte in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit, indes unabhängig der Frage, ob die Spuren durch Armpendelbewegungen entstanden sind oder nicht. (Abb. 29 A, B).

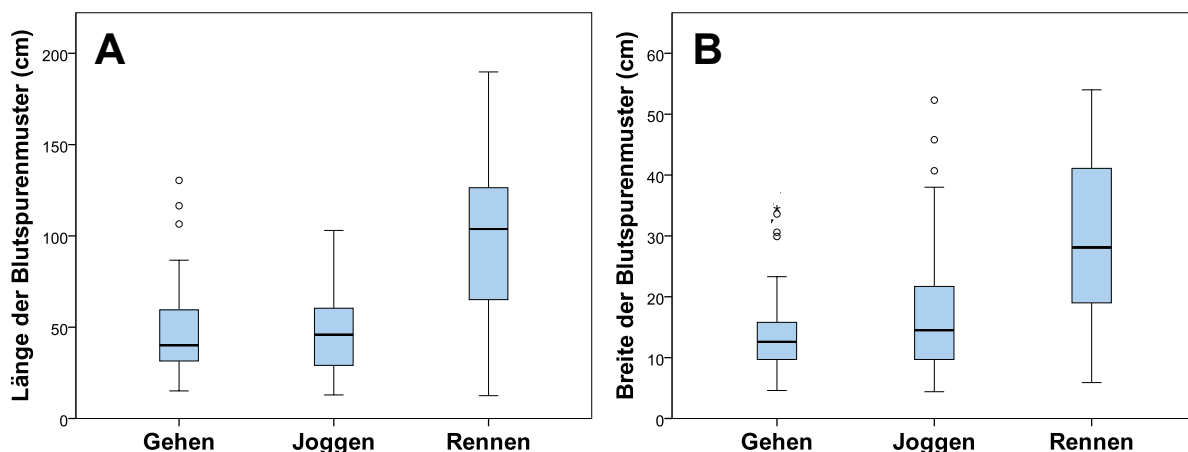


Abbildung 29 A, B. Zusammenhang zwischen Länge der Blutspurenmuster (cm) und Bewegungsgeschwindigkeit (A), unabhängig von der jeweiligen Armpendelbewegung; **Gehen:** Median = 40,1cm, SD ± 22,6cm; **Joggen:** Median = 45,9cm, SD ± 22,8cm; **Rennen:** Median = 103,7cm, SD ± 47,9cm. Zusammenhang zwischen der Breite der Blutspurenmuster (cm) und der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit (B), unabhängig von der jeweiligen Armpendelbewegung; **Gehen:** Median = 12,5cm, SD ± 5,9cm; **Joggen:** Median = 14,5cm, SD ± 10,5cm; **Rennen:** Median = 28,1cm, SD ± 13,2cm).

Die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) unter Verwendung der unabhängigen Variablen „Bewegungsgeschwindigkeit“ sowie der beiden abhängigen Variablen „Länge“ und „Breite“ ergab ein hochsignifikantes Ergebnis ($F_{\text{Länge}} = 42,35$; $p < 0,0001$; $F_{\text{Breite}} = 37,73$; $p < 0,0001$). In einem paarweisen Vergleich der drei Geschwindigkeiten (x = Gehen versus Joggen, y = Gehen versus Rennen, z = Joggen versus Rennen) waren bei Betrachtung der Blutspurenlänge nach den Ergebnissen des t-Tests nur für y und z hochsignifikante Gruppenunterschiede nachweisbar ($t_y = -7,84$; $p < 0,0001$; $t_z = -6,9$; $p < 0,0001$). Hinsichtlich der Blutspurenbreite (cm) der erfassten Blutspurenmuster und ihrer Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit ergab sich ein hochsignifikanter Unterschied im Vergleich zwischen gehender und rennender Geschwindigkeit ($t_y = -9,23$; $p < 0,0001$). Unabhängig der durchgeführten Armbewegung, kann unter Anwendung der Variablen „Länge“ und „Breite“

der Spurenbilder eine morphometrische Unterscheidung in die Geschwindigkeitsklassen „Gehen“ und „Rennen“, unter Anwendung der Diskriminanzfunktion (Df1) erfolgen:

$$Y = -2.648 + 0.08 \times (\text{Spurenbreite}) + 0.18 \times (\text{Spurenlänge})$$

$$\text{Trennwert} = 0.399$$

$$Y > 0.399 = \text{Rennen}$$

$$Y < 0.399 = \text{Gehen}$$

Eine nachfolgende Korrelationsanalyse nach *Pearson* unter Einbezug der beiden Variablen Länge (cm) und Breite (cm) aller Blutspurenmuster ergab einen statistisch hochsignifikanten Zusammenhang ($r = 0,45$; $R^2 = 0,20$; $p < 0,001$) (**Abb. 30**).

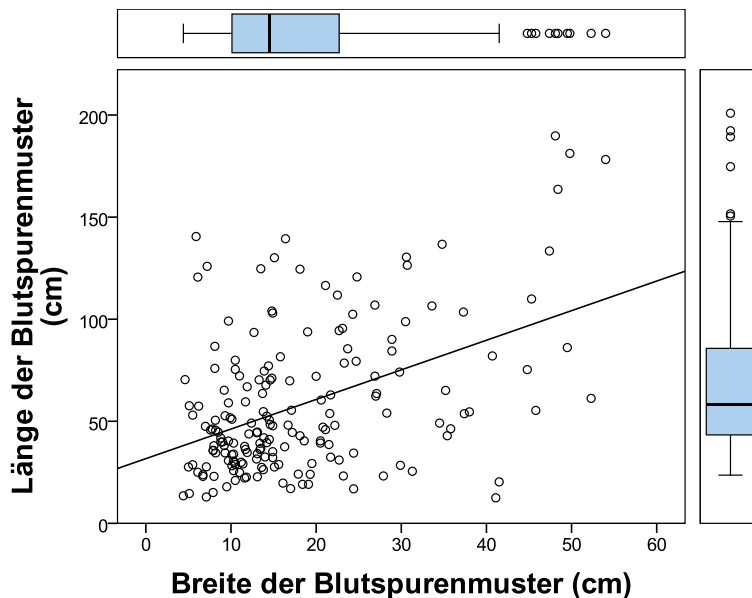


Abbildung 30.
Zusammenhang zwischen der Länge und der Breite der Blutspurenmuster (cm) unabhängig vom Armbewegungsmuster.

Abbildung 31 A illustriert den Zusammenhang zwischen der Schrittzahl und den Geschwindigkeitsklassen. Es zeigt sich eine mittlere Abnahme von 3,1 Schritten je Geschwindigkeitskategorie ($\text{Mean}_{\text{Gehen}} = 13,7$; $\text{Mean}_{\text{Joggen}} = 10,1$; $\text{Mean}_{\text{Rennen}} = 7,5$).

Die metrisch erfassbaren Unterschiede waren unter Verwendung der ANOVA-Analyse untereinander hochsignifikant ($F = 26,84$; $p < 0,001$). Ein im Anschluss durchgeführter statistischer Mittelwertvergleich der Schrittzahl in Abhängigkeit zu den Versuchen „*schwingender Arm*“ versus „*festgehaltener Arm*“ zeigte keinen signifikanten Unterschied ($t = -0,39$; $p = 0,69$) (**Abb. 31 B**). Abbildung 31 B veranschaulicht zusätzlich, dass auch in Hinsicht auf Ausreißer keine Gruppenunterschiede bestehen.

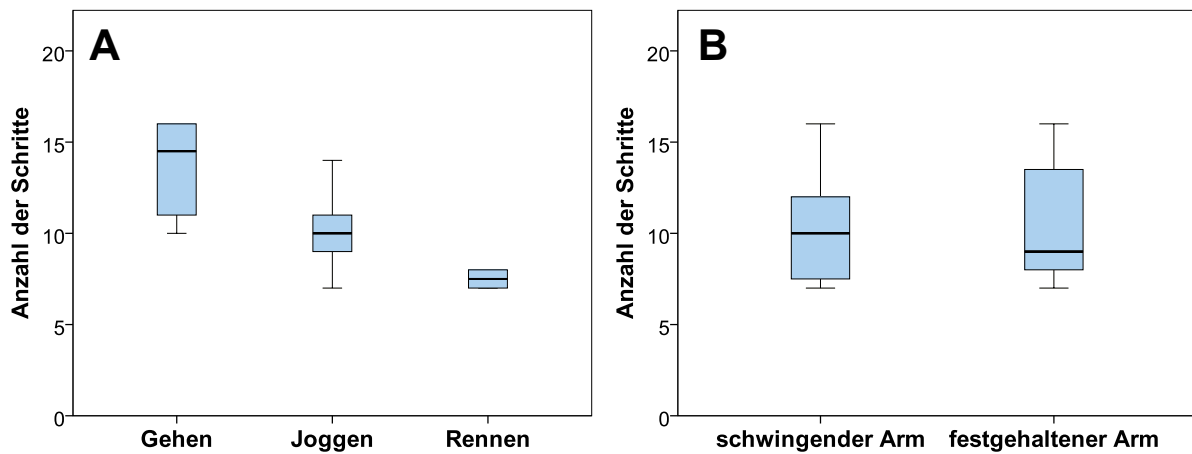


Abbildung 31 A. Zusammenhang zwischen der Anzahl der Schritte und der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit. Man erkennt eine Abnahme der Schritte mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit (Schrittzahl-Mittelwert = 10,5; $SD \pm 3,2$).

Abbildung 31 B. Vergleich der Schrittzahl in Abhängigkeit der beiden Armbewegungsmuster „schwingender Arm“ versus „festgehaltener Arm“ (Schrittzahl-Median_{schwingender Arm} = 10, $SD \pm 3,1$; Schrittzahl-Median_{festgehaltener Arm} = 9, $SD \pm 3,3$).

Abschließend wurde die metrisch erfasste Schrittlänge (cm) in Abhängigkeit der unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten analysiert. Hierbei ergab sich ein erwartungsgemäß statistisch signifikanter Zuwachs der Messwerte ($F = 252,4$; $p < 0,0001$) (**Abb. 32**).

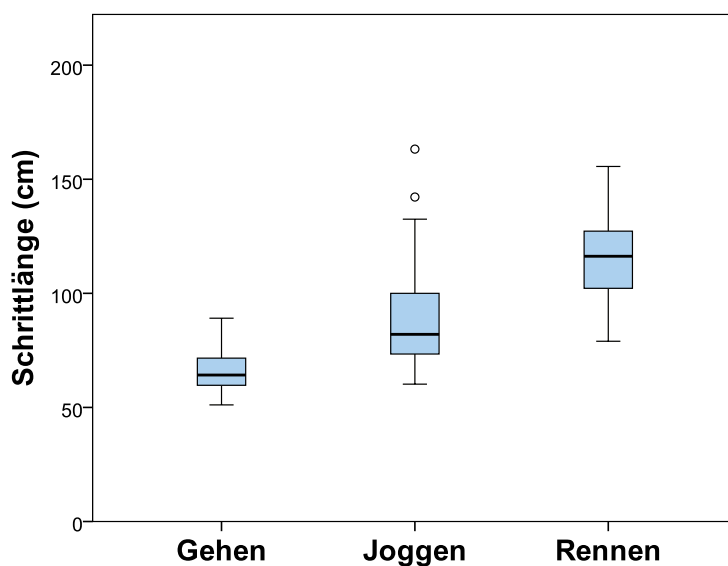


Abbildung 32. Messwerte der Schrittlänge (cm) in Abhängigkeit der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit. Beginnend bei der gehenden Geschwindigkeit (Median = 64; $SD \pm 9,3$), über die joggende (Median = 82; $SD \pm 19,3$) bis hin zur rennenden Geschwindigkeit (Median = 116; $SD \pm 16,3$).

Die Korrelationsanalyse nach *Pearson* ergab ohne Berücksichtigung der Armbewegung einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Länge der Blutspurenmuster

(cm) und der metrisch erfassten Schrittlänge ($r = 0,43$; $R^2 = 0,18$; $p < 0,0001$). Prüft man diesen Zusammenhang getrennt voneinander („frei schwingender Arm“ versus „festgehaltener Arm“), so zeigt sich lediglich im Falle eines schwingenden Armes eine signifikante Korrelation ($r = 0,48$; $R^2 = 0,23$; $p < 0,0001$), während bei festgehaltenem Arm dieser Zusammenhang statistisch nicht bestätigt werden konnte ($r = 0,15$; $R^2 = 0,02$; $p = 0,13$) (**Abb. 33**).

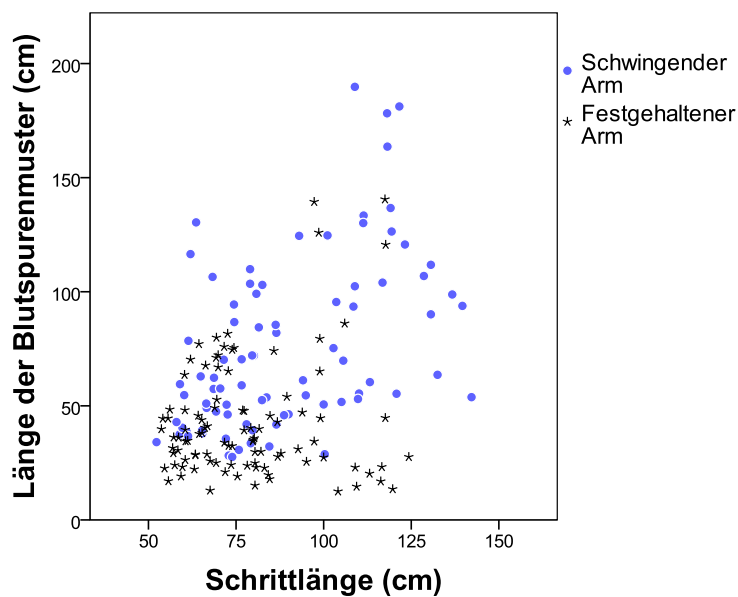


Abbildung 33. Verteilung der Messwerte der Länge der Blutspurenmuster (cm) in Abhängigkeit der Schrittlänge und der Armbewegungen (festgehaltener Arm versus schwingenden Arm).

Untersucht man, ob zwischen der Breite der Blutspurenmuster (cm) und der Schrittlänge ein Zusammenhang besteht, so ergab eine Korrelationsanalyse nach *Pearson* hierbei ebenfalls einen statistischen signifikanten Zusammenhang mit der erfassten Schrittlänge (cm) ($r = 0,39$; $R^2 = 0,15$; $p < 0,0001$). Die Verteilung der Messwerte für die Breite der Blutspurenmuster (cm) bezogen auf die zwei Bewegungsgruppen „*schwingender Arm*“ und „*festgehaltener Arm*“ zeigt ebenfalls nur in der Bewegungskategorie „*schwingender Arm*“ einen statistisch signifikanten Zusammenhang ($r = 0,39$; $R^2 = 0,15$; $p < 0,001$), während bei einem „*festgehaltener Arm*“ keine statistisch signifikanten Ergebnisse nachgewiesen werden konnten ($r = 0,26$; $R^2 = 0,07$; $p = 0,007$) (**Abb. 34**).

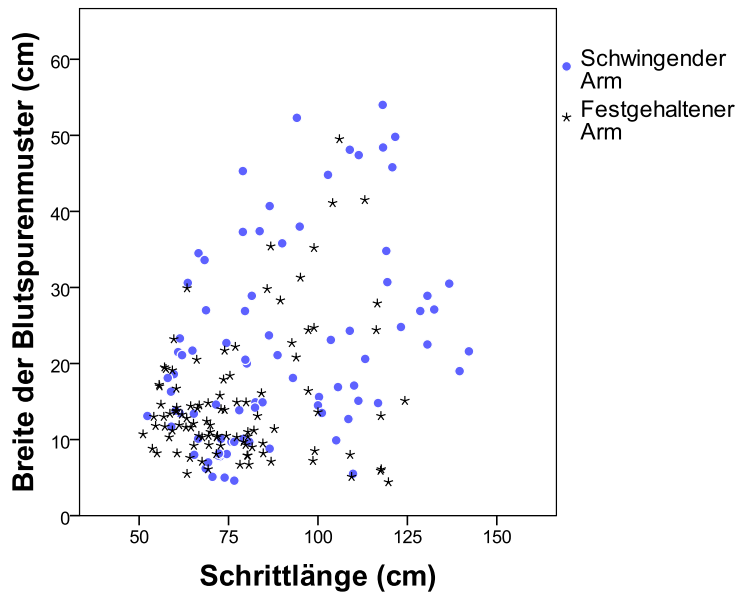


Abbildung 34. Verteilung der Messwerte der Breite der Blutspurenmuster (cm) in Abhängigkeit der Schrittlänge und der Armbewegungen („festgehaltener Arm“ versus „schwinger Arm“).

Tropf-in-Tropf Spurenmuster waren vorrangig bei langsamen Bewegungsgeschwindigkeiten zu beobachten. In Hinsicht auf die Anzahl der einzelnen Tropfen liegt eine hohe Streuung der Messwerte vor (Mittelwert_{Gehen} = 23,1; SD ± 17,9). Im Vergleich dazu, entstanden nur sporadisch *Tropf-in-Tropf* Spuren bei rennender Bewegungsgeschwindigkeit (Mittelwert_{Rennen} = 1,1; SD ± 2,23) (**Abb. 35**).

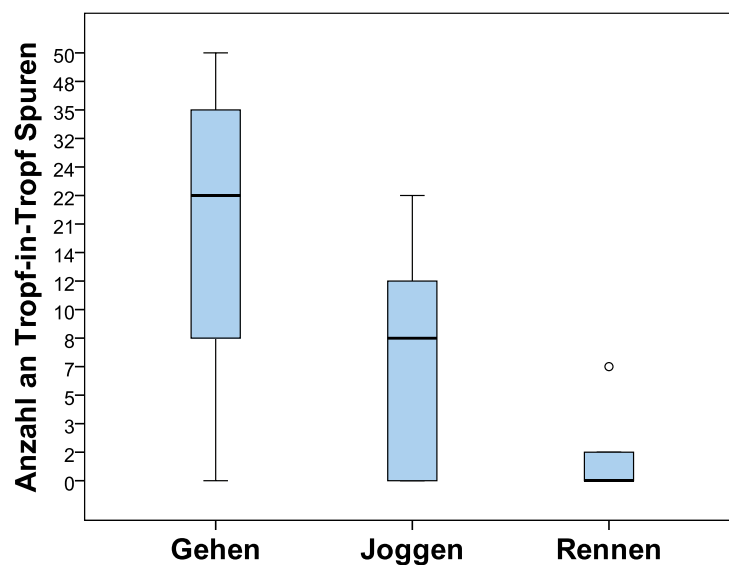


Abbildung 35. Anzahl sogenannter *Tropf-in-Tropf* Spuren in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit mit hochsignifikanten Zusammenhang zwischen gehender und rennender Geschwindigkeit ($p < 0,0001$).

Die Varianzanalyse zur Prüfung statistischer Unterschiede bezüglich der Anzahl an *Tropf-in-Tropf-Spuren* in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit ergab einen signifikanten Zusammenhang ($F = 10,1$; $p < 0,001$).

4.2.2. Eigenschaften der „loops“ und der „waves“ in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit

Eine valide Erfassung des Bewegungsumfanges des Armes war nur bei frei schwingenden Armpendelbewegungen zuverlässig möglich. Als quantifizierbares Merkmal erfolgte dementsprechend die Vermessung der maximalen Auslenkungen des frei schwingenden Arms. Die Größe der Bewegungsauslenkungen zeigte keine wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Bewegungsgeschwindigkeiten ($p > 0,05$). Im Unterschied dazu, ist jedoch beim Rennen eine statistisch nachweisbare Zunahme der Länge der Armschwingung im Vergleich zum Gehen nachweisbar ($t = -2,5$; $p < 0,05$) (**Abb. 36**).

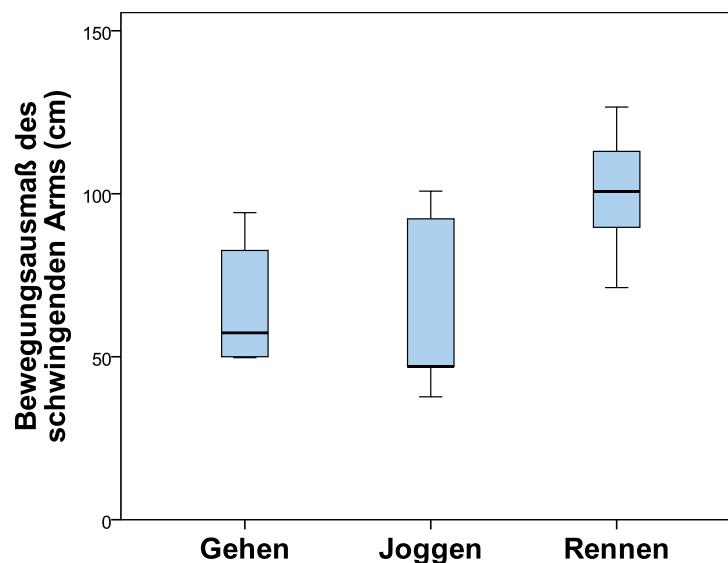


Abbildung 36. Zusammenhang zwischen dem Bewegungsausmaß des schwingenden Arms (cm) und der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit. Hierbei lassen sich im Vergleich kaum Unterschiede feststellen. Die Boxplots illustrieren, dass beim Rennen höhere Werte der Armschwingung zu erwarten sind ($Median_{Gehen} = 66,8$; $SD \pm 20,4$; $Median_{Joggen} = 65$; $SD \pm 47$; $Median_{Rennen} = 100$; $SD \pm 100,7$).

Die beim schwingenden Arm entstandenen „loops“ ließen bereits makromorphologisch bei steigender Bewegungsgeschwindigkeit eine Abhängigkeit von dem Bewegungsausmaß des Schwungarms vermuten. Eine Korrelationsanalyse nach *Pearson* erbrachte hier einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen dem Bewegungsausmaß des schwingenden Arms und der Länge der „loops“ ($r = 0,47$; $R^2 = 0,22$; $p < 0,05$) (**Abb. 37**).

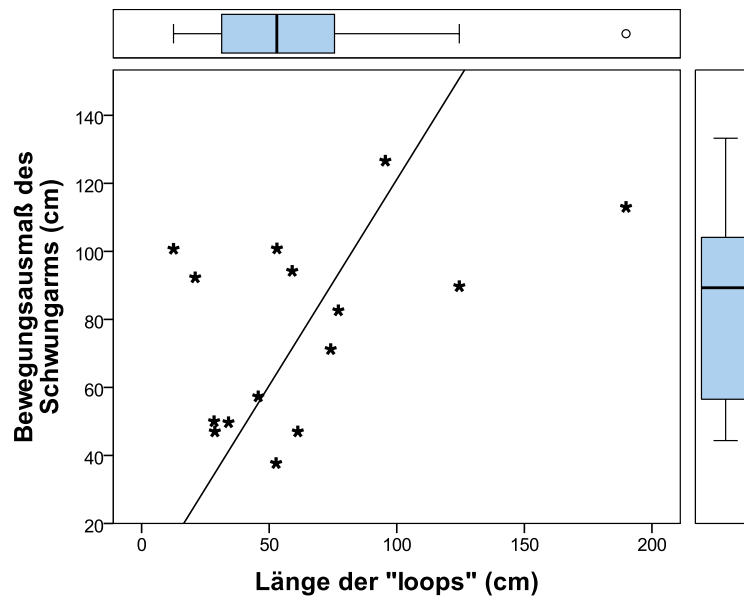


Abbildung 37. Verteilung der Messwerte der Länge der „loops“ in Abhängigkeit der Schwunglänge (cm).

Hinsichtlich der Länge als auch der Breite des Blutspurenbildes (cm) lagen die Messwerte in der Kategorie „*schwinger Arm*“ durchschnittlich höher (**Abb. 37, 38**).

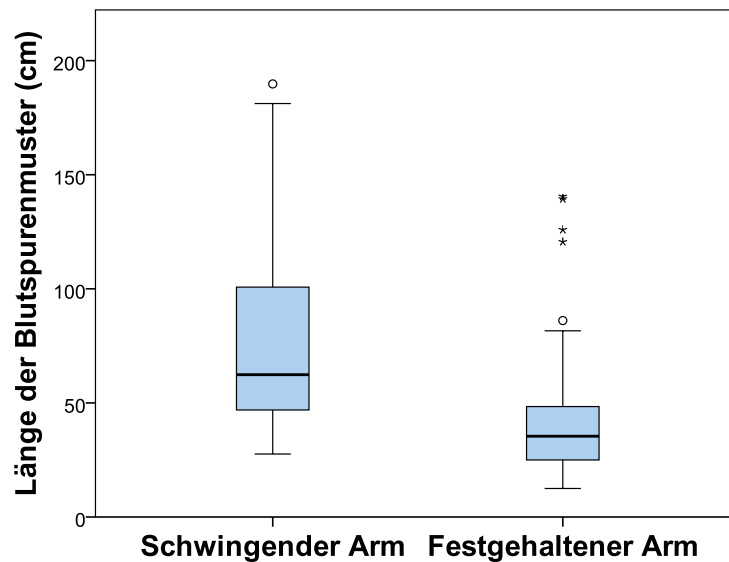


Abbildung 38. Zusammenhang zwischen der Länge der Blutspurenmuster (cm) und der Armpendelbewegung ($Median_{\text{schwingend}} = 62,3$; $SD \pm 38$; $Median_{\text{festgehalten}} = 35,5$; $SD \pm 26,1$).

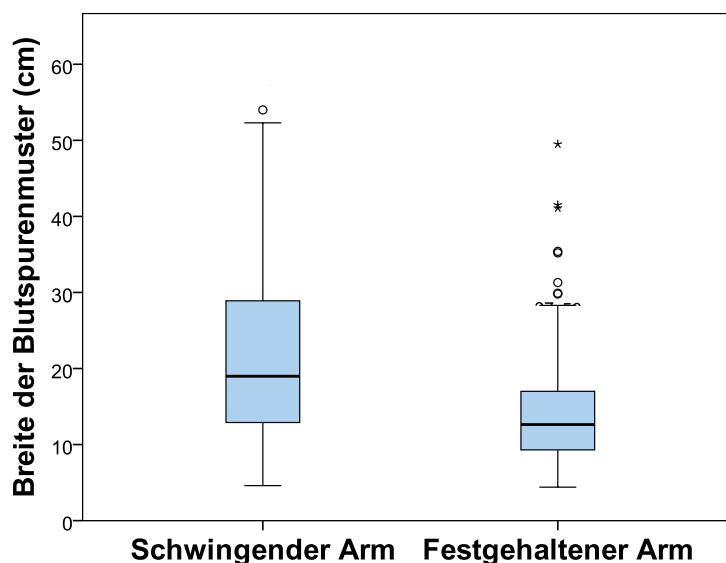


Abbildung 39. Zusammenhang zwischen der Breite der Blutspurenmuster (cm) und der Armpendelbewegung ($Median_{Schwinger} = 19$; $SD \pm 12,8$; $Median_{festgehalten} = 12,6$; $SD \pm 8,4$).

In einem Mittelwertvergleichstest wurde nach Einschätzung der Varianzgleichheit ($p < 0,0001$) analysiert, ob statistische Unterschiede zwischen den bewegungsassoziierten Armpendelbewegungen („*schwingerer Arm*“ versus „*festgehaltener Arm*“) in Hinsicht der Länge und Breite der Blutspurenmuster (cm) vorliegen. Hierbei konnten in beiden Kategorien jeweils hochsignifikante Ergebnisse erzielt werden ($t_{Länge} = 6,8$; $p < 0,0001$; $t_{Breite} = 4,5$; $p < 0,0001$).

Nachfolgend wurde die Länge der „*loops*“ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit bei frei schwingendem Arm deskriptiv erfasst (**Tab. 8**).

Tabelle 8. Länge der „*loops*“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei Blutspuren generiert durch einen frei schwingenden Arm.

Geschwindigkeit	Mittelwert	Median	SD	Min/Max
Gehen	53,9	46,2	25,8	27,6 / 130,4
Joggen	64,9	60,8	19,1	28,8 / 103
Rennen	120,8	116,3	34,4	46,3 / 189,8

Vergleicht man nunmehr die Verteilung der Blutspurenlänge der „*loops*“, zwischen den drei Geschwindigkeitsgruppen, die bei „*frei schwingendem Arm*“ entstanden sind, so erhält

man einen hochsignifikanten, geschwindigkeitsabhängigen Zuwachs der Blutspurenlängen ($F = 45,3$; $p < 0,0001$) (**Abb. 40**).

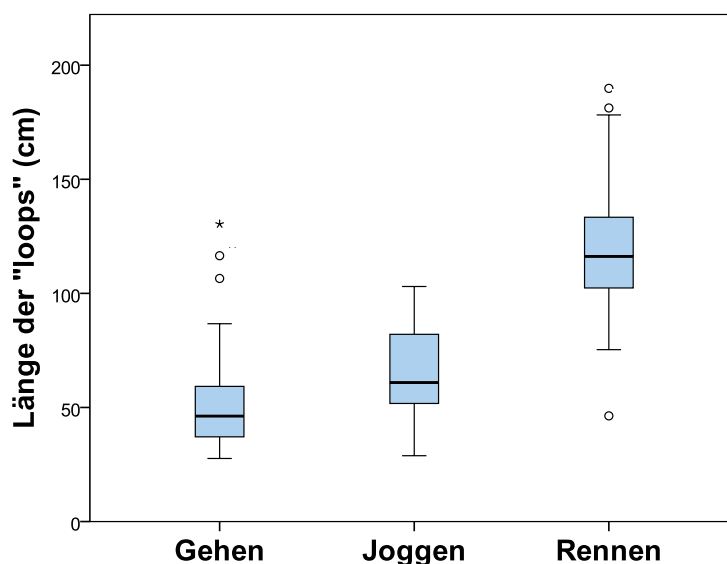


Abbildung 40. Länge der „loops“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei freischwingendem Arm.

In einem nachfolgendem Schritt wurde in einem bivariaten Vergleich getestet, ob die Geschwindigkeitsklassen untereinander ebenfalls signifikante Unterschiede aufweisen. Tabelle 9 zeigt, dass zwischen Gehen und Joggen kein statistisch signifikanter Unterschied besteht, während die Vergleiche zwischen Gehen und Rennen sowie zwischen Joggen und Rennen hochsignifikante Differenzen aufzeigten ($p < 0,0001$).

Tabelle 9. Ergebnisse der bivariaten Mittelwertvergleiche der Länge der „loops“ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit.

Geschwindigkeit	t-Wert	p
Gehen vs. Joggen	-1,80	0,065
Gehen vs. Rennen	-8,1	< 0,0001
Joggen vs. Rennen	-7,5	< 0,0001

Nachfolgende zusammenfassende Tabelle listet die entsprechenden Messergebnisse für die Länge der „loops“ in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsklassen auf (**Tab. 10**).

Tabelle 10. Länge der „loops“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei Blutspuren generiert durch einen schwingenden Arm.

Geschwindigkeit	Mittelwert	Median	SD	Min / Max
Gehen	14,7	13,4	8,2	4,6 / 34,5
Joggen	22,5	20,8	11,4	8 / 52,3
Rennen	32,3	30,6	13	13,5 / 54

Abbildung 41 gibt explorativ-statistisch den Zusammenhang zwischen der Breite der „loops“ und den drei Geschwindigkeitsklassen bei frei schwingendem Arm wieder. Mittels einer einfaktorischen Varianzanalyse konnten statistisch nachweisbare Gruppenunterschiede bewiesen werden ($F = 16,7$; $p < 0,0001$) (**Abb. 41**).

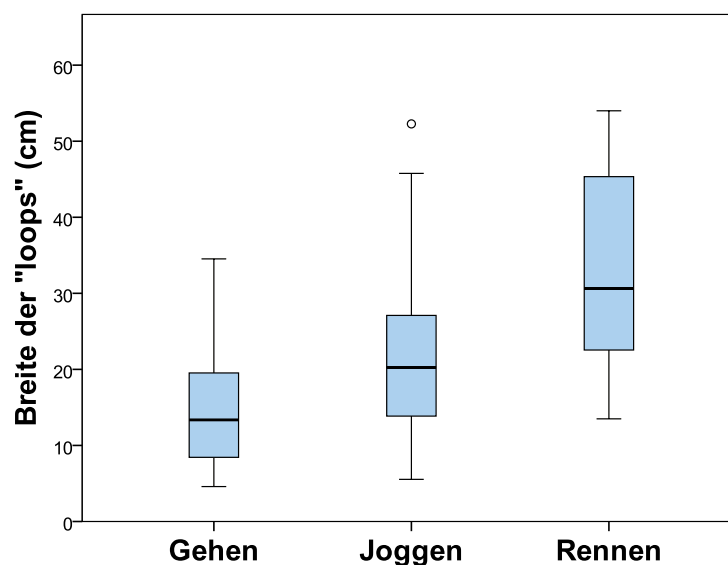


Abbildung 41. Breite der „loops“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei frei schwingendem Arm.

Analog zur Länge der „loops“ wurde auch für die Breite der Spurenbilder ein paarweiser Vergleich der Geschwindigkeitsklassen untereinander mittels t-Tests durchgeführt (**Tab. 11**).

Tabelle 11. Breite der „loops“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei Blutspuren generiert durch einen schwingenden Arm.

Geschwindigkeit	t-Wert	p
Gehen vs. Joggen	-2,8	< 0,05
Gehen vs. Rennen	-6,1	< 0,0001
Joggen vs. Rennen	-3,0	< 0,05

Zuletzt wurden die Messwerte für die Länge der „waves“ deskriptiv-statistisch ausgewertet und in Abhängigkeit der Geschwindigkeit tabellarisch zusammengefasst (**Tab. 12**).

Tabelle 12. Länge der „waves“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei Blutspuren generiert durch einen am Körper fixiert gehaltenen Arm.

Geschwindigkeit	Mittelwert	Median	SD	Min / Max
Gehen	42,9	38,2	19,5	15,1 / 81,6
Joggen	31,7	29,9	11,1	12,9 / 52,7
Rennen	65,4	59,6	45,9	12,5 / 140,5

Anhand der Verteilung der Messparameter erkennt man hier ebenfalls einen geschwindigkeitsabhängigen Zuwachs der Parameter sowie einen statistisch hochsignifikanten Zuwachs der erfassten Messwerte zwischen den untersuchten Geschwindigkeitsgruppen ($F = 10,4$; $p < 0,0001$) (**Abb. 42**).

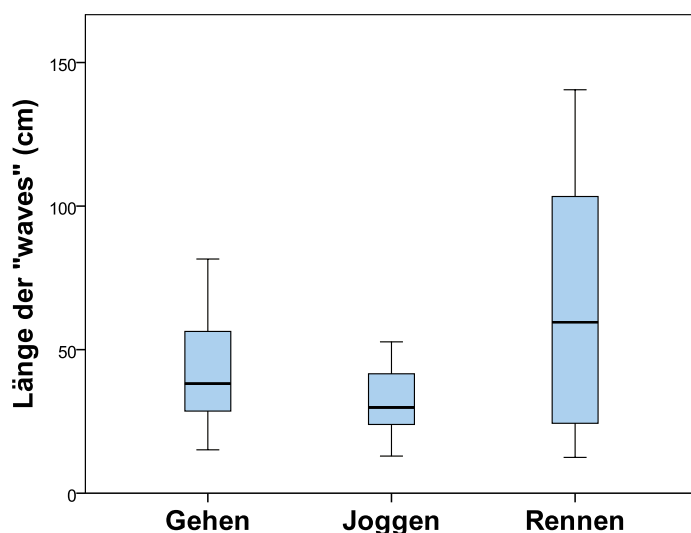


Abbildung 42. Länge der „waves“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei festgehaltenem Arm.

Ein daraufhin durchgeführter statistischer paarweiser Vergleich der Messwerte zwischen den Geschwindigkeitsklassen zeigte in allen Kategorien signifikante Differenzen auf (**Tab. 13**).

Tabelle 13. Länge der sogenannten „waves“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei Blutspuren generiert durch einen festgehaltenen Arm.

Geschwindigkeit	t-Wert	p
Gehen vs. Joggen	2,9	< 0,01
Gehen vs. Rennen	-2,8	< 0,01
Joggen vs. Rennen	-4,0	< 0,0001

In einem letzten Schritt wurden die erfassten Messparameter für die Breite der „waves“ explorativ-statistisch ausgewertet und nachfolgend tabelliert (**Tab. 14**).

Tabelle 14. Breite der „waves“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei Blutspuren generiert durch einen am Körper fixiert gehaltenen Arm.

Geschwindigkeit	Mittelwert	Median	SD	Min / Max
Gehen	13,1	12,4	4,3	6,7 / 29,9
Joggen	12,6	11,1	6,7	4,4 / 35,4
Rennen	25,5	26,3	13	5,9 / 49,5

Hierbei konnten mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse statistisch signifikante Unterschiede in den Geschwindigkeitsklassen aufgezeigt werden, wie auch in der Abbildung 43 anhand der Verteilung der Messparameter zu erkennen ist ($F = 21,1$; $p < 0,0001$) (**Abb. 43**).

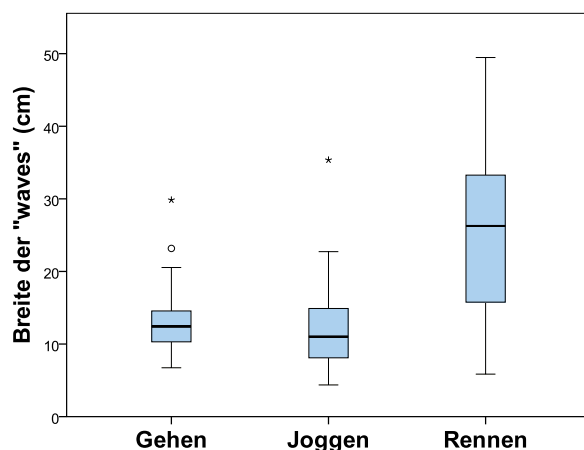


Abbildung 43. Breite der „waves“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit unter Voraussetzung eines festgehaltenen Arms.

Ein paarweiser Vergleich der geschwindigkeitsabhängigen Messwerte erbrachte von gehender zu rennender bzw. von joggender zu rennender Geschwindigkeit statistisch signifikante Unterschiede hinsichtlich der Breite der „waves“ (**Tab. 15**).

Tabelle 15. Breite der sogenannten „waves“ (cm) in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei Blutspuren generiert durch einen festgehaltenen Arm.

Geschwindigkeit	t-Wert	p
Gehen vs. Joggen	0,4	> 0,05
Gehen vs. Rennen	-6,0	< 0,0001
Joggen vs. Rennen	-4,5	< 0,001

Letztendlich wurde mittels eines paarweisen statistischen Vergleiches der Länge und Breite der „loops“ und „waves“ zwischen den beiden Bewegungsarten „frei schwingender Arm“ versus „festgehaltener Arm“ getestet, ob geschwindigkeitsabhängige Gruppenunterschiede vorliegen (**Tab. 16, 17**). Hierbei sind folgende Ergebnisse zu beschreiben:

1. Die Vermessung der Länge beider Spurenbilder („waves“ und „loops“) ermöglicht eine statistisch zuverlässige Unterscheidung zwischen der Kategorie „frei schwingender Arm“ und „festgehaltener Arm“, wenn ein paarweiser Vergleich jeweils in der gleichen Geschwindigkeitsklasse erfolgt ($p < 0,001$; grüne Felder **Tab. 16**). Hierbei ist hervorzuheben, dass insbesondere bei schnelleren Bewegungsgeschwindigkeiten (Joggen und Rennen) eine hochsignifikante Differenzierung möglich ist ($p < 0,0001$).
2. Durch Vermessung der Länge der „loops“ und „waves“ ist im paarweisen Vergleich der Geschwindigkeitsklassen und der Armbewegung untereinander, beispielsweise zwischen der Unterscheidung zwischen „Gehen_{festgehalten}“ und „Joggen_{schwingend}“ bis auf in der Kategorie „Rennen_{festgehalten}“ ($p > 0,05$; rote Felder **Tab. 16**) eine sichere geschwindigkeits- und bewegungsabhängige Differenzierung sinnvoll und möglich.

Tabelle 16. Statistischer Zusammenhang (Mann-Whitney U-Test) zwischen der Länge der Blutspurenmuster (cm) in Abhängigkeit der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit und im Vergleich der durchgeführten Armpendelbewegung („frei schwingender Arm“ und „festgehaltener Arm“). Hochsignifikanter Zusammenhang ($p < 0,05$) grün hervorgehoben.

Bewegung Armhaltung	Gehen, festgehalten	Joggen, festgehalten	Rennen, festgehalten
Gehen, frei schwingend	$p = 0,04$	$p < 0,0001$	$p = 0,93$
Joggen, frei schwingend	$p < 0,0001$	$p < 0,0001$	$p = 0,63$
Rennen, frei schwingend	$p < 0,0001$	$p < 0,0001$	$p = 0,0014$

Möchte man zuletzt auf statistische Unterschiede der bewegungsassoziierten Spurenbilder in den untersuchten Geschwindigkeitsklassen mittels Vermessung der Breite der „loops“ und „waves“ testen, so ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

1. Die Vermessung der Breite beider Spurenbilder ermöglicht nur in der Geschwindigkeitsklasse „Joggen“ eine hochsignifikante Trennung zwischen den Bewegungskategorien „frei schwingend“ und „festgehalten“ ($p < 0,0001$; grünes Feld **Tab. 17**). Eine geschwindigkeitsabhängige Differenzierung der Armbewegung in der Kategorie „Gehen“ und „Rennen“ ist nicht sicher möglich ($p > 0,05$; rote Felder **Tab. 17**).
2. Im paarweisen Vergleich der Geschwindigkeitsklassen und der Armhaltung untereinander ist eine sichere Differenzierung der Spurenbilder anhand der Vermessung der Breite der Blutspurenkomplexe zwischen „Joggen_{schwingend}“ und „Gehen_{festgehalten}“, zwischen den Gruppen „Rennen_{schwingend}“ versus „Gehen / Joggen_{festgehalten}“ sowie zwischen „Gehen_{schwingend}“ versus „Rennen_{festgehalten}“ möglich ($p < 0,001$; hellblaue Felder **Tab. 17**). Eine sichere Differenzierung zwischen den Gruppen „Joggen_{festgehalten}“ versus Gehen_{schwingend}“ und „Rennen_{festgehalten}“ und „Joggen_{schwingend}“ nicht möglich ($p > 0,05$; gelbe Felder **Tab. 17**).

Tabelle 17. Statistischer Zusammenhang (Mann-Whitney U-Test) der Breite der Blutspurenmuster (cm) in Abhängigkeit der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit und im Vergleich der durchgeführten Armpendelbewegung („frei schwingender Arm“ und „festgehaltener Arm“). Hochsignifikanter Zusammenhang ($p < 0,05$) grün hervorgehoben.

Bewegung / Armhaltung	Gehen, festgehalten	Joggen, festgehalten	Rennen, festgehalten
Gehen, schwingend	$p = 0,83$	$p = 0,37$	$p < 0,001$
Joggen, schwingend	$p < 0,0001$	$p < 0,0001$	$p = 0,31$
Rennen, schwingend	$p < 0,0001$	$p < 0,0001$	$p = 0,21$

Vermisst man die Schrittlänge (cm) bei Bewegungen mit schwingendem Arm und festgehaltenem Arm, so lassen sich keine signifikanten, bewegungsabhängigen Unterschiede nachweisen (**Abb. 44**).

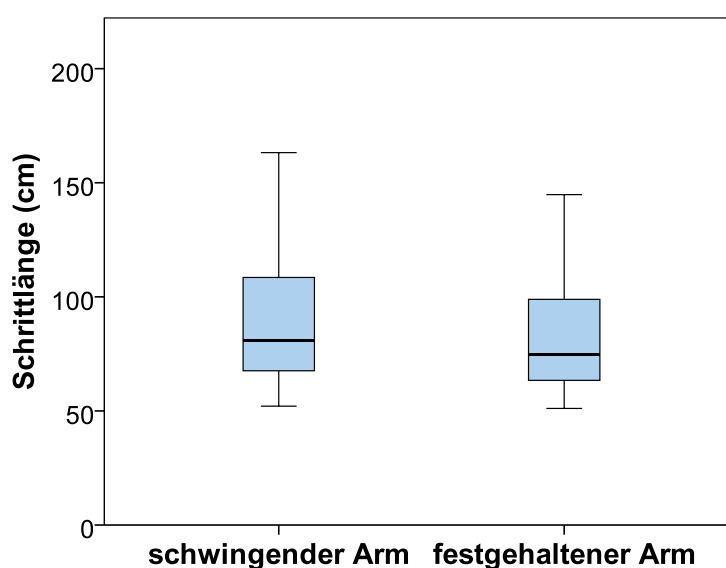


Abbildung 44. Die Schrittlänge (cm) in Abhängigkeit der untersuchten Armpendelbewegung (Median_{schwingend} = 81; SD ± 25,7; Median_{festgehalten} = 75; SD ± 22,1).

Bei der deskriptiven Analyse der Blutspurenbilder fiel auf, dass insbesondere bei den langsamen Bewegungsgeschwindigkeiten augenscheinlich vermehrte sogenannte *Tropf-in-Tropf* Spurenbilder entstanden. Zwischen der Bewegungsgeschwindigkeit und der Entstehung *Tropf-in-Tropf* Spurenbilder besteht eine statistisch hochsignifikanter Zusammenhang ($r = 0,64$; $R^2 = 0,41$; $p < 0,0001$) (**Abb. 45**).

Bezugnehmend auf die bewegungsassoziierten Armpendelbewegungen lässt sich anhand der vorliegenden Ergebnisse feststellen, dass hierbei zwischen den betrachteten Armpendelbewegungen keine erkennbaren Unterschiede vorliegen ($F = 0,0$; $p = 1,0$).

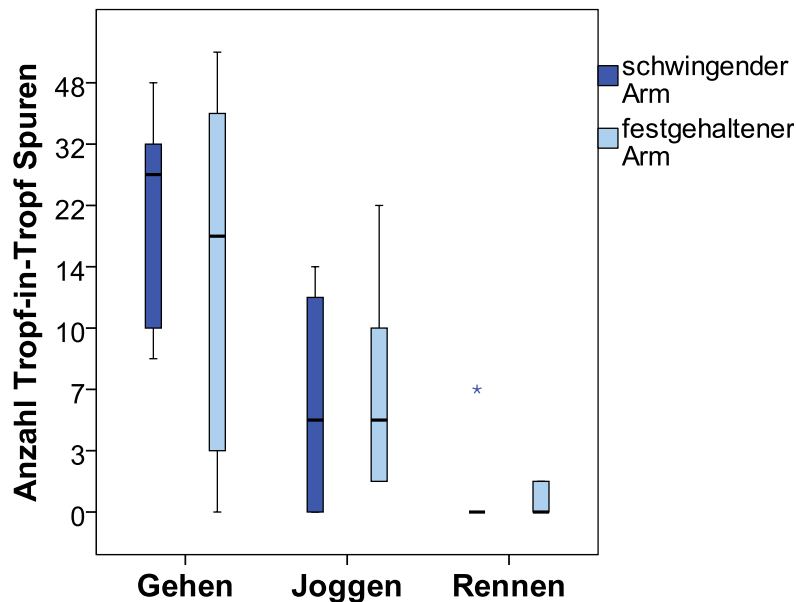


Abbildung 45. Anzahl an Tropf-in-Tropf Spuren in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit bei schwingender Armpendelbewegung und bei am Körper festgehaltenem Arm.

Bei der Anzahl an Tropf-in-Tropf Spurenbildern ist bezüglich der bewegungsassoziierten Armpendelbewegungen festzustellen, dass insbesondere beim Gehen mit „festgehaltenem Arm“ eine hohe Streuung der Messwerte vorliegt (Median = 21; $SD \pm 23,8$), jedoch im direkten Vergleich der Mittelwerte beim Gehen im Mittel höhere Anzahlen an Tropf-in-Tropf Spuren bei „frei schwingendem Arm“ (Median = 24; $SD \pm 16,5$), als bei am Körper festgehaltenem Arm (Median = 16; $SD \pm 23,8$) zu erwarten sind.

4.3. Klassifikation der Blutspurenmuster

In einer Diskriminanzanalyse nach Fisher wurde zunächst unabhängig von der jeweiligen Armpendelbewegung geprüft, ob anhand der Blutspurenbreite und –länge eine Schätzung der Bewegungsgeschwindigkeit gelingt. Versucht man zunächst eine Klassifikation aller experimentell erzeugten Blutspurenmuster in alle drei Bewegungsgeschwindigkeiten, so wird man nur in ca. 59% der Fälle eine richtig-positive Zuordnung erhalten (**Tab. 18**).

Tabelle 18. Dargestellt der Klassifikationserfolg der Blutspuren in alle drei Bewegungsgeschwindigkeiten (Wilks-Lambda 0,57; $p < 0,001$).

Klassifikationsergebnisse^a

			Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit			Gesamtsumme
			Gehen	Joggen	Rennen	
Original	Anzahl	Gehen	60	18	4	82
		Joggen	33	17	11	61
		Rennen	0	9	29	38
	%	Gehen	73,2	22,0	4,9	100,0
		Joggen	54,1	27,9	18,0	100,0
		Rennen	,0	23,7	76,3	100,0

a. 58,6% der ursprünglichen gruppierten Fälle ordnungsgemäß klassifiziert.

Anhand des Klassifikationsversuches ist festzustellen, dass circa 73% der untersuchten Blutspurenmuster „*richtig-positiv*“ der Geschwindigkeitsklasse „Gehen“ zugeordnet werden und rund 76% aller Blutspurenmuster „*richtig-positiv*“ der Geschwindigkeitskategorie „Rennen“ zugeordnet werden konnten. In der Kategorie „Joggen“ zeigte sich, dass nur 28% der Fälle „*richtig-positiv*“ zugeordnet werden konnten. Mehr als die Hälfte aller beim Joggen generierten Spuren, das heißt 54% der untersuchten Fälle, wurden fälschlicherweise durch Messung der Länge und Breite der Muster in die Kategorie „Gehen“ zugeordnet. Von daher wurde nachfolgend versucht, ein Klassifikationsversuch der Bewegungsgeschwindigkeit an Hand der Blutspurenlänge- und weite ausschließlich unter Berücksichtigung der Bewegungsgeschwindigkeit „Gehen“ und „Rennen“ durchzuführen. Hiernach ließ sich der Klassifikationserfolg maximieren- so konnten ca. 89% der untersuchten Spurenbilder „*richtig-positiv*“ in die Bewegungsgeschwindigkeiten „Gehen“ und „Rennen“ eingeordnet werden (Tab. 19).

Tabelle 19. Klassifikation in die Bewegungsgeschwindigkeiten „gehen“ und „rennen“ mit einer richtig-positiven Zuordnung in ca. 89% der Fälle (Wilks-Lambda 0,49; $p < 0,001$).

Klassifikationsergebnisse^a

			Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit		Gesamtsumme
			Gehen	Rennen	
Original	Anzahl	Gehen	77	5	82
		Rennen	8	30	38
	%	Gehen	93,9	6,1	100,0
		Rennen	21,1	78,9	100,0

a. 89,2% der ursprünglichen gruppierten Fälle ordnungsgemäß klassifiziert.

Hierdurch lässt sich festhalten, dass in immerhin ca. 94% der Fällen eine „*richtig-positive*“ Klassifikation der Blutspurenlänge- und breite in die Geschwindigkeit „Gehen“ gelingt. Bei rund 79% der untersuchten Blutspurenmuster kann eine „*richtig-positive*“ Klassifikation in die Geschwindigkeitsklasse „Rennen“ erlangt werden.

Nimmt man nun zuletzt noch die Schrittlänge des jeweiligen Probanden mit in die Überlegungen ein, so gelingt in ca. 99% der Fälle eine „*richtig-positive*“ Klassifikation der Blutspurenmuster in die zwei Bewegungsgeschwindigkeiten „Gehen“ und „Rennen“ (**Tab.20**).

Tabelle 20. Klassifikation in die Bewegungsgeschwindigkeiten „Gehen“ und „Rennen“ unter Berücksichtigung der jeweiligen Schrittlänge des Probanden mit einer richtig-positiven Klassifikation in 100% der Fälle (Wilks-Lambda 0,18; $p < 0,0001$).

Klassifikationsergebnisse^a

			Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit		Gesamtsumme
			Gehen	Rennen	
Original	Anzahl	Gehen	82	0	82
		Rennen	0	38	38
	%	Gehen	100,0	,0	100,0
		Rennen	,0	100,0	100,0

a. 100,0% der ursprünglichen gruppierten Fälle ordnungsgemäß klassifiziert.

Unter Einbeziehung der Schrittlänge des Probanden erhält man somit einen richtig-positive Klassifikation der Blutspurenlänge- und breite in bis zu 100% der Fälle in die Bewegungsgeschwindigkeit „Gehen“. In ca. 97% der Fälle wird man eine „*richtig-positive*“ Zuordnung der Bodenspuren in die Bewegungsgeschwindigkeit „Rennen“ erzielen (Wilks-Lambda 0,18; $p < 0,0001$).

Nimmt man lediglich die erfasste Länge der jeweiligen Blutspur als Klassifikationsmerkmal in die drei Bewegungsgeschwindigkeiten, so lassen sich die Spurenbilder in ca. 56% richtig zuordnen (**Tab. 21**). Unter Einbeziehung der Breite der Blutspuren lassen sich die Spurenbilder ebenfalls in ca. 56% der untersuchten Fälle in die Bewegungsgeschwindigkeiten klassifizieren (**Tab. 22**).

Tabelle 21. Klassifikation in die drei Bewegungsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der metrisch erfassten Länge der Blutspurenmuster mit einer richtig-positiven Klassifikation in ca. 56% der Fälle (Wilks-Lambda 0,68; $p < 0,0001$).

Klassifikationsergebnisse^a

Geschwindigkeit			Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit			Gesamtsumme
			Gehen	Joggen	Rennen	
Original	Anzahl	Gehen	52	19	11	82
		Joggen	32	21	8	61
		Rennen	8	2	28	38
	%	Gehen	63,4	23,2	13,4	100,0
		Joggen	52,5	34,4	13,1	100,0
		Rennen	21,1	5,3	73,7	100,0

a. 55,8% der ursprünglichen gruppierten Fälle ordnungsgemäß klassifiziert.

Tabelle 22. Klassifikation in die drei Bewegungsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der metrisch erfassten Breite der Blutspurenmuster mit einer richtig-positiven Klassifikation in ca. 56% der Fälle (Wilks-Lambda 0,7; $p < 0,0001$).

Klassifikationsergebnisse^a

Geschwindigkeit			Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit			Gesamtsumme
			Gehen	Joggen	Rennen	
Original	Anzahl	Gehen	64	17	5	86
		Joggen	35	14	12	61
		Rennen	7	5	26	38
	%	Gehen	74,4	19,8	5,8	100,0
		Joggen	57,4	23,0	19,7	100,0
		Rennen	18,4	13,2	68,4	100,0

a. 56,2% der ursprünglichen gruppierten Fälle ordnungsgemäß klassifiziert.

In Hinsicht der Zuordnung der Länge und Breite aller Spurenbilder in die Kategorie „schwingender Arm“ und „festgehaltener Arm“ kann in 69% eine richtig-positive Klassifikation erfolgen. Näher betrachtet lassen sich ca. 58% der Spurenbilder anhand ihrer Länge und Breite (cm) richtig-positiv einem Bewegungsmuster mit einem „frei schwingendem Arm“ zuordnen. Wiederum knapp 79% der untersuchten Blutspurenbilder lassen sich durch Messung der Länge und der Breite (cm) richtig-positiv zuordnen (**Tab. 23**).

Tabelle 23. Klassifikation in die untersuchten bewegungsassoziierten Armpendelbewegungen unter Berücksichtigung der Länge und Breite der Blutspurenmuster (Wilks-Lambda 0,78; $p < 0,0001$).

Klassifikationsergebnisse^a

			Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit		Gesamtsumme
			schwingender Arm	festgehaltener Arm	
Original	Anzahl	schwingender Arm	48	35	83
		festgehaltener Arm	21	77	98
	%	schwingender Arm	57,8	42,2	100,0
		festgehaltener Arm	21,4	78,6	100,0

a. 69,1% der ursprünglichen gruppierten Fälle ordnungsgemäß klassifiziert.

5. Diskussion

5.1. Experimentelles Design

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse basieren auf Experimenten, die zum Ziel hatten, auf standardisierte Weise Tropfspurenmuster zu generieren und zu analysieren, die sich unterschiedlich schnell bewegende Personen hinterlassen, wenn sie an der Hand eine blutende Verletzung aufweisen oder einen blutigen Gegenstand (z.B. Waffe) in der Hand tragen. Es wurde ein Versuchsaufbau mit repetitiven Laufversuchen konstruiert, um reproduzierbare Spurenmuster aus abgetropftem Blut zu erhalten, deren geometrische Dimensionen, Formgebung und Verteilung in Abhängigkeit von der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit der Probanden und ihren assoziierten Armpendelbewegungen untersucht werden konnten. Eine betonierte und überdachte Örtlichkeit wurde insbesondere auf Grund der ebenen Asphaltfläche, aber auch zum Ausschluss etwaiger umweltbedingter Einflussfaktoren, wie Wind oder Niederschlag, ausgewählt.

Für die Experimente wurde humanes Blut gesunder Probanden verwendet, das in geeigneten Reservoirs am Oberarm befestigt wurde, aus denen durch eine druckregulierbare Schlauchanlage Blut in mit frischen Wunden vergleichbaren Mengen abtropfen konnte. Wie bereits im Abschnitt „Material und Methoden“ eingeführt, wurde ferner eine standardisiert über den rechten Handrücken des jeweiligen Probanden ausgeleitete Infusionsschlauchöffnung genutzt, um ein Abtropfen von Blut zu imitieren. Hierdurch sollte zum einen das Szenario einer blutenden Person nachgestellt werden, die sich von einem Ort des Geschehens in unterschiedlichen Geschwindigkeiten entfernt. Zum anderen wurde ein mögliches Szenario simuliert, bei dem ein Tatbeteiligter mit einem blutbehafteten Tatwerkzeug (zum Beispiel einem Messer) unter Zurücklassen einer Tropfspur einen Ort des Geschehens verlässt.

Bei den Experimenten wurden Vorkehrungen zur Einhaltung von Hygienestandards für die Probanden und andere Versuchsteilnehmer (spezielle Schutzanzüge, Handschuhe, Mundschutz) getroffen. Aufgrund des hohen Aufwandes bei der Beschaffung von humanen Blutproben stellte sich die Frage, ob in etwaigen Nachfolgeversuchen auch tierisches Blut (Christman, 1997; Larkin und Banks, 2014) oder Kunstblut verwendet werden könnte. Durch Vorversuche müsste dann in jedem Fall die Vergleichbarkeit hinsichtlich verschiedener physikalischer Parameter wie insbesondere Viskosität, Fließeigenschaften und Trocknungszeit geprüft werden.

Ein konstanter Blutaustritt aus dem Reservoir konnte wegen des sukzessiv abnehmenden Drucks von initial 100 mmHg nur über Laufstrecken von ca. 10 Meter aufrechterhalten werden. Arthur et al. (2015) haben alternativ unter Verwendung eines Spritzenperfusors eine regulierbare konstante Tropfmenge generieren können. Ein entsprechender Versuchsaufbau wäre für die Bewegungsversuche (Gehen / Rennen / Joggen) nicht realisierbar gewesen, so dass eine variabelere Austrittsmenge von Blut nicht gänzlich vermieden werden konnte, jedoch weitestgehend kontrollierte Versuchsbedingungen gewährleistet waren. Bei allen Durchläufen haben sich feste Papierunterlagen mit glatten Oberflächen als geeignet erwiesen. Hierbei spielte insbesondere die geringe Saugfähigkeit der Oberfläche sowie weitgehend fehlende sekundäre Versprenkelungen von Blut (sogenannte Satelliten) auf dem ausgewählten Papier eine wesentliche Rolle. Generell wird nur durch die Verwendung von sehr glatten und dichten Papieroberflächen gewährleistet, dass oberflächenbestimmende Eigenschaften keinen wesentlichen Einfluss auf die Formierung der Blutspuren nehmen (Adam, 2012). In der praktischen Anwendung wird man folglich die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse unter Umständen nicht ohne weiteres auf andersartig beschaffene Oberflächen übertragen können, weil insbesondere grobe Bodenoberflächen, z.B. poröse Fliesen (Terrakotta etc.) oder Betonböden zu anderen Einzelspurformen führen.

Die Ausbildung der nachfolgend diskutierten beiden Grundmuster „*loops*“ und „*waves*“ wird hiervon jedoch nicht tangiert, so dass ein zentraler Teil nachfolgender Aussagen unberührt bleiben. Als nicht gänzlich optimal hat sich die Wahl der Breite der Laufstrecken erwiesen, da insbesondere bei höheren Laufgeschwindigkeiten in einigen Fällen abtropfende Spuren außerhalb der Papierunterlage zu Boden fielen, so dass die nachfolgende metrische Erfassung erschwert war. Da die in dieser Arbeit untersuchten Spurenmuster aus abtropfendem Blut entstehen, wurden Überlegungen zur Tropfengröße/Blutmenge angestellt.

Tropfspuren sind, wie bereits beschrieben, in erster Linie abhängig von der Erdanziehungskraft, wobei das Volumen in Abhängigkeit vom blutbehafteten Werkzeug oder von der Oberfläche des blutbehafteten Areal (zum Beispiel einer Fingerspitze) zu bestimmen ist (Kabaliuk et al., 2013; Laber, 1985; Pizzola et al., 1986). Nach einer Studie von Ross (2006) reicht das Spektrum der gefundenen Blutstropfenvolumina von ca. 30µl bei einem kleinen Küchenmesser bis hin zu 210µl bei einem blutbenetztem Hammer. Im Vergleich ergeben in den vorliegenden Versuchen laut Hersteller *Braun*[®] 20 Tropfen einen Milliliter, was bedeutet, dass ein Tropfen ungefähr ein Volumen von 50µl hat. Nach den Versuchen von Kabaliuk et al. (2013), entspräche dieses Volumen einem weitgehend

passiven Abtropfen von einem Messer mit einer 20cm langen Klinge. Tropfen dieser Größe hinterlassen auf glatten Oberflächen Einzelspuren von ca. 1,3-1,8cm Durchmesser.

In den hier nachgestellten Szenarien wurden jedoch nur zu geringen Anteilen reine Passivspuren erzeugt, da sowohl die unterschiedlich schnelle Fortbewegung der Probanden auf der Laufstrecke (Gehen / Joggen / Rennen) als auch die gleich- oder gegenläufig gerichteten Armpendelbewegungen einen zusätzlichen kinetischen Impact bedingten, so dass sich auch kleinere Blutmengen ablösen konnten und im Vergleich zu reinen passiven Abtropfspuren kleinere Einzelspuren hinterließen. In welchem Ausmaß sich die entstehenden Blutspurenmuster folglich unter Verwendung anderweitiger blutbehafteter Gegenständen (Hammer, Beil) verändern würden, wäre in weiteren Versuchen zu untersuchen. Auch hier gilt, dass die übergeordneten Grundspurenmuster „*loops*“ und „*waves*“ erhalten blieben, die Tropfenpfade jedoch aus Einzeltropfen anderer Größe und Spurendichte bestehen würden.

Eine zuverlässige Vermessung der Blutspuren wurde in den hier durchgeführten Versuchen durch eine standardisierte maßstabsgetreue fotografische Erfassung mit konstant orthograden Objektständen und mit einer für nachträgliche Messungen hinreichenden Bilddetailldichte (Auflösung) sichergestellt. Aufgrund der großen Datenmenge wurde ein einheitliches Dokumentationsschema zur Archivierung der Bilddaten eingehalten.

5.2. Morphometrische Analysen der Blutspurenmuster

Bei der forensischen Blutspurenmusteranalyse bedient man sich einer einheitlichen Nomenklatur zur Beschreibung sowohl des einzelnen Blutstropfens wie auch der aus mehreren Einzelspuren sich bildenden Spurenmuster. Die insbesondere in der amerikanischen Literatur anzutreffende Unterscheidung in aktive und passive Spuren sowie die Klassifikation anhand der vektoriell ausgerichteten Entstehungsvelozität „*low*“, „*medium*“ und „*high velocity*“ war im vorliegenden Versuchsaufbau von untergeordneter Relevanz, da sich diese Einteilung weniger auf die vergleichsweise geringen Geschwindigkeitsunterschiede sich bewegender Personen bezieht, sondern in erster Linie auf deutlich größerer Unterschiede einwirkender Energien bei der Blutspurenentstehung, wodurch langsam bewegte Spuren (z.B. Abtropfen von einer Schräge), mittelgradig beschleunigte Spuren (sogenannte cast-off Spuren) und Hochrasanzspuren (Explosions- und Schussverletzungen) voneinander abgegrenzt werden können. Neben der Musterbildung, die somit grundlegende Rückschlüsse auf die Entstehungsart ermöglicht, liefern auch einzelne Spuren, losgelöst von ihrer etwaigen Zugehörigkeit zu einem Musterbild, aufgrund ihrer

Größe und Form wichtige Hinweise zu ihrer Entstehung und ermöglichen mitunter eine Bestimmung der Bewegungsrichtung sowie eine Unterscheidung zwischen langsamen und schnelleren Bewegungsabläufen (Hulse-Smith und Illes, 2007).

Die im Rahmen der hier durchgeführten Versuche entstandenen Spurenmuster sind als Tropfspurenmuster definierbar, die sich aufgrund der Fortbewegung (Gehen / Joggen / Rennen) als Tropfspurenpfade ausbildeten. Bei diesen Blutspurenmustern handelt es sich nicht - wie bereits weiter oben erörtert - um rein *passive Abtropfspuren*, sondern vielmehr um eine Kombination von Gravitation und dynamischer Be- und Entschleunigung fallender Tropfen. Sie resultieren aus der typischen Fortbewegung des Probanden einerseits und der anteilig gegenläufigen Armpendelbewegung andererseits, wodurch die zu Boden fallenden Blutropfen eine zusätzliche kinetische Energie (sogenannter *spin*) erfahren, die das „Abschleudern“ und die „Flugrichtung“ der sich absetzenden Tropfen wesentlich beeinflusst. Trotz dieser Dynamik der zu Boden fallenden Tropfen blieben in diesen Experimenten die Tropfenformen in allen Bewegungsgeschwindigkeiten nahezu gleich kreisrund und nahmen allenfalls beim Rennen leicht ovale Formen an. Typische „*Bärentatzenformen*“ der Tropfen, wie sie Allen (1975) beschrieb, waren nur sehr selten und zudem gegensätzlich ausgerichtet nachweisbar. Dieser auf den ersten Blick widersprüchliche Befund ist durch die Armpendelbewegungen erklärbar, bei denen es zu der Hauptrichtung entgegengesetzten Rückbewegungen kommt (Rückpendeln), die eine gegenläufige Positionsänderung vortäuschen. Die zusätzlichen Spins beim Auftreten der Füße beim Gehen / Joggen / Rennen führen ferner zu einem - wenngleich unterschiedlich ausgeprägten - stoßartigen Abschleudern mehrerer kleiner Spurengruppen im Sinne sogenannter Tropf-in-Tropfmuster, so dass entgegen der zielgerichteten Lokomotion ein Verharren bzw. Anhalten suggeriert wird.

5.2.1. Geschwindigkeitsabhängige Eigenschaften der Blutspurenmuster in Relation zu bewegungsassoziierten Armhaltungen und Armpendelbewegungen

Ein zentrales Anliegen der vorgelegten Arbeit war eine Analyse der ausgebildeten Blutspurenformen unter rekonstruktiven Gesichtspunkten. Ein forensisch relevanter Gewinn an Informationen ergäbe sich dann, wenn aus verschiedenen Eigenschaften der Spurenmuster, u.a. den Formen und der räumlich metrischen Verteilung Rückschlüsse auf die Entstehungsumstände ermöglicht würden, z.B. zu der Frage, ob die spurenverursachende Person gerannt ist oder nicht. Die Betrachtung der experimentell erzeugten Blutspurenmuster und die anschließenden Analysen der geometrischen Verteilung

der Spuren ließen bereits während der metrischen und fotografischen Erfassung der Blutspuren Zusammenhänge zu Bewegungsgeschwindigkeiten und mit ihnen assoziierten Armpendelbewegungen vermuten. Nachfolgend werden im Detail die morphometrischen Befunde und die Ergebnisse der statistischen Auswertung diskutiert und mit Blick auf ihre praktische Relevanz erörtert.

Bei langsamen Geschwindigkeiten (Gehen) wurden regelhaft als wellenförmig zu beschreibende Blutspurenmuster (*sogenannte „waves“*) beobachtet, und dies vornehmlich bei Laufversuchen mit fixiertem Arm. Die Fixierung wurde erzielt, indem die befestigte artifizielle Blutungsquelle (Lumenöffnung des Infusionsschlauches) aktiv am Körper festgehalten wurde. Es zeigte sich, dass die „waves“ überwiegend bei Bewegungsgeschwindigkeiten bis ca. 2,5 Meter pro Sekunde morphologisch-deskriptiv sicher zu identifizieren waren. Bei höheren Bewegungsgeschwindigkeiten der Probanden (>2,5 Meter pro Sekunde) nahmen die „waves“ zunehmend schleifenförmige Anteile an („loops“) und waren folglich nicht mehr eindeutig unterscheidbar. Versucht man den dahinterliegenden Entstehungsmechanismus zu erörtern, so muss man neben der jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit des Probanden zunächst den Blick auf die individualtypischen Bewegungsabläufe richten und folgende biomechanische Komponenten berücksichtigen.

Aus anthropologischer Sicht ist die Armschwingung ein charakteristisches Merkmal für menschliches Gehen und Rennen (Pontzer et al., 2009). Zusammen mit der Aktivierung der Schultergürtelmuskulatur sorgt die Armpendelbewegung für die Aufrechterhaltung der Stabilität beim Gehen und in zunehmendem Maße beim Rennen (Ballesteros et al., 1965). Die Armschwingung kann somit als ein typisches Element des aufrechten menschlichen Gangbildes angesehen werden und dient hauptsächlich der Aufrechterhaltung der „globalen dynamischen Stabilität“ beim Bewegungsablauf (Bruijn et al., 2013). So führt die Armschwingung nicht nur zu einem balancierten Bewegungsablauf, sondern kompensiert auch Störeinflüsse (Witterung, krankheitsbedingte Mobilitätseinschränkung), die zu einem Sturzereignis führen könnten. Die zusätzliche Armschwingung reduziert bzw. dämpft die Amplitude der Rotation des Oberkörpers um die vertikale Achse ab (Lieberman et al., 2007; 2008). Experimentell wurde aufgezeigt, dass die Schulterrotation, ebenso wie die Rotation des Beckengürtels bei Gehgeschwindigkeiten von rund 1,5 Metern pro Sekunde generell sehr gering ist. Bei rennender Bewegungsgeschwindigkeit (>3 Meter pro Sekunde) ist folglich mit einer signifikanten Zunahme der Schulterrotation zu rechnen (Pontzer et al., 2009).

Im Gegensatz zu den vornehmlich bei langsamen Bewegungen und festgehaltenem Arm entstandenen „waves“ waren nicht nur Muster, die bei schnelleren Bewegungen der Probanden entstanden zunehmend bogen- bis schleifenförmig, sondern auch diejenigen Spurenkomplexe, die bei Bewegungsabläufen mit „*frei schwingendem Arm*“ generiert wurden. Für die Morphologie der Tropfspurenmuster war somit nicht nur die Bewegungsgeschwindigkeit, sondern auch die Frage nach der Armhaltung relevant. Der physiologische Hintergrund dieses morphologischen Befundes kann wie folgt interpretiert werden: Bei frei schwingendem Arm kommt es zusätzlich zu den hin- und her gegenläufig ausgerichteten Pendelbewegungen an der Kehrtwende jeweils zu kleineren bogenförmigen Auslenkungen zur Seite hin, wodurch der schleifenförmige Charakter entsteht, der umso ausgeprägter erscheint, je größer die mit der Geschwindigkeit wachsenden Auslenkungen sind. Werden im Gegensatz hierzu die Armschwingung bzw. das Armpendeln aktiv unterlassen, ist bei größeren Geschwindigkeiten der Probanden mit einer vermehrten Rotation des Torsos (Arellano und Kram, 2014) zu rechnen, um die erhöhte Instabilität des Bewegungsablaufes zu reduzieren (Bruijn et al., 2010). Zusätzlich werden bei ausbleibender Armschwingung eine kompensatorisch erhöhte Schulter- und Kopfdrehung beobachtet (Pontzer et al., 2009). Hierdurch erhalten die zunächst wellenförmigen Muster zunehmend schlaufenartige Anteile.

Das experimentelle Setting mit fixiertem Arm zum Halten der Blutreserve ist dabei nicht als wirklichkeitsferne Anordnung zu werten, sondern entspricht insofern realitätsnahen Bedingungen, als auch bei Verletzungen oder beim Tragen von Gegenständen der Arm/Hand weitest möglich festgehalten werden und im Vergleich mit Bewegungsabläufen eines Unverletzten nicht oder weniger pendeln. Um die Eigenschaften der unterschiedlichen Tropfspurenformen im Detail zu erfassen, wurde das Ausmaß der Beeinflussung der bewegungsassoziierten Armpendelbewegung im Sinne eines „*frei schwingenden Arms*“ und eines am Körper „*festgehaltenen Arms*“ auf die beschleunigten Blutspurenbilder *getrennt nach den jeweiligen Geschwindigkeitsklassen* geprüft.

Zusammenfassend kann zur Formgebung der Tropfspurenmuster die Regel formuliert werden, dass die „waves“ vorzugsweise beim Gehen mit einem am Körper fixiert gehaltenen Arm registriert werden, während bei schnelleren Bewegungen (Rennen) und frei schwingendem Arm von den herabfallenden Tropfen nahezu ausschließlich „loop“-artige Spurenbildern erzeugt werden. Während die Wellenform auf eine erhöhte Rotationsbewegung des Oberkörpers sowie des Schultergürtels zurückzuführen ist, entsteht die schlingenförmige Anordnung der Tropfspuren durch die mit zunehmender

Geschwindigkeit wachsenden Armpendelbewegungen. Diese zunächst rein morphologisch-deskriptive Unterscheidung in „waves“ oder „loops“ belegt, dass eine erste Einschätzung zu Bewegungsmustern und Bewegungsgeschwindigkeiten bereits anhand der Formprägung von Tropfspurenmustern erfolgen kann.

Bei der nachfolgenden multivariaten metrischen Erfassung der Dimensionen der abgrenzbaren Blutspurenmuster ergaben sich weitere interpretierbare Befunde. Unabhängig von der durchgeführten Armbewegung nahmen alle Blutspurenmuster sowohl in ihrer Länge, als auch in ihrer Breite mit wachsender Bewegungsgeschwindigkeit signifikant zu. Ein Einfluss der beiden Armbewegungsalternativen „*schwingender Arm*“ versus „*festgehaltener Arm*“ auf die durchschnittlich erzielbaren Bewegungsgeschwindigkeiten innerhalb der untersuchten drei Klassen (Gehen / Joggen / Rennen) war dabei nicht erkennbar. ($p > 0,05$). Dies impliziert, dass im Versuch ein bewusstes Fixieren des Armes die erreichbare Bewegungsgeschwindigkeit nicht wesentlich beeinflusste: Die durch einen schwingenden Arm erzeugten „loops“ zeigten einen geschwindigkeitsabhängigen Zuwachs der Blutspurenmusterlängen- und breiten auf. Die Vermessung der Länge und Breite der „loops“ ergab signifikante Unterschiede bei Betrachtung aller drei Geschwindigkeitsklassen (ANOVA; $p < 0,0001$).

Bei Detailbetrachtung wurde sichtbar, dass auch im dualen Vergleich zwischen den Geschwindigkeitsklassen „Gehen“ und „Rennen“ hochsignifikante Unterschiede in Bezug auf die beiden Parameter nachweisbar waren ($p < 0,0001$). Als Erklärung dient die deutliche Zunahme der Armschwingung beim Rennen im Vergleich zum Gehen. Die Unterschiede der Bewegungsgeschwindigkeiten waren hingegen beim Gehen und beim Joggen nicht groß genug, um auch signifikante Unterschiede der Spurenlängen- und breiten zu bewirken ($p > 0,05$). Als Ursache hierfür ist anzuführen, dass bei den niedrigen Bewegungsgeschwindigkeiten noch eine weitgehende Kontrolle der Armbewegungen gelingt, so dass bei fehlender oder nur geringer Rotation des Oberkörpers auslandende Armpendelbewegungen weitgehend ausbleiben. Auch wenn der Laufstil nicht gänzlich unberücksichtigt bleiben kann und interindividuell stark variiert, so gilt dennoch, dass mit steigender Bewegungsgeschwindigkeit ein statistisch hochsignifikanter ($p < 0,0001$) Schrittlängenzuwachs verbunden ist. Der Anstieg der Schrittlänge war erwartungsgemäß besonders ausgeprägt beim Joggen und beim Rennen. Dieser Befund ist zu erklären durch die beim Joggen und Rennen durch Schwung entstehenden Zwischenphasen, bei denen beide Füße kurzzeitig keine Bodenhaftung besitzen. Diese Feststellung ist deshalb bedeutsam, weil beim jeweiligen Auftreffen der Füße (aus der Luft) auf den Boden stärkere

Stoßkräfte mit kurzzeitigen Entschleunigungsenergien freigesetzt werden, die zu einem markanten, musterprägenden Abschleudern von Blutspuren führen. Die bei größeren Bewegungsgeschwindigkeiten zunehmenden Armauslenkungen und Rotationsbewegungen des Oberkörpers bedingen zudem eine deutlichere Schleifenbildung der Blutspurentropfpfade. Auch wenn der parallele Zuwachs der Messwerte eine positive Korrelation und einen dabei statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Länge der „loops“ und der Schrittlänge belegten ($p < 0,0001$), ließen sich gleichermaßen und grafisch gut erkennbar (**Abb. 33**) eine mit wachsender Geschwindigkeit zunehmende Streuung der Messwerte und ein entsprechend niedrigeres Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0,25$) erkennen. Hieraus wird ersichtlich, dass die Befunde nicht im Sinne eines kausal erklärbaren und formal linearen Zusammenhanges zwischen der Schrittlänge und der Länge der „loops“ interpretiert werden können. Neben der hohen Variationsbreite der Schwunglänge der Arme ($SD_{\text{Rennen}} \pm 100,7\text{cm}$) unterliegt das jeweilige Bewegungsausmaß unterschiedlichen biomechanischen Einflussfaktoren, u.a. interindividuellen und auch geschlechtsspezifischen Schwankungen, die an dieser Stelle nicht weiter untersucht wurden.

Im Gegensatz zu den Ausführungen und Ergebnissen zu den „loop“-artigen Tropfspurenmustern entstanden - wie bereits zuvor diskutiert- vornehmlich bei niedriger Fortbewegungsgeschwindigkeit bei einem am Körper festgehaltenen Arm vordergründig wellenförmige Blutspurenmuster („waves“). Auch diese Muster wiesen ebenfalls einen geschwindigkeitsabhängigen Zuwachs der Messwerte für die Breite und Länge auf (ANOVA; $p < 0,0001$). Die Analyse zur Datenverteilung zeigte einen geschwindigkeitsabhängigen Anstieg der Streuung für beide Parameter „Länge“ und „Breite“ der „waves“ (Länge $SD_{\text{Rennen}} \pm 45,9$; Breite $SD_{\text{Rennen}} \pm 13$). Als plausible Erklärung für diesen Befund dienen individuelle Bewegungsmuster mit unterschiedlich starker Rotation des Oberkörpers und individuell variierender Intensität der Schulterdrehung, die insbesondere bei größeren Fortbewegungsgeschwindigkeiten als stabilisierender Bewegungsbestandteil intensiver eingesetzt werden, sich als Bewegungskomponente bei fixiertem Arm direkt auf diesen übertragen und somit die Musterbildung der abtropfenden Spuren prägen. Überraschend war, dass sich statistisch signifikante Unterschiede der metrischen Längen der „wave“-Spuren nur zwischen joggender und rennender Bewegungsgeschwindigkeit nachweisen ließen. Versucht man dieses Ergebnis zu interpretieren, so wird man zunächst das Argument anführen können, dass ein bewusstes Fixieren des Armes sowohl den natürlichen Ablauf einer joggenden, als auch einer rennenden Bewegung behindert und die Bewegungsabläufe

und Bewegungsgeschwindigkeiten ausbremst. Aus den Videoaufnahmen war gut zu erkennen, dass beim Joggen eine Kontrolle der Armfixierung noch ansatzweise gelang, während beim Rennen zunehmend starke Rotationsbewegungen im Schultergürtel vollzogen und als Bewegungsstabilisatoren eingesetzt wurden. Als Ergebnis dieses zunehmenden Kontrollverlustes bezüglich der intendierten Armfixierung nahmen die Auslenkungen der „blutenden“ Extremität erst beim Rennversuch überproportional zu. Die deutliche Zunahme der Streuwerte der Auslenkungen kann als Ausdruck zunehmend instabiler Laufmuster interpretiert werden ($SD_{\text{Gehen}} \pm 19,5$; $SD_{\text{Joggen}} \pm 11,1$; $SD_{\text{Rennen}} \pm 45,9$). Innerhalb der untersuchten drei Geschwindigkeitsklassen konnten statistisch hochsignifikante Unterschiede der Spurenlängen nachgewiesen werden ($p < 0,0001$). Jedoch kann allein anhand einer solchen Längen- und Breitenbestimmung und ohne Zuordnung der Tropfspurenpfade zu einer der beiden Formklassen „loop“ versus „wave“ keine hinreichend verlässliche Aussage darüber getroffen werden, ob der blutende Arm geschwungen oder fixiert gehalten wurde. Unzuverlässig sind somit Rekonstruktionen zum vermeintlichen Bewegungsbild in den Fällen, in denen aufgrund von Artefakten eine eindeutige Musterzuweisung in „loop“ versus „wave“ nicht gelingt oder in denen Mischbilder auftreten.

Hinsichtlich des Tropfendurchmessers der exemplarisch zwischen Laufmeter 5 und 6 gezählten insgesamt 349 Tropfen ließ sich eine armbewegungsassoziierte Abhängigkeit der Tropfengröße innerhalb einer Geschwindigkeitsklasse nicht feststellen. Auch zwischen den Bewegungsklassen waren von gehender zu joggender Bewegungsgeschwindigkeit keine signifikanten Unterschiede der Tropfendurchmesser nachweisbar ($p > 0,05$). Erst ab einer Bewegungsgeschwindigkeit über 2m/s (Vergleich Geschwindigkeitskategorie „Joggen“ zu „Rennen“) konnte eine signifikante Abnahme der Tropfendurchmesser in der Kategorie „Rennen“ ($p < 0,0001$) beobachtet werden. Die beim Rennen erfassbare Abnahme der Tropfengröße lässt sich dahingehend deuten, dass erst mit zunehmender Geschwindigkeit der kinetische Impact auf die „blutende“ Extremität als zusätzlich einwirkende Energie ausreicht, um die Oberflächenspannung von Blut zu überwinden, so dass sich nunmehr auch kleinere (leichtere) Tropfen lösen können. Bei der Nahbetrachtung der „loop“- und „wave“-artig gestalteten Tropfspurenkomplexe fielen an den Schlaufen-Enden der Muster sogenannte *Tropf-in-Tropf Anteile* auf. Bei der quantitativen Auszählung zeigte sich, dass die Intensität der *Tropf-in-Tropfmuster* sich umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit verhielt ($p < 0,0001$), während eine statistisch belegbare Abhängigkeit von der jeweiligen Armpendelbewegung nicht beobachtet wurde ($p > 0,05$). Die Wahrscheinlichkeit ineinander tropfender Blutspuren mit auf ein und demselben Kollisionsfeld zusammenfallenden Tropfen

steigt mit abnehmendem Bewegungsradius des blutigen Gegenstandes oder des blutenden Körperteils, d.h. bei fehlender oder besonders langsamen Bewegungen, weshalb in statischen Situationen, z.B. bei einer verharrenden Körperhaltung intensivere *Tropf-in-Tropfmuster* beobachtbar sind, als bei hochdynamischen Handlungen. Mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit ändert sich auch die ballistische Flugbahn des von einer Blutungsquelle gelösten Tropfens. Die jeweilige Flugkurve des Bluttropfens kann annähernd mit einer Wurfparabel beschrieben werden (**Abb. 2**), wobei die Auftreffgeschwindigkeit des fallenden Tropfens auch vom Luftwiderstandskraft abhängt. Die Luftwiderstandskraft nimmt mit sinkender Geschwindigkeit ab, was zu einer geringeren Verzögerung des fallenden Tropfens führt. Die relative Bewegungsänderung des fallenden Tropfens im Vergleich zur Bewegungsrichtung des Probanden ist insbesondere bei dem Richtungswechsel der Armpendelbewegung hoch. Dies erklärt neben den oben diskutierten Effekten die vorwiegende Lokalisation von *Tropf-in-Tropfmuster* an der Basis und an den Polen der „loops“, bzw. der „waves“, die die Richtungsänderung der Armpendelbewegung widerspiegeln.

Aus diesen Überlegungen und den zuvor diskutierten Ergebnissen lässt sich somit die Schlussfolgerung ableiten, dass die Intensität und Dichte der geschwindigkeitsabhängigen *Tropf-in-Tropfmuster* zusätzlich in die Gesamtanalyse einbezogen werden sollte. Auch hier gilt jedoch, dass Rückschlüsse auf die Armhaltung anhand der *Tropf-in-Tropfmuster* nicht zulässig sind.

5.2.2. Diskriminanzmodell zur Schätzung der Zugehörigkeit zu einer Geschwindigkeitsklasse anhand metrischer Merkmalsausprägungen der Blutspurenmuster

Während in den vorherigen Ausführungen gezeigt werden konnte, dass die morphologische Spurenanordnung der beim Fortbewegen hinterlassenen Tropfenmuster Rückschlüsse auf etwaige Armhaltungen ermöglicht und ferner die metrischen Dimensionen der als „loops“ oder „waves“ abgrenzbaren Muster offenkundig von den Bewegungsgeschwindigkeiten abhängen, wurde durch die Verwendung eines mathematischen Diskriminanzmodells versucht, anhand der erhobenen metrischen Merkmale die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer der drei Geschwindigkeitsklassen Gehen / Joggen / Rennen ($\text{Mittelwert}_{\text{Gehen}} = 1,3\text{m/s}$; $\text{Mittelwert}_{\text{Joggen}} = 2,4\text{m/s}$ und $\text{Mittelwert}_{\text{Renner}} = 4,1\text{m/s}$) möglichst zuverlässig zu schätzen.

Die dabei gewonnenen biostatistischen Ergebnisse zeigen, dass anhand der beiden metrisch erfassten Eigenschaften Länge und Breite der Blutspurenbilder in 89,2% der untersuchten Fälle eine korrekte Unterscheidung zwischen „Gehen“ und „Rennen“ gelingt. Betrachtet man alle drei Geschwindigkeiten, so konnte in lediglich rund 59% aller untersuchten Fälle eine richtige Zuordnung der Blutspuren zur jeweiligen Geschwindigkeitsgruppe erfolgen. Diese Unsicherheit ließ sich darauf zurückführen, dass vor allem joggende Probanden falsch klassifiziert und nur in 27,9% der Fälle der richtigen Geschwindigkeitsklasse zugeordnet wurden. Gleichzeitig wurden 54,1% der tatsächlich joggenden Probanden fehlerhaft der Geschwindigkeitsklasse „Gehen“ zugeschrieben und 18% unzutreffend in die Klasse „Rennen“ eingruppiert. Dieser Befund lässt vermuten, dass der Übergang von Gehen zum Joggen, bzw. von joggender in rennende Geschwindigkeit weniger scharf getrennt und eher fließend erfolgt. Sichtbar wird der vergleichsweise geringe Unterschied auch an der geringen maximalen Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den drei Geschwindigkeitsklassen von 1,7 Metern pro Sekunde. Bei der weiteren Analyse des zuvor angeführten Befundes, wonach eine Unterscheidung zwischen „Gehen“ und „Rennen“ in ca. 9 von 10 Fällen korrekt erfolgt, fiel auf, dass die Zuordnung zur Klasse „Gehen“ mit insgesamt 93,9% richtiger Klassifikationen deutlich zuverlässiger ausfällt, als die Zuweisung zur Klasse „Rennen“, die nur in 78,9% der Fälle zutreffend gelang.

Für den praktischen Alltag wird man somit als Ergänzung der morphologischen Beschreibung der Einzeltropfen sowie der entstandenen Tropfspurenmuster zur Komplettierung eine Bestimmung der metrischen Dimensionen (Länge und Breite) der „loops“ und „waves“ empfehlen können. Unter Anwendung der Diskriminanzfunktion (Df1) kann in den meisten Fällen zutreffend eingeschätzt werden, ob die spurenverursachende Person gegangen oder gerannt ist:

$$Y = -2.648 + 0.08 \times (\text{Spurenbreite}) + 0.18 \times (\text{Spurenlänge})$$

$$\text{Trennwert} = 0.399$$

$$Y > 0.399 = \text{Rennen}$$

$$Y < 0.399 = \text{Gehen}$$

5.3. Schlussfolgerungen und praktische Anwendung

Bezogen auf die am Anfang der Arbeit formulierten Hypothesen sind zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen möglich:

- A) Bei gehenden Geschwindigkeiten entstehen vornehmlich „waves“ bei gleichzeitig am Körper fixiertem Arm (beispielsweise bei einer blutenden Armverletzung).
- B) Wird der blutende oder blutbehaftete Arm beim Fortbewegen frei geschwungen, entstehen unabhängig der Bewegungsgeschwindigkeit „loops“ mit einem schlaufenartigen Tropfspurencharakter.
- C) Durch die Vermessung der Länge und Breite dieser Spurenkomplexe kann unter Anwendung der hier entwickelten Diskriminanzfunktion eine Unterscheidung zwischen einer gehenden und einer rennenden Bewegungsgeschwindigkeit in ca. 90% der Fälle gelingen. Erhält man durch Eingeben in die Formel (Df1) ein Ergebnis, welches kleiner ist als der berechnete sogenannte Trennwert ($tw = 0,399$), dann wird man die Spur der Geschwindigkeitsklasse „Gehen“ zuordnen können, während anderenfalls davon ausgegangen werden kann, dass die Spur von einer sich rennend fortbewegenden Person gesetzt wurde.
- D) Der Durchmesser einzelner Blutropfen innerhalb der „loops“ und „waves“ gibt keine zuverlässigen Hinweise auf die Richtung und Bewegungsgeschwindigkeit einer sich wegbewegenden, blutbehafteten Person, da insbesondere beim Zurückschwingen des Armes gegenläufige Bewegungsphasen auftreten.
- E) Zusätzlich lassen *Tropf-in-Tropfmuster* eine langsame Bewegungsgeschwindigkeit vermuten, wohingegen keine Aussagen über die Armhaltung getroffen werden können.

In der vorgelegten Arbeit wurden Tropfspurenmuster untersucht und analysiert, die von sich bewegenden Personen mit blutenden Verletzungen oder mitgeführten blutbehafteten Objekte gesetzt worden waren.

Der gewählte Ansatz einer engen Verknüpfung visueller Elemente (Form und geometrische Ausbreitung der Blutspuren), mit quantifizierbaren metrischen Eigenschaften (Länge und Breite eines Blutspurenmusters) erwies sich als einer rein beschreibenden Erfassung der Blutspuren überlegen. Daraus lässt sich die Empfehlung ableiten, dass bei der forensischen Blutspurenanalyse sowohl morphologische, deskriptiv beschreib- und klassifizierbare Eigenschaften, als auch quantitativ metrische Befunde erfasst und in die

Auswertung einbezogen werden sollten. Diese Empfehlung bezieht sich dabei sowohl auf die einzelne Blutspur, als auch auf die durch viele Einzelspuren gebildeten Spurenmuster. In der praktischen Fallarbeit können die mitgeteilten Befunde zur Anwendung kommen, wenn Überlegungen zur Dynamik des Nachtatgeschehens, zur Frage etwaiger Fluchtversuche oder damit zusammenhängenden Einschätzungen der Handlungsfähigkeit anzustellen sind.

Konkret lässt sich für die zukünftige Tatortarbeit die Empfehlung formulieren, dass im Falle anzutreffender Tropfspurenpfade neben einer allgemeinen Inspektion der Versuch einer morphologischen Einordnung der Spurenbilder in „loops“ oder „waves“ unternommen werden und eine Vermessung der Länge und Breite der Spurenbilder erfolgen sollte. Dabei erscheint folgende schrittweise Vorgehensweise in der Regel zweckmäßig:

1. Trifft man an einem Tatort Blutspurenkomplexe in Form von Tropfspuren auf dem Boden an, so sollten nach erster allgemeiner Inspektion zunächst fortlaufende Übersichtsaufnahmen (mit Maßstab) des gesamten Spurenkomplexes gefertigt werden.
2. Anhand der Verteilung der Tropfspurenmuster sollte - wo immer möglich - bereits zu diesem Zeitpunkt eine Unterscheidung zwischen „loops“ und „waves“ versucht werden, weil hiervon weitere zeitaufwendige Untersuchungsschritte (Vermessungen) abhängen können. Die Befunde sollten auf standardisierte Weise dokumentiert werden, indem z.B. zusammenhängende Tropfspurenpfade in alphabetische oder fortlaufend nummerierte Abschnitte eingeteilt werden. Alternativ kann das Markierungssystem des Erkennungsdienstes der Polizei in die Dokumentation übernommen werden. Ziel dieser Vorgehensweise ist eine zuverlässige räumliche und geometrische Zuordnung der Spurenkomplexe.
3. In einem nachfolgenden Arbeitsschritt sollten weitere Detail- und Nahaufnahmen der Spurenkomplexe erfolgen, die auch nachträglich eine digitale metrische Analyse ermöglichen.
4. Der nachfolgenden metrischen Erfassung der Spurenlänge, der Spurenbreite sowie zusätzlicher metrischer Eigenschaften (z.B. Abstand von einer Wand) selektiv ausgewählter Einzelspuren sollte sich jeweils eine ergänzende Fotodokumentation wichtiger Einzelspuren anschließen.
5. Die metrischen Befunde werden abschließend, soweit notwendig, für Berechnungen des Ursprungsortes (sogenannte Point of Origin Calculation) einer Blutspur und mithilfe der

hier vorgestellten Diskriminanzanalyse zur Abschätzung vorherrschender Bewegungsgeschwindigkeiten genutzt.

6. Literaturverzeichnis

1. Bundesgesundheitsamt (2011) Anforderungen an die Hygiene bei Punktionen und Injektionen. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 54:1135-1144
2. Adam CD (2012) Fundamental studies of bloodstain formation and characteristics. Forensic Sci Int 219:76-87
3. Allen RF (1975) The role of surface tension in splashing. Journal of colloid and interface science 51:350-351
4. Arellano CJ, Kram R (2014) The metabolic cost of human running: is swinging the arms worth it? J Exp Biol 217:2456-2461
5. Armitage P, Berry G, Matthews JNS (2002) Statistical methods in medical research. 4th ed. Blackwell Science
6. Arthur RM, Cockerton SL, de Bruin KG, Taylor MC (2015) A novel, element-based approach for the objective classification of bloodstain patterns. Forensic Sci Int 257:220-228
7. Attinger D, Moore C, Donaldson A, Jafari A, Stone HA (2013) Fluid dynamics topics in bloodstain pattern analysis: comparative review and research opportunities. Forensic Sci Int 231:375-396
8. Bachhiesl C (2010) [Traces of blood. The significance of blood in criminology at the turn of the 19th century]. Ber Wiss 33:7-29
9. Ballesteros ML, Buchthal F, Rosenfalck P (1965) The Pattern of Muscular Activity during the Arm Swing of Natural Walking. Acta Physiol Scand 63:296-310
10. Balthazard V, Piedelievre R, Desoille H, Derobert L (1939) Etude des Gouttes De Sang Projecte. XXII Congress De Medicine Legale, Paris, France
11. Bevel T, Gardner R (2008) Bloodstain Pattern Analysis. Taylor&Francis, Boca Raton
12. Brinkmann B (1988) [Expert opinion on biologic stains. Determination of status, future trends]. Z Rechtsmed 100:39-54
13. Buck U, Kneubuehl B, Nather S, Albertini N, Schmidt L, Thali M (2011) 3D bloodstain pattern analysis: ballistic reconstruction of the trajectories of blood drops and determination of the centres of origin of the bloodstains. Forensic Sci Int 206:22-28
14. Bundesärztekammer (2010) Richtlinien zur Gewinnung von Blut und Blutbestandteilen und zur Anwendung von Blutprodukten (Hämotherapie)- aufgestellt gemäß §§12a und 18 Transfusionsgesetz von der Bundesärztekammer im Einvernehmen mit dem Paul-Ehrlich-Institut. Deutscher Ärzte-Verlag Richtlinienanpassung

-
15. Carter AL (2001) The Directional Analysis of Bloodstain Patterns Theory and Experimental Validation. *Canadian Society of Forensic Science Journal* 34:173-189
 16. Christman D (1997) A study to compare and contrast animal blood to human blood product, Virginia Dep. Forensic Sci. Bloodstain Pattern Analysis Training manual Section 4.2.3.1
 17. de Bruin KG, Stoel RD, Limborgh JC (2011) Improving the point of origin determination in bloodstain pattern analysis. *J Forensic Sci* 56:1476-1482
 18. deGennes P, Brochart-Wyart F, Quéré D (2003) *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*. Springer, New York.
 19. Hulse-Smith L, Illes M (2007) A blind trial evaluation of a crime scene methodology for deducing impact velocity and droplet size from circular bloodstains. *J Forensic Sci* 52:65-69
 20. Hulse-Smith L, Mehdizadeh NZ, Chandra S (2005) Deducing drop size and impact velocity from circular bloodstains. *J Forensic Sci* 50:54-63
 21. James S, Kish P, Sutton T, Paulette T (2005) *Principles of bloodstain pattern analysis: Theory and practice*. Taylor&Francis -CRC Press: Boca Raton.
 22. Kabaliuk N, Jermy MC, Morison K, Stotesbury T, Taylor MC, Williams E (2013) Blood drop size in passive dripping from weapons. *Forensic Sci Int* 228:75-82
 23. Kettner M, Ramsthaler F, Schnabel A (2010) "Bubbles"-a spot diagnosis. *J Forensic Sci* 55:842-844
 24. Laber TL (1985) Diameter of a bloodstain as a function of origin: distance fallen, and volume of drop. *Int. Assoc. Bloodstain Pattern Analysts News* 2:12-16
 25. Larkin BA, Banks CE (2014) Exploring the applicability of equine blood to bloodstain pattern analysis. *Med Sci Law*
 26. Lieberman DE, Bramble DM, Raichlen DA (2007) Integration of the head and forelimb in bipedal hominids. *J Morphol* 268:1099
 27. Lieberman DE, Bramble DM, Raichlen DA, Whitcome KW (2008) Abstracts of AAPA poster and podium presentations. *American Journal of Physical Anthropology* 135:57-229
 28. MacDonell H (1971) *Flight characteristics and stain patterns of human blood*. Law Enforcement Assistance Administration, National Institute of Law Enforcement and Criminal Justice, Washington
 29. MacDonell H (1992) *Segments of History: The Literature of Bloodstain pattern interpretation*. Segment 00: Literature through the 1800's. *International Association of Bloodstain Pattern Analyst News* 8:3-12

-
30. Peschel O, Kunz SN, Rothschild MA, Mutzel E (2011) Blood stain pattern analysis. *Forensic Sci Med Pathol* 7:257-270
 31. Piotrowski E (1895) Ueber Entstehung, Form, Richtung und Ausbreitung der Blutspuren nach Hiebwunden des Kopfes. *Virchows Jahresbericht* 449
 32. Pizzola PA, Roth S, De Forest PR (1986) Blood droplet dynamics -I. *J Forensic Sci* 31:36-49
 33. Pontzer H, Holloway JH 4th, Raichlen DA, Lieberman DE (2009) Control and function of arm swing in human walking and running. *J Exp Biol* 212:523-534
 34. Ramsthaler F, Peschel O, Rothschild M (2015) Forensische Blutspurenmusteranalyse.
 35. Raymond MA, Smith ER, Liesegang J (1996) Oscillating blood droplets -implications for crime scene reconstruction. *Sci Justice* 36:161-171
 36. Ross ES (2006) The study of bloodstain patterns resulting from the release of blood drops from a weapon. Chemistry, The University of Auckland, Auckland.
 37. Bruijn SM, Meijer OG, Beek PJ, van Dieen JH (2010) The effect of arm swing on human gait stability. *Journal of Experimental Biology* 213:3945-3952
 38. Bruijn SM, Meijer OG, Beek PJ, van Dieen JH (2013) Assessing the stability of human locomotion: a review of current measures. *J R Soc Interface* 10
 39. Silbernagel S, Despopoulos A (2007) *Taschenatlas Physiologie*. Stuttgart; New York: Thieme
 40. Woolson T (1995) Documentation of bloodstain pattern evidence. *J Forensic Ident* 45:396
 41. Ziemke E (1914) Die Untersuchung von Blutspuren. In: Lochte T: *Gerichtsärztliche und polizeiärztliche Technik* 152-215

7. Anhang

7.1. Publikationen

Ramsthaler R, Birngruber C, **Kröll A-K**, Kettner M, Verhoff MA (2016) Über die Farbdetailtreue in der digitalen forensischen Fotografie. Arch Krim 237:190-203

Ramsthaler F, **Kröll A-K**, Verhoff M, Birngruber CG, Kettner M. (2017) Effect of anticoagulation therapy on drying times in bloodstain pattern analysis. Int J Legal Med. 2017 Jul; 131(4):955-961. Doi: 10.1007/s00414-017-1599-1. Epub 2017 May 2.

Ramsthaler F, **Kröll A-K**, Kettner M (2017) Duration and Intensity of chemiluminescence of different luminol kits. Rechtsmedizin 2017 Juni; 27(3):185-190.

Kröll A-K, Wetter C, Schmidt P, Schäfer N (2017) Tödlicher berufsspezifischer Suizid mit Eibennadeln Rechtsmedizin, Springer Verlag, published online 09.June 2017 <https://doi.org/10.1007/s00194-017-0169-7>.

Kröll A-K, Kettner M, Schmidt P, Ramsthaler F (2017) A novel experimental approach for classifying blood trails in relation to three different speeds of movement. Rechtsmedizin, Springer Verlag, DOI: 10.1007/s00194-017-0202-x.

7.2. Kongressbeiträge

Kröll A-K, Kettner M, Schlote J, Schmidt P, Ramsthaler F. Die Abhängigkeit beschleunigter Blutspurenmuster von Laufgeschwindigkeiten und bewegungsassoziierten Armpendelbewegungen. Posterbeitrag zur 94. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin, 2015.

Ramsthaler F, Schlote J, Birngruber C, Kettner M, **Kröll A-K**, Verhoff M. Farbdetailtreue in der Forensischen Fotografie. Posterbeitrag zur 94. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin, 2015.

Kröll, A-K, Schäfer N, Wetter C, Schmidt P. Todbringendes Teekränzchen- Kasuistik eines berufsbezogenen Suizids. Posterbeitrag zur 95. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin 2016.

Kröll, A-K, Kettner M, Cappel-Hoffmann S, Ramsthaler F. Über den Einfluss des Lagerungsalters von handelsüblichen Luminollösungen auf Dauer, Intensität und DNA-Beeinflussung von latenten Blutspuren. Vortrag zur 95. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin 2016.

Kröll. A-K, Schäfer N, Kiefer A, Schmidt P. Sudden death of an Infant after Unwitnessed Ingestion of a Button Battery. Posterbeitrag zur 96. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin 2017.

Kröll A-K, Schäfer N, Schmidt P, Ramsthaler F. Leg(th)al Drug Store Weapons- Sniffing Death following Hair Spray Inhalation. Posterbeitrag zur 96. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin in Kombination mit der ISALM 2017 (10th International Symposium Advances in Legal Medicine)

Schäfer N, Wojtyniak JG, **Kröll A-K**, Koerbel C , Laschke MW, Lehr T, Menger MD, Maurer HH, Meyer MR, Schmidt P (2017) Toxicokinetic modelling of JWH-210, RCS-4, and THC in pig serum after pulmonary administration. Beitrag zur 96. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin in Kombination mit der ISALM 2017 (10th International Symposium Advances in Legal Medicine).

7.3. Buchbeiträge

Ramsthaler F, **Kröll A-K** (2015) Das LBS-HUT System der Blutspurendokumentation. Lehmanns Media Berlin, Forensische Blutspurenmusteranalyse, 15:163-165, ISBN 978-3-86541-751-0.

Ramsthaler F, **Kröll A-K**, Schmidt P (2015) Mustererkennung und die visuelle Formenvielfalt der Blutspuren. Lehmanns Media Berlin, Forensische Blutspurenmusteranalyse,16:167-170, ISBN 978-3-86541-751-0.

7.4. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen recht herzlich danken, die zur Entstehung der vorliegenden Dissertation beigetragen haben.

Insbesondere danken möchte ich Univ.-Prof. Dr. Peter Schmidt für die Überlassung dieses interessanten und spannenden Themas sowie auch der Möglichkeit, am Institut für Rechtsmedizin der Universität des Saarlandes arbeiten zu dürfen. Durch ihre stetige Unterstützung und ihre konstruktive Kritik haben sie entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Priv. Doz. Dr. med. Dr. (H) Frank Ramsthaler möchte ich für die unermüdliche Betreuung zur Verwirklichung der Arbeit danken.

Einen großen Dank möchte ich auch an meine Familie und Freunde richten. Marco, du Sportskanone! Insbesondere danken möchte ich Christina, die sowohl bei der Durchführung, als auch bei der Ausarbeitung der Ergebnisse einen wesentlichen Beitrag geleistet hat.

Bei allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Instituts für Rechtsmedizin bedanke ich mich für die allzeit gute Zusammenarbeit, Freundlichkeit, Offenheit und Hilfsbereitschaft.

Dem Universitätsklinikum Homburg möchte ich für die freundliche Kooperation und Bereitstellung der Räumlichkeiten danken.

Danke.

