

# **Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf**

Institut für Rechtsmedizin

Institutsdirektor Prof. Dr. med. Klaus Püschel

## **Spektroskopische Untersuchung des zeitlichen Verlaufes der Intensität und Wegdrückbarkeit von Totenflecken**

**Dissertation**

Zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

Der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

Vorgelegt von

Christian Ryan Roy Wessel

geboren in Hamburg

Hamburg 2019

Abgenommen von der Medizinischen Fakultät am: 03.02.2020

Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der/die Vorsitzende:

Prof. Dr. Klaus Püschel

Prüfungsausschuss, 2. Gutachter/in:

PD Dr. Jakob Matschke

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1. Livores mortis .....	- 1 -
1.2. Reflexionsspektroskopie .....	- 5 -
1.3. Optische Eigenschaften der Haut und des Hämoglobins .....	- 6 -
1.4. Spektrometrische/-skopische Untersuchungen in der Medizin .....	- 9 -
1.5. Arbeitshypothese.....	- 14 -
<b>2. Material und Methoden .....</b>	<b>- 15 -</b>
2.1. Untersuchungsgut .....	- 15 -
2.2. Spektrometer .....	- 16 -
2.3. Messverfahren .....	- 19 -
2.4. Messungen .....	- 20 -
2.5. Datenverarbeitung .....	- 21 -
<b>3. Ergebnisse .....</b>	<b>- 23 -</b>
3.1. Auswertung des Untersuchungsgutes .....	- 23 -
3.2. Verlauf der Spektren .....	- 24 -
3.3. Verlauf der Wegdrückbarkeit Daumendruck .....	- 27 -
3.4. Verlauf der Wegdrückbarkeit Spektroskop.....	- 28 -
3.5. Vergleich der Spektren und Wegdrückbarkeit im zeitlichen Verlauf. -	31 -
3.6. Verlauf der Ausprägung .....	- 33 -
3.7. Verlauf der Farbe .....	- 34 -
3.8. Verlauf der Konfluenz.....	- 35 -
3.9. Verlauf der Umgebungstemperatur .....	- 36 -
3.10. Verlauf der Hauttemperatur .....	- 37 -
3.11. Verlauf der Körperkerntemperatur .....	- 39 -
3.12. BMI .....	- 41 -
<b>4. Diskussion .....</b>	<b>- 42 -</b>
4.1. Diskussion der Methode .....	- 42 -
4.2. Diskussion der Ergebnisse.....	- 43 -
4.3. Ausblick .....	- 45 -

<b>5. Zusammenfassungen.....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>5.1. Zusammenfassung in Deutsch .....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>5.2. Summary in English .....</b>	<b>- 48 -</b>
<b>6. Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>- 49 -</b>
<b>7. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>- 51 -</b>
<b>8. Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>- 55 -</b>
<b>9. Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>- 57 -</b>
<b>10. Danksagung .....</b>	<b>- 58 -</b>
<b>11. Lebenslauf.....</b>	<b>- 59 -</b>
<b>12. Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>- 61 -</b>

# **1. Einleitung**

## **1.1. Livores mortis**

Totenflecken (lat.: livores mortis) bilden sich 20 - 30 Minuten nach irreversiblen Herz-Kreislauf-Stillstand als frühestes sicheres Todeszeichen aus (Hofmann, 1927). Durch die Hypostase senkt sich das Blut entsprechend der Schwerkraft in die zu unterst liegenden Körperpartien ab. Teilweise kann es bereits agonal durch die nachlassende Pumpleistung des Herzens zu lokalen Staseerscheinungen zum Beispiel an den Wangen - den Kirchhofrosen - kommen.

Die äußerlich sichtbaren Totenflecken entstehen durch eine sogenannte Senkungsblutfülle der Kapillaren in der Dermis. Zunächst bilden sich kleine hellrötliche Flecken, die mit zunehmender Todeszeit zu größeren Arealen konfluieren. Aufgrund der Sauerstoffabnahme durch Atmungs- und Abbauprozesse erscheinen die Totenflecken im Normalfall in blau-violetten (lividen) Farbtönen. Im Areal der Hypostase kann es bei noch nicht koagulierte Blut zu Kapillarrupturen kommen, die als Leichenfleckenblutungen (lat.: vibices) bezeichnet werden.

Die Farbveränderungen bei Totenflecken können Hinweise auf nicht natürliche Todesursachen sein. Hellrote Totenflecken findet man zum Beispiel bei einer Zyanid- oder Kohlenmonoxidintoxikation. Dabei erscheinen Totenflecken bei einer Kohlenmonoxidintoxikation kirschrot, wenn die Carboxyhämoglobinkonzentration mehr als ein Drittel der normalen Hämoglobinderivate übersteigt. Ähnliche Phänomene zeigen sich bei einer Kälteexposition des Leichnams (Bohnert, Schulz, Belenkaia, & Liehr, 2007). Dabei bewirkt der Temperaturabfall eine Linksverschiebung der Hb-O<sub>2</sub>-Dissoziationskurve und begünstigt so eine Diffusion von Sauerstoff durch die Haut, was ebenfalls hellrote Totenflecke zur Folge hat.

Bei äußerem und innerem Blutverlust sowie bei Anämie können Totenflecken unter Umständen sehr schwach ausgeprägt sein, während sie bei plötzlichen Todesfällen aus inneren Ursachen sehr intensiv sein können.

Je nach Auffindungssituation kommt es an den Auflageflächen des Leichnams mit dem Untergrund zu einer Aussparung der Totenflecken, da dort der Auflagedruck den hydrostatischen Druck übersteigt. So zeigt ein auf dem Rücken Verstorbener Totenflecken an der Körperrückseite mit typischen Aussparungen an Schulter, Gesäß, Fersen und Hautfalten (Madea & Dettmeyer, 2007).

Die Verlagerbarkeit und Wegdrückbarkeit von Totenflecken nehmen mit zunehmender Todeszeit kontinuierlich ab. Durch die transkapilläre Plasmaextravasation kommt es in den Kapillaren zu einer Erhöhung der Hämoglobinkonzentration. Dadurch wird das Blut „eingedickt“, was eine Verlagerbarkeit und Wegdrückbarkeit im postmortalen Verlauf deutlich erschwert (Bakulev, 1966).

Wesentlich später kommt es zur Hämolyse und Hämoglobindiffusion mit folgender Fixation der Totenflecken und beginnender Fäulnis. Die Wegdrückbarkeit wird in der Literatur in die Kategorien vollständig und unvollständig wegdrückbar eingeteilt. Dabei wird zwischen leichtem stumpfen mit z.B. dem Daumen oder Glasspatel und scharfkantigem Druck mit z.B. einer Pinzettenspitze unterschieden. Vollständig wegdrückbar wären Totenflecken, die bei leichtem Druck mit einem Glasspatel oder Daumen vollständig verblassen würden. Unvollständig wegdrückbar wären hingegen Totenflecken, die eine Verblassung auf scharfkantigem Druck mit zum Beispiel einem Pinzettengriff oder -spitze zeigen würden (s. Abbildung 1).



Abbildung 1: links - leichte Wegdrückbarkeit der Totenflecke auf geringem stumpfen Druck, rechts – Totenflecke nur noch auf scharfkantigen Druck mit Pinzettenspitze bzw. -griff wegdrückbar (Madea B. , 2007)

Die Zeiten für die Grenzen der Wegdrückbarkeit sind jedoch sehr unterschiedlich angegeben. Eine Darstellung der Eigenschaft der Totenflecke und ihre zeitliche Beziehung zur Todeszeit (s. Tabelle 1) zeigt eine vollständige Wegdrückbarkeit bis 20 h post mortem und eine unvollständige Wegdrückbarkeit bis 30 h post mortem (Madea B., 2006).

Beginn	15 - 20 min pm
Konfluenz	0,5 - 2 h pm
Flächenhaft konfluiert	4 - 10 h pm
Vollständig wegdrückbar	10 - 20 h pm
Unvollständig wegdrückbar	10 - 30 h pm

Tabelle 1: Eigenschaften der Totenflecke und ihre zeitliche Beziehung zur Todeszeit (Nach Angaben von Naeve (Neave W., 1978)) (Madea B., 2006)

Eine weitere Darstellung zeigt die vollständige Wegdrückbarkeit auf Daumendruck bis zu 20 h pm (Anders S., Raupach T., & Sehner S., 2019), die unvollständige Wegdrückbarkeit auf starkem Druck (Messer, Pinzette) bis 36 h pm auf (Madea & Dettmeyer, 2007).

Eine Erfassung der Durchschnittswerte der Daten der Eigenschaft der Totenflecke und ihre zeitliche Beziehung zur Todeszeit von den Angaben in der Literatur von 1905 bis 1963 sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Stadium	Durchschnittswert	Streuung (s)	Untere Grenze der 95,5 %igen Wahrscheinlichkeit (2s)	Obere Grenze der 95,5 %igen Wahrscheinlichkeit (2s)
Beginn	0,75	0,5		2
Konfluieren	2,5	1	0,75	4,5
Größte Ausdehnung und Intensität	9,5	4,5	0,5	18,25
Vollständige Wegdrückbarkeit auf Daumendruck	5,5	6		17,5
Unvollständige Wegdrückbarkeit auf starken Druck	17	10,5		37,5

Tabelle 2: Eigenschaften der Totenflecke und ihre zeitliche Beziehung zur Todeszeit nach Angaben der Literatur 1905 bis 1963 unter Annahme einer symmetrischen Verteilung um den Durchschnittswert berechnet. (Madea B., 2006)

Diese Daten bilden gleichzeitig die Grundlage für die Auswahl der Messzeitpunkte dieser Arbeit.

Weitere Einflussgrößen für die Ausbildung und Ausprägung der Totenflecke sind:

-Blutmenge

-Zustand des Leichenblutes (flüssig, geronnen)

-Gewebeverfall

-konstitutionelle Einflüsse (Alter, Gefäßwände)

-Hämatokrit

-Hämolysegeschwindigkeit

-Temperatur

-Todesursache (entzündliche Erkrankungen, Einflusstauung)

(Brinkmann & Madea, 2004)

## **1.2. Reflexionsspektroskopie**

Die Spektroskopie ist ein Teilgebiet der Physik, die sich mit der Erzeugung, Analyse, Interpretation und Anwendung von Spektren elektromagnetischer Strahlung beschäftigt. Wird die Intensität einer Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge, Teilmasse oder anderen charakteristischen Größen quantitativ gemessen, spricht man von Spektrometrie.

Ferner differenziert man die Spektroskopie auch nach der Art der Wechselwirkung in Absorptionsspektroskopie, Emissionsspektroskopie, Fluoreszenzspektroskopie, Streuspektroskopie, nichtlineare Laserspektroskopie und Reflexionsspektroskopie (Brockhaus, 2003).

Die Reflexionsspektroskopie dient dabei der Untersuchung von reflektierter elektromagnetischer Strahlung, durch deren quantitative Analyse Details über die Eigenschaften des zu untersuchenden Materials dargestellt werden sollen. Diese wird vor allem bei festen Körpern angewendet. Das Reflexionsspektrometer enthält meist eine Lichtquelle mit bekanntem Spektrum sowie einen Detektorbereich, der die reflektierte Strahlung des ausgesendeten Lichtstrahls erfassen kann. Verschiedene Materialien besitzen dabei unterschiedliches Vermögen elektromagnetische Strahlung bestimmter Wellenlänge zu absorbieren bzw. zu reflektieren. Der Farbeindruck eines Materials entsteht dabei durch die reflektierte elektromagnetische Strahlung im für den Menschen sichtbaren Spektrum im Wellenlängenbereich von 380 – 780 nm (s. Abbildung 2: Electromagnetic Wave Spectrum Horst Frank, Jailbird and Phrood, 17.März 2008).

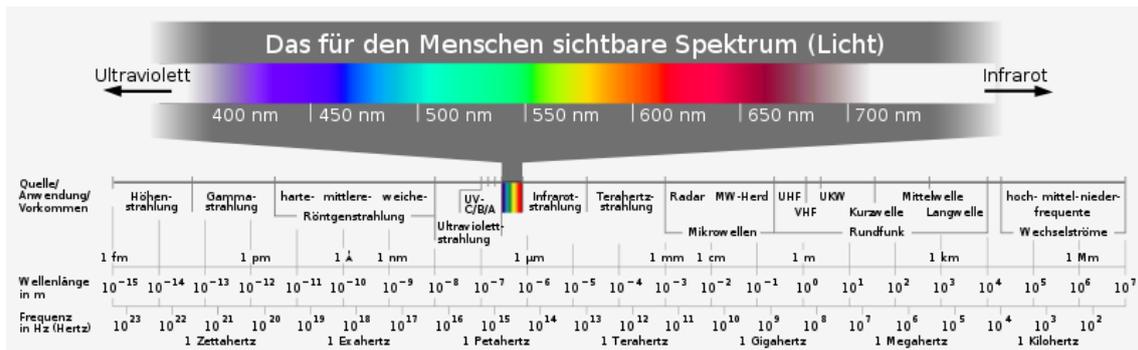


Abbildung 2: Electromagnetic Wave Spectrum Horst Frank, Jailbird and Phrood, 17.März 2008

Das Reflexionsspektrometer misst die Intensitäten der Wellenlängen einer Probe, die reflektiert werden, wodurch der Farbeindruck charakterisiert und objektiviert werden kann. Dabei unterscheiden sich Materialien in ihrer Reflektanz, sprich dem Verhältnis zwischen der Intensität der einfallenden und reflektierten elektromagnetischen Strahlung. Durch für bestimmte Materialien charakteristischen Reflexionsmaxima bzw. -minima lassen sich Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Probe ziehen, die die mikroskopische Struktur, chemische Zusammensetzung oder physiologischen Eigenschaften der Probe näher beschreiben können.

### 1.3. Optische Eigenschaften der Haut und des Hämoglobins

Die wichtigsten optischen Effekte in Bezug auf die Haut sind Reflexion, Streuung und Absorption.

Die Reflexion tritt an Grenzflächen aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes von Haut ( $n = 1,37 - 1,5$ ) und Luft ( $n = 1$ ) auf. Dabei kommt es beim Übergang des Lichtstrahls von Luft in die Haut zur Reflexion eines Teils des Lichtstrahls, der bei angegebenen Brechungsindizes ( $n$ ) bei senkrechtem Lichteinfall eine Reflexion von 4% des einfallenden Lichtes ergibt ( $R = \text{Reflexionsgrad}$ ).

$$R = \frac{(n_{Luft} - n_{Haut})^2}{(n_{Luft} + n_{Haut})^2}$$

Wird der Lichtstrahl nicht senkrecht gehalten erhöht sich der Anteil des reflektierten Lichts.

Die Lichtteilchen treffen in der optisch trüben Haut auf viele verschiedene Streuzentren, die die Photonen überwiegend mehrfach streuen. Diese Streuobjekte sind vor allem Zellen mit deren Organellen, Pigmente, Kollagen und Gefäße. Bei der Streuung spielen die Anzahl der Streuzentren ( $N$ ) und die Wellenlänge ( $\lambda$ ) des verwendeten Lichts eine wesentliche Rolle, die bereits 1871 von Lord Rayleigh durch den Schwächungskoeffizienten ( $h$ ) für die Intensitätsveränderung des Lichts beschrieben wurde:

$$h \approx \frac{1}{N\lambda^4}$$

Die Veränderung der Lichtintensität ist dabei umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge, d.h. im sichtbaren Spektralbereich wird blaues Licht deutlich stärker gestreut als rotes Licht. Dies gilt jedoch nur an Streuzentren, die mindestens einen Faktor 10 kleiner sind als die verwendete Wellenlänge. Sind die Streuzentren gleich groß oder größer als die Wellenlänge des verwendeten Lichts, wird die Streuung durch andere Mechanismen wie die ebenfalls wellenlängenabhängige Mie-Streuung beschrieben:

$$h \approx \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

Neben der Reflexion und Streuung des Lichts wird die Absorption an Chromophoren (griech.: Farbträger) in der Haut als ein wichtiger optischer Effekt in Bezug auf die Haut beschrieben. Der einfachste Zusammenhang der Absorption ist durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben:

$$E_\lambda = -\lg\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = \varepsilon_\lambda \cdot c \cdot d$$

$E_\lambda$  = Extinktion (Absorbance des Materials für das Licht der Wellenlänge  $\lambda$ )

$I_1$  = Intensität des transmittierten Lichtes [ $\text{Wm}^2$ ]

$I_0$  = Intensität des einfallenden Lichtes [ $\text{Wm}^2$ ]

$\epsilon_\lambda$  = dekadischer Extinktionskoeffizient der Wellenlänge [ $\text{m}^2\text{mol}^{-1}$ ]

$c$  = Stoffmengenkonzentration [ $\text{mol}^{-1}$ ]

$d$  = Schichtdicke [m]

Die lichtabsorbierenden Chromophoren der Haut sind im Wesentlichen die verschiedenen Derivate des Hämoglobins, Melanine und Wasser (Bäumler, 2006).

Hauptzielgröße in dieser Dissertation ist der rote Blutfarbstoff, das Hämoglobin.

Das Hämoglobin ist ein Chromoprotein. Es besteht aus einer Eiweißkomponente den vier Polypeptidketten, die bei Erwachsenen in der Regel aus zwei  $\alpha$ -Polypeptidketten und zwei  $\beta$ -Polypeptidketten bestehen. Jede Polypeptidkette enthält je eine Farbstoffkomponente, die als Häm bezeichnet wird. Dabei enthält jede Polypeptidkette ein zentrales zweiwertiges Eisenatom. Dieses Zentralatom geht mit molekularem Sauerstoff eine koordinative Bindung ein – aus einem Hämoglobin entsteht ein Oxyhämoglobin. Diese Reaktion bezeichnet man als Oxygenierung, da sich die Wertigkeit des Eisens dabei nicht verändert. Entsprechend ist die  $\text{O}_2$ -Abspaltung eine Desoxygenierung. Dies ist entscheidend für die spektralen Eigenschaften des Hämoglobins. Die rote Farbe des arteriellen Blutes ist dadurch bedingt, das Hämoglobin kurzwelliges Licht (Blauanteil des Spektrums) relativ stärker absorbiert als den langwelligeren Rotanteil (Thews, Mutschler, & Vaupel, 2005).

Die höchsten Extinktionen leiten sich dabei aus den Porphyrinstrukturen des Häms ab. Alle Hämoglobine zeigen bei der Spektralanalyse eine charakteristische Absorptionsbande, die sogenannte Soret-Bande bei 400 nm (Löffler, Petrides, & Heinrich, 2007).

Während oxygeniertes Hämoglobin zwei Maxima bei Wellenlängen im gelbgrünen Spektralgebiet von 541 nm und 577 nm aufweist zeigt desoxygeniertes Hämoglobin im sichtbaren Spektrum eine einzige breite Absorptionsbande bei 555 nm (Thews, Mutschler, & Vaupel, 2005).

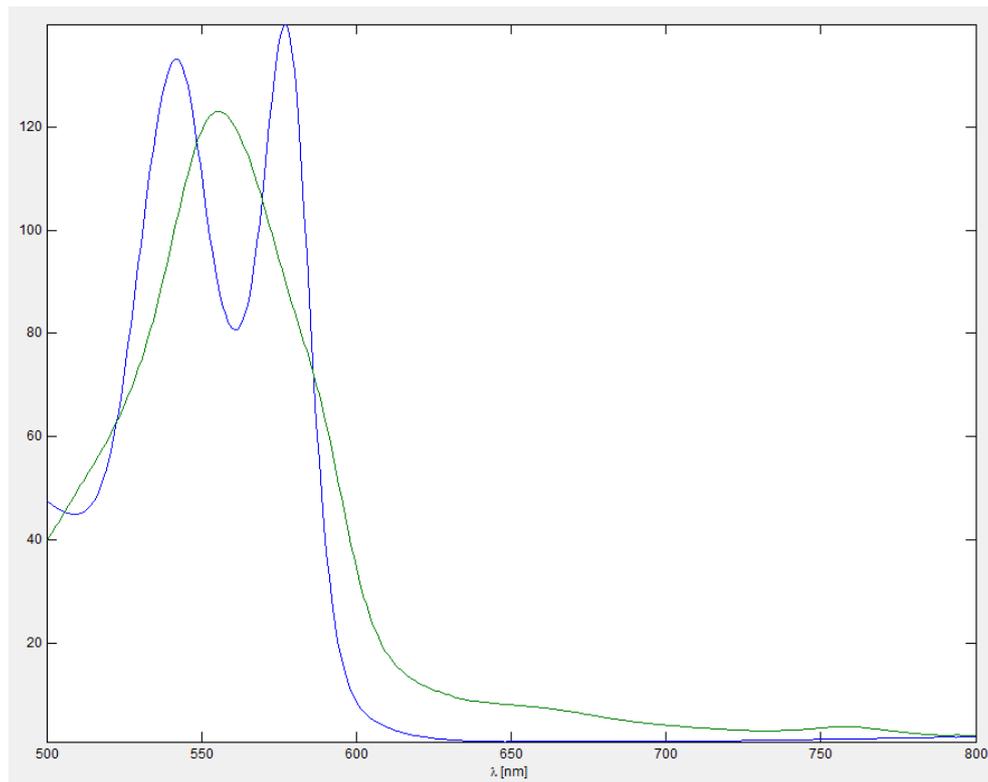


Abbildung 3: Referenzspektren des Oxyhämoglobins ( $\text{HbO}_2$  – blau) und des desoxygenierten Hämoglobins (Hb - grün) im sichtbaren Spektralbereich von Dermalog

Ein weiterer Unterschied der Spektren von oxygeniertem und desoxygeniertem Hämoglobin zeigt sich im Nahinfrarotbereich. Hier kommt bei desoxygeniertem Hämoglobin ein zusätzliches Maximum bei 760 nm hinzu, welches beim oxygeniertem Hämoglobin fehlt (s. Abbildung 3: Referenzspektren des Oxyhämoglobins ( $\text{HbO}_2$  – blau) und des desoxygenierten Hämoglobins (Hb - grün) im sichtbaren Spektralbereich von Dermalog).

#### 1.4. Spektrometrische/-skopische Untersuchungen in der Medizin

Erste literarisch dokumentierte spektrophotometrische Untersuchungen verschiedener Hämoglobinderivate in der gerichtlichen Medizin wurden 1922 von Dr. Walther Schwarzacher durchgeführt. Dabei nannte er den Begründer der Spektrophotometrie

Vierordt, der 1873 als erster geeignete Instrumente für die Spektrophotometrie konstruierte (Schwarzacher, 1922).

1929 wurde die menschliche Haut spektrophotometrisch durch Brunsting & Sheard untersucht, um die Hautfarbe des Menschen zu Erfassen und zu charakterisieren (Brunsting & Sheard, 1929).

Lins et al. befassten sich 1968 erstmalig mit der farblichen Charakterisierung von Leichenhaut durch die Auswertung von Reflexionsspektren, die in Abhängigkeit zum Todeszeitpunkt aufgenommen wurden. Dabei entnahmen sie Hautstanzen von 38 Leichen, die bei 18 – 20 °C und 1 – 2 °C gelagert waren, aus dem Rücken- und Brustbereich. Diese wurden bei einem Wellenlängenbereich von 360 - 750 nm reflexionsspektrometrisch untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass vor allem bei der Rückenhaut nach 25 Stunden eine Abnahme der Intensität bei 560 nm zu sehen war, die nach 46 Stunden in je ein Reflexionsminimum bei 541 nm und 576 nm überging. Eine in physiologischer Kochsalzlösung verdünnte und auf Filterpapier aufgetragene Blutlösung wurde im Vergleich dazu reflektionsspektrometrisch gemessen und zeigte die gleichen Intensitätsabnahmen bei 541 nm und 576 nm auf. Man könnte annehmen, dass die Veränderung der Leichenhaut durch die Hämoglobinderivate verursacht worden seien, die ähnliche Reflexionsspektren ausweisen. Neben der zeitlichen Abhängigkeit der Veränderung der Remissionskurven der Leichenhaut, beschrieb er die Temperaturabhängigkeit in Bezug auf die Veränderung der Leichenhaut. Die Entwicklung des zweigipfligen Reflexionsspektrums der Leichenhaut dauerte laut seiner Beobachtung bei Leichen, die bei 1 – 2 °C gelagert wurden, annähernd doppelt so lang, wie bei denen, die bei 18 – 20°C gelagert wurden (Lins G. , 1968).

Ähnliche Untersuchungen wurden auch an lebender menschlicher Haut durchgeführt, wobei man sich auf die Hämoglobinbande um 541 nm – 576 nm konzentrierte. Die Messungen an der Daumenballeninnenseite wurden bei unterschiedlicher Pigmentierung, Hyperventilation und Stauung durchgeführt. Nach dreiminütiger Stauung des Unterarmes bei 200 mmHg verstrich das zweigipflige Reflexionsminima bei 541 nm und 576 nm des oxygenierten Hämoglobins zu einem eingipfligen Reflexionsminimum bei 555 nm, was dem desoxygenierten Hämoglobin entspricht (Lins G. , 1968).

1973 führten Hunnius et al. quantitative Druckmessungen an Totenflecken zur Bestimmung der Todeszeit durch, die eine exponentielle Abnahme der Wegdrückbarkeit aufwies. V.a. in den ersten 24 h war die Streuung der Druckstärke an den Messpunkten, an denen sich durch Druck die stärkste Farbänderung zeigte am geringsten. Unterschiede für Alter, Geschlecht, Körperbau, Ausdehnung und Intensität der Totenflecken, sowie Umgebungstemperatur und Todesursache wurden signifikant verschiedene Regressionen gefunden (Hunnius, Mallach, & Mittmeyer, 1973).

Für die Auswertung von einem Fragebogen bezüglich der Abhängigkeiten von Totenflecken vom Leichenalter wurden 1970/1971 erstmalig maschinelle Datenverarbeitung angewendet, um die Eingrenzung der Wegdrückbarkeit der Totenflecke von 271 Fällen zu vereinfachen (Mittmeyer, 1971) (Mallach & Mittmeyer, 1971).

1973 benutzte Lins für die computergestützte Auswertung der Remissionskurven von Totenflecken das CIE-Normvalenz-System. Dabei wurde die trichromatische Farbwahrnehmung nach der Young-Helmholtz-Theorie der Physiologie des menschlichen Auges mit den physikalischen Ursachen des Farbreizes (Farbvalenz) verknüpft. Die Farbigkeit wurde nach der Normfarbtafel im Koordinatensystem den x- und z-Werte zugeteilt, die y-Werte entsprachen der Helligkeit, wobei der Wert  $y=100$  als weiß definiert wurde. Die Normfarbwertanteile (x, y und z) für die Totenflecke wurde errechnet und ihr Farbort in der Normfarbtafel dargestellt (Lins G. , 1973).

Bohnert et. al bezogen ihre Untersuchungen von 1998 der postmortalen Leichenfleckfarbe zur Differenzierung von v.a. CO-Hb mit dem Spektrophotometer MCS 400 der Firma Carl-Zeiss-Jena GmbH ebenfalls auf das CIE-Lab-System (Bohnert, Weinmann, & Pollak, 1999).

Weitere Messungen an artifiziellen Blutergüssen (Lins & Hamper, 1970), an der Grünfäule der Leichenhaut (Lins & Kutschera, 1974) und an der Bestimmung des Blutfleckenalters (Lins & Blazek, 1982) wurden durchgeführt, wobei die Auswertung der beiden letzten Messungen ebenfalls im CIE-Normvalenz-System erfolgte.

Angeregt durch diese Arbeiten führten Schuller et al. ähnliche Versuche zur Farbortmessung an Totenflecken durch, wobei sie die Helmholtzschen-Maßzahlen mit den Kenngrößen Helligkeit, Farbton und Sättigungsgrad als objektive Kennzeichnung

der Farbe eines Körpers bei Totenflecken und Blässe miteinander verglichen. Linear zum Todeszeitpunkt im Zeitbereich von 3 – 15 Stunden pm verhielten sich die beschriebenen Parameter für Farbton (bunttongleiche Wellenlänge), Helligkeit (Hellbezugswert) und Sättigungsgrad (spektrale Farbanteil). Bei Blässe wurde eine Reduzierung der bunttongleichen Wellenlänge um 2nm ph und eine Erhöhung des Hellbezugswertes um 0,7% ph, bei Totenflecken eine Reduzierung der kompensativen bunttongleichen Wellenlänge um etwa 1 nm ph, eine Erhöhung des spektralen Farbanteils um 0,01 % ph und eine Reduzierung des Hellbezugswertes um 1,5 % ph gemessen (Schuller, Pankratz, & Liebhardt, 1987).

Bei anknüpfenden Untersuchungen zur Bestimmung des Farbortes von Totenflecken wurde die Wegdrückbarkeit mit in dessen Beziehung gesetzt. Dabei wurde an 61 Leichen Remissionsspektren im postmortalen Verlauf aufgenommen und ausgewertet. Die Druckausübung betrug 0 – 30 kg in verschiedenen Abstufungen. Der Hellbezugswert, die bunttongleiche Wellenlänge und der spektrale Farbanteil wurden in Abhängigkeit zur postmortalen Liegezeit und Druckausübung gemessen. Ein steiler Anstieg des Hellbezugswertes bei geringer Krafteinwirkung korrelierte mit kurzen Liegezeiten von bis zu 20 h pm, ein flacher Anstieg bei höherer Krafteinwirkung mit längeren Liegezeiten von 20 – 40 h pm. Ab 40 h pm traten kaum noch Veränderungen des Hellbezugswertes auf. Vergleichbare exponentielle Abhängigkeiten der druckabhängigen Änderungen zur postmortalen Liegezeit fanden sich bei der bunttongleichen Wellenlänge. Bei doppelt logarithmischer Auftragung ergaben die Werte einen linearen Zusammenhang. Regressionsgrade und Konfidenzintervalle konnten berechnet werden. Die druckabhängige Änderung des spektralen Farbanteils war eher gering (Schuller, Pankratz, Wohlrab, & Liebhardt, 1988).

Andere Untersuchungen zur Wegdrückbarkeit durch länger andauernden statischen Druck und deren Temperaturabhängigkeit fanden durch Fechner et.al. Einzug in die wissenschaftliche Literatur. Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigte die zeitlichen Grenzen der manuellen Wegdrückbarkeit weitgehend der damals bekannten Literatur entsprechend, sowie eine unlineare Charakteristik der Wegdrückbarkeit von Totenflecken in Abhängigkeit der Lagerungstemperatur mit großer interindividueller Variation (Fechner & Koops, 1982) (Fechner, Koops, & Henßge, 1984).

1993 wurden kalorimetrische Messungen im CIE-Lab-System, welches, wie oben erwähnt, dem physiologischen Sehen sehr ähnelt, an Leichen durchgeführt, um die Auswirkung von Druck und Zeit auf Totenflecke zu untersuchen. Dabei wurden Druckstärken bis zu 80 N verwendet und aufgezeigt, dass sich bei steigenden Druckstärken und im zeitlichen Verlauf (von 4 h - 48 h post mortem) die Intensität der Helligkeit (L), der Rot-Anteil (a) und der Gelb-Anteil (b) des von den Photosensoren aufgenommenen Lichts abnahmen und auf weitere Druckerhöhungen kaum noch veränderten, was auf eine Nicht-Wegdrückbarkeit der Totenflecke schließen ließ (Kaatsch, Stadler, & Nietert, 1993).

1994 folgten weitere Untersuchungen durch Kaatsch et. al. zur Objektivierbarkeit der Wegdrückbarkeit von Totenflecken durch Messung der Farbveränderung bei computergesteuerten ansteigenden Druckstärken im zeitlichen Abstand von 10 h pm (Kaatsch, Schmidtke, & Nietsch, 1994).

Darauf aufbauend wurde 1996 eine neue Methode zur Berechnung der Todeszeit durch P. Arriens veröffentlicht. Dabei wurde mit einer Konstruktion aus Kraftmessung und farbmtrischer Erfassung die Veränderung der Farb- und Helligkeitswerte auf zunehmenden Druck (0 - 90 Newton) untersucht. Diese Arbeit ergab eine Einteilung von vier charakteristischen Kurvenverläufen, die sogenannten „Zeitklassen“ des postmortalen Intervalls von bis 5 h pm, 5 - 15 h pm, 13 - 30 h pm und ab 30 h pm mit der Möglichkeit der Berechnung des Todeszeitpunktes aus drei Messungen in den Abständen von jeweils fünf Stunden (Arriens, 1996).

2005 veröffentlichten Bohnert et al. reflexionsspektrometrische Untersuchungen von hellroten Totenflecken an 32 Leichen vom kaukasischen Hauttyp. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation, einer mathematischen Nachbildung von sehr komplexen, stochastischen Systemen, die das optische Verhalten der Haut widerspiegeln soll, wurde die Differenzierung zwischen dem Carboxyhämoglobin (Hb-CO) bei einer Kohlenmonoxidintoxikation und dem reoxygenierten Hämoglobin (O<sub>2</sub>-Hb), welches bei Kälteexposition ebenfalls hellrot erscheint, möglich. Dabei war die positive Korrelation bei höherem CO-Hb-Gehalt im Blut größer als bei niedriger CO-Hb-Konzentration (Bohnert, Walther, Roths, & Honerkamp, 2005).

Typische Veränderungen der Spektren im 500 – 600 nm Bereich lassen sich durch Kühlung der Leiche auf 10,3 °C erzielen. Charakteristisch waren nach durchschnittlich

44,9 Stunden Kühlung die zweigipfligen Spektren, die auf die Reoxygenierung von Hämoglobin zurückzuführen waren und jeweils ein Maximum bei 560 nm und zwei Minima bei 541 und 576 nm aufwiesen (Bohnert, Schulz, Belenkaia, & Liehr, 2007).

Daran angelegte spektrometrische Untersuchungen zur Reoxygenierung des Hämoglobins in Totenflecken bei postmortaler Kälteexposition wurden 2009 als Dissertation eingereicht (Schulz, 2009).

### **1.5. Arbeitshypothese**

Ein altes immer wiederkehrendes Problem der Rechtsmedizin ist die Bestimmung der Todeszeit. Es finden verschiedene Untersuchungen zur Eingrenzung der Todeszeit Anwendung. Unter anderem wird die Wegdrückbarkeit der Totenflecken durch Daumendruck des Untersuchers geprüft. Hierbei kann es naturgemäß zu Druckunterschieden kommen. In Kooperation mit der Firma Dermalog wurde ein Gerät entwickelt, welches mittels Reflexionsspektrometrie Spektren von Totenflecken zu verschiedenen vorher definierten Druckstärken messen kann. Im Rahmen der Doktorarbeit soll die klassische Methode der Wegdrückbarkeit von Totenflecken mit dem Daumendruck mit der neuen Methode mittels eines mit einem Drucksensor ausgestatteten Spektroskops verglichen werden. Dabei werden die zeitlichen Grenzen der Intensität und Wegdrückbarkeit von Totenflecken untersucht und geprüft, ob diese neue Methode zur Charakterisierung des zeitlichen Verlaufes der Wegdrückbarkeit von Leichenflecken besser geeignet ist, als die klassische Methode.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1. Untersuchungsgut**

Es wurden an 40 Verstorbenen spektroskopische Untersuchungen durchgeführt. Davon wurden drei Fälle verworfen, da die Spektren aufgrund technischer Schwierigkeiten und Verschiebung des Transmissionsgitters des Spektrometers nicht auswertbar waren. 37 Fälle mit insgesamt 66.536 spektroskopischen Einzelwerten wurden in eine Datenbank aufgenommen und statistisch ausgewertet.

Als Einschlusskriterien wurden das Lebensalter größer als 16 Jahre und ein bekannter Todeszeitpunkt, der auf mindestens 30 Minuten genau eingrenzbar war, definiert.

Die Ausschlusskriterien für die Auswahl der Fälle waren Faktoren, die zu Veränderung der Totenflecken im Messbereich durch Veränderung der Eigenschaften des Blutes und Umgebungsvariablen führen könnten. Darunter wurden Anasarka im Messbereich, starker Blutverlust zum Beispiel durch ein Polytrauma verursacht, bekannte Anämie, bekannte Gerinnungsstörung, Zeichen einer todesursächlichen Hyper- oder Hypothermie und ein Beginn Messreihe größer als 11.5 h post mortem. Die 37 ausgewerteten Fälle erfüllten alle diese Kriterien.

Es wurden keine invasiven Eingriffe an den Leichnamen vorgenommen, beziehungsweise die durchgeführten Blutentnahmen entsprachen dem geregelten Procedere eines jeden eingelieferten Leichnams im Institut für Rechtsmedizin. Alle Daten wurden anonymisiert erfasst und gespeichert, und alle fotografischen Aufnahmen so angefertigt, dass der oder die Verstorbene nicht identifizierbar war, entsprechend dem Hamburgischem Krankenhausgesetz (HmbKHG) §12(1).

## 2.2. Spektrometer

Das für die Messungen verwendete Handspektrometer mit den Außenmaßen inklusive des Sensorkopfes von 136 mm x 100 mm x 40,5 mm wurde von der Firma Dermalog entwickelt. Es handelt sich um einen Prototyp eines 2D-Transmissions-Spektrometers, welches die Messungen in Reflexion in einem Wellenlängenbereich von 500 – 850 nm durchführt (s. Abbildung 4: 3D-Aufbau des Reflexionsspektrometers, Dermalog 17.03.2010 und Abbildung 7: Reflexionsspektrometer, Dermalog 17.03.2010).

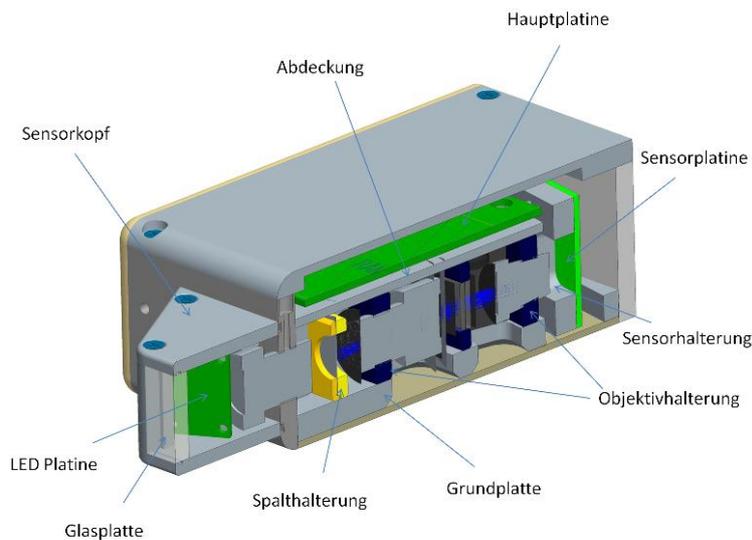


Abbildung 4: 3D-Aufbau des Reflexionsspektrometers, Dermalog 17.03.2010

Das Licht wird aus der Objektebene (Auflagefläche 20 mm x 17 mm) durch das NIR-optimierte Eingangsobjektiv auf den Eingangsspalt mit einer Spaltgröße von 25  $\mu\text{m}$  abgebildet. Das Licht wird anschließend am holographischen Transmissionsgitter mit 300 Linien/mm wellenlängenabhängig gebeugt und auf einen Aptina MT9M032 CMOS Image Sensor abgebildet. Die Auflösung des Sensors beträgt 1440 x 1080 Pixel mit 4096 verschiedenen Graustufen. Als Beleuchtung wurden zwei OSA OCI 440 VIS- und NIR-LEDs mit einer Stromstärke von 350 mA und grünlichen Fluoreszenzfarbstoff verwendet. Die spektrale Auflösung bei diesem Gerät beträgt 0,4311 nm/Pixel. Zudem wurde das Gehäuse lichtdicht verbaut und das Aluminium schwarz eloxiert, um unerwünschte Reflexionen zu vermeiden.

Durch diesen Strahlengang (s. Abbildung 5: Strahlengang des Reflexionsspektrometers, Dermalog 17.03.2010) ist in jeder Zeile des Kamerasensors ein Absorptionsspektrum (Intensität als Funktion der Wellenlänge) abgebildet. Um ein stark verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten, werden die Zeilen zusammengefasst und ein Mittelwertspektrum erzeugt.

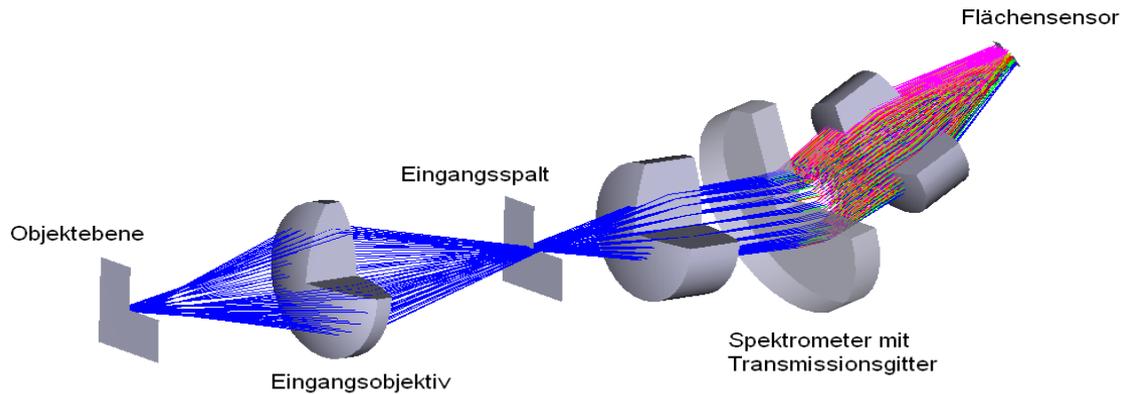


Abbildung 5: Strahlengang des Reflexionsspektrometers, Dermalog 17.03.2010

Die Kraftmessung erfolgte über Piezzo-Kraftaufnehmer der Bezeichnung Honeywell FSG Series, die im Sensorkopf axial gelagert wurden und über die Software die senkrecht auf die Auflagefläche wirkende Kraft messen konnte (s. Abbildung 6: 3D-Konstruktionsausschnitt für die Kraftmessung, Dermalog 17.03.2010).

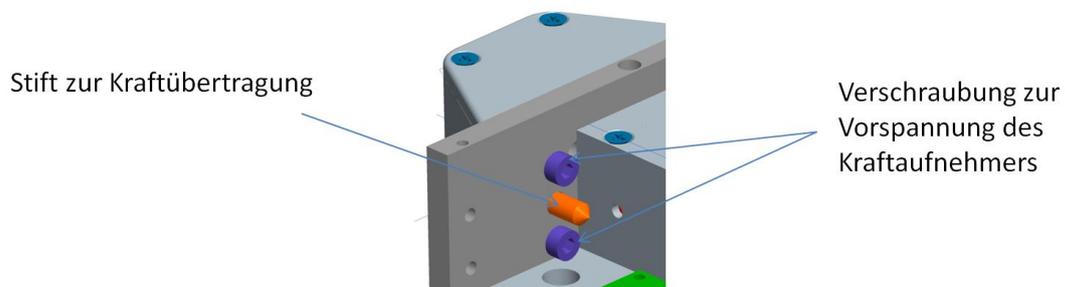


Abbildung 6: 3D-Konstruktionsausschnitt für die Kraftmessung, Dermalog 17.03.2010

Dabei wurden die Spektren druckabhängig aufgenommen. Die gewünschten Druckstärken (0 Newton, 5 Newton (Eigengewicht), 10 Newton, 15 Newton, 20 Newton und 25 Newton (starker Daumendruck)) wurden in einer Konfigurationsdatei eingegeben und die maximale Abweichung nach oben und unten auf je 1 Newton definiert. Die Messungen wurden nur dann durchgeführt, wenn sich der Anpressdruck im angegebenen Intervall befand (Beispiel für die 20 Newton-Messung: 19 - 21 Newton). War der Druck zu groß oder zu klein wurden die Messungen unterbrochen, bis der Anpressdruck wieder im gewünschten Intervall lag. Damit war die Aufnahme der Spektren zu bestimmten Druckstärken gewährleistet.

Als Weißabgleich wurde eine weiße Kachel verwendet.

Durch ein 2.0 USB-Interface konnte das Spektrometer mit einem Laptop verbunden werden. In der Messreihe wurde ein Lenovo Ideapad S12 Netbook mit einem Intel Atom N270 Prozessor und dem Betriebssystem Windows XP verwendet. Für die Auswertung der Spektren wurde die von Dermalog entwickelte Software Cadaverspottool der Version cadaverspottool pkg 110803 vom 03.08.2011 benutzt.



Abbildung 7: Reflexionsspektrometer, Dermalog 17.03.2010

### 2.3. Messverfahren

Die Messungen erfolgten an einem homogen erscheinenden Leichenfleck an der Regio scapularis des Thorax und laterodorsalem Deltoid in einem zuvor markierten Areal von ca. 5 cm x 5 cm. Zu definierten Zeiten wurden mit einer tolerablen Abweichung von maximal 30 Minuten an 5.5, 11.5, 17.5, 24 Stunden post mortem unter Raumtemperatur, sowie 48 und 72 Stunden post mortem unter Kühlungsbedingungen Messungen vorgenommen. Die Verstorbenen wurden auf dem Rücken gelagert und nur zur Messung leicht seitlich gedreht, um die Messregion zu erreichen. Die Auswahl der Messzeitpunkte orientierte sich an den Durchschnittswerten für die Eigenschaften von Totenflecken und ihre zeitliche Beziehung zur Todeszeit aus der Tabelle 2 (Madea B., 2006). Dabei wurden bei jedem Messzeitpunkt die Absorptionskurve zu verschiedenen Druckstärken von 0 Newton bis 25 Newton aufwärts aufgezeichnet. Der Abstand der verschiedenen Druckstärken betrug 5 Newton. Dabei entsprachen 25 Newton einem kräftigen Daumendruck.

Des Weiteren wurden bei jedem Fall Parameter wie Geschlecht, Alter, BMI (Body Mass Index) dokumentiert und zusätzlich vor jeder Messung die Umgebungstemperatur mit dem Temperaturlogger Voltcraft DL-120 TH, die oberflächliche Hauttemperatur mit einem Infrarot-Thermometer Voltcraft IR-260 8S in der Umgebung der Messpunkte und die rektale Temperatur mit dem geeichten Thermometer des Instituts der Rechtsmedizin gemessen.

Außerdem wurde die Wegdrückbarkeit, Ausprägung, Farbe und Konfluenz der Totenflecken zu jedem Messzeitpunkt bestimmt, um sie im Nachhinein mit den Messdaten vergleichen zu können. Die Erfassung dieser Variablen erfolgte anhand operationalisierter Dokumentationsbögen, die wie folgt kategorisiert wurden:

Wegdrückbarkeit	- vollständig, teilweise, nicht
Ausprägung	- spärlich, mittelkräftig, kräftig
Farbe	- blau-livide, rötlich-livide, hellrot, braunrot
Konfluenz	- nein, teilweise, ja

Nach 36 Stunden wurde der Leichnam aufgrund der bei fortschreitender Todeszeit autolytischen Prozesse in den Kühlraum bei durchschnittlichen 12 °C gelagert.

## **2.4. Messungen**

Es wurden für diese Doktorarbeit insgesamt 1938 spektroskopische Einzelmessungen an 40 Verstorbenen durchgeführt.

Dabei wurden bei jeder Messung gleichzeitig statische Spektren mit einem standardisierten Weißabgleich und dynamische Spektren, bei denen als Weißabgleich leichenfleckfreie Hautareale fungierten, vor der Messung aufgezeichnet. Dadurch sollten sich die individuellen Einflussfaktoren des Gewebes reduzieren, was sich aber im Verlauf der Experimente nicht verifizieren ließ.

Die Messungen wurden auf ein vorher markiertes Areal (5 cm x 5 cm) begrenzt, in dem der Leichenfleck mit bloßem Auge homogen erscheint. Alle spektroskopischen Messungen einer Messreihe wurden in diesem, der Auflagefläche des Spektroskopkopfes entsprechenden Areal durchgeführt.

Zu jedem Messzeitpunkt wurden Spektren aufsteigend in den Druckstärken 0 Newton, 5 Newton, 10 Newton, 15 Newton, 20 Newton und 25 Newton aufgenommen. Ausgewertet wurden dabei nur die Druckstärken 0 Newton und 25 Newton, da eine Kontinuität der Intensität der Spektren bei stetig höherem Druck in dieser Abstufung der Druckstärken nicht feststellbar war.

Um die Spektren objektiv miteinander vergleichen zu können, wurde die Intensität der Absorption charakteristischer Maxima und Minima der Absorptionskurven miteinander verglichen. Charakteristische Maxima befanden sich je nach Reoxygenierungszustand des Hämoglobins der Literatur entsprechend bei desoxygeniertem Hämoglobin bei 555 nm und 760 nm, bei reoxygeniertem Hämoglobin bei 541 nm und 577 nm. Ein Minimum bei der zweigipfligen Absorptionskurve des reoxygeniertem Hämoglobins befand sich bei 560 nm.

Zur Untersuchung der Spektren wurde der Wellenlängenbereich von 520 bis 780 nm ausgewählt.

## 2.5. Datenverarbeitung

Die Auswertung der Spektren erfolgt mit Hilfe der von Dermalog entwickelten Software Cadverspottools der Version cadaverspottool pkg 110803 vom 03.08.2011. Dabei konnte man zu jeder Wellenlänge die entsprechende gemessene Intensität in der Einheit Absorber Units auswerten. Um die Spektren untereinander vergleichen zu können wurden die Intensitäten in Absorber Units zu den oben genannten Maxima und Minima der Zielgröße des Hämoglobins dokumentiert. Um eine Aussage über die Wegdrückbarkeit zu treffen wurden die Differenzen zwischen den Druckstärken 0 Newton und 25 Newton zu den bestimmten Maxima und Minima miteinander verglichen.

Da sich die Wellenlängen der Maxima um wenige Nanometer unterschieden, wurde zur Datenanalyse ein festgelegter Bereich um die Mittelwerte der Maxima ausgewählt.

Gemittelt wurden Maxima bei 0 Newton zu den Zeiten 5.5 Stunden pm und 11.5 Stunden pm, da die Störfaktoren zu diesen Zeitpunkten am geringsten erachtet wurden. Die Mittelung der Wellenlänge der Maxima der Spektren ergab zwei für das desoxygenierte Hämoglobin charakteristische Maxima bei 555,86 nm und 759,31 nm.

Der Median verlief bei Maximum 1 bei 556 nm bei Maximum 2 bei 759 nm. Die einfache Standardabweichung betrug bei Maximum um 556 nm im Mittel 2,196 nm, bei Maximum um 759 nm 3,736 nm.

Um möglichst viele Maxima in die Datenanalyse einbringen zu können wurde der Datenbereich um die zweifache Standardabweichung um die Maxima gewählt, sodass mindestens 95,4% der Maxima in die Datenanalyse eingehen und die Auswirkung der Ausreißer minimiert werden konnten.

So wurden um Maximum 1 bei 556 nm ein Bereich von  $\pm 5$ nm (4,392 nm) und für Maximum 2 bei 759 nm ein Bereich von  $\pm 8$  nm (7,472 nm) ermittelt.

Zur Berechnung der Unterschiede des Einflusses der Druckstärke 0 Newton und 25 Newton und zur Objektivierung der Wegdrückbarkeit wurde die Area under the curve (AUC) um das Maximum 1 bei 556 nm in einem Bereich von  $\pm 5$ nm (4,392 nm) und um das Maximum 2 bei 759 nm ein Bereich von  $\pm 8$  nm (7,472 nm) bei jeweils 0 Newton

und 25 Newton ermittelt. Dabei wurde die AUC in jeweils 1nm abschnittsweise für die Graphen berechnet und für die jeweiligen Maxima 1 und 2 aufsummiert, sodass sie innerhalb der Fälle vergleichbar waren.

Des Weiteren erfolgte die Einteilung der Daten nach den jeweiligen Druckstärken

0 = 0 Newton und 1 = 25 Newton,

sowie nach pm-Zeit

0 = 5.5 h, 1 = 11.5h, 2 = 17.5 h und 3 = 24 h.

Dabei wurde der zeitliche Verlauf von 5.5 h, 11.5 h, 17.5 h und 24 h post mortem dargestellt, da sich die Leichen ab der 36 h in Kühlung befanden und so Einflüsse der Temperatur keinen Einfluss auf das Ergebnis hatten und die Kurven somit untereinander vergleichbar waren.

Die Messwerte der Fälle 1,2 und 24 sowie Messwerte von Maximum 2 bei den Fällen 26, 27, 28, 29 und 30 wurden ausgeschlossen, da aufgrund eines technischen Defektes des Gerätes, der zügig wieder behoben wurde, aus den aufgenommenen Spektren keine brauchbaren AUCs für diese Fälle berechnet werden konnten.

Insgesamt konnten so aus 37 Fällen 6578 Einzelwerten die einzelnen AUCs miteinander verglichen und dabei die Unterschiede der AUC für die jeweiligen Maxima und der jeweiligen Zeiten dargestellt werden.

Weitere Auswertungen erfolgten mit dem Statistiksoftware PASW Statistics 18 Version 18.0.3 von 2010 (SPSS) sowie IBM SPSS Statistics Version 22.0.0.0 von 2013.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Auswertung des Untersuchungsgutes

Von den 37 untersuchten Verstorbenen waren 12 weiblich (32,4 %) und 25 männlich (67,6 %).

Das Durchschnittsalter der Verstorbenen lag bei 69,95 Jahren, die Jüngste war 23 Jahre alt geworden, der Älteste 94. Eine Darstellung der Alters- und Geschlechterverteilung zeigt sich in Abbildung 8: Anzahl der Fälle nach Aufteilung in Altersgruppen und Geschlechter.

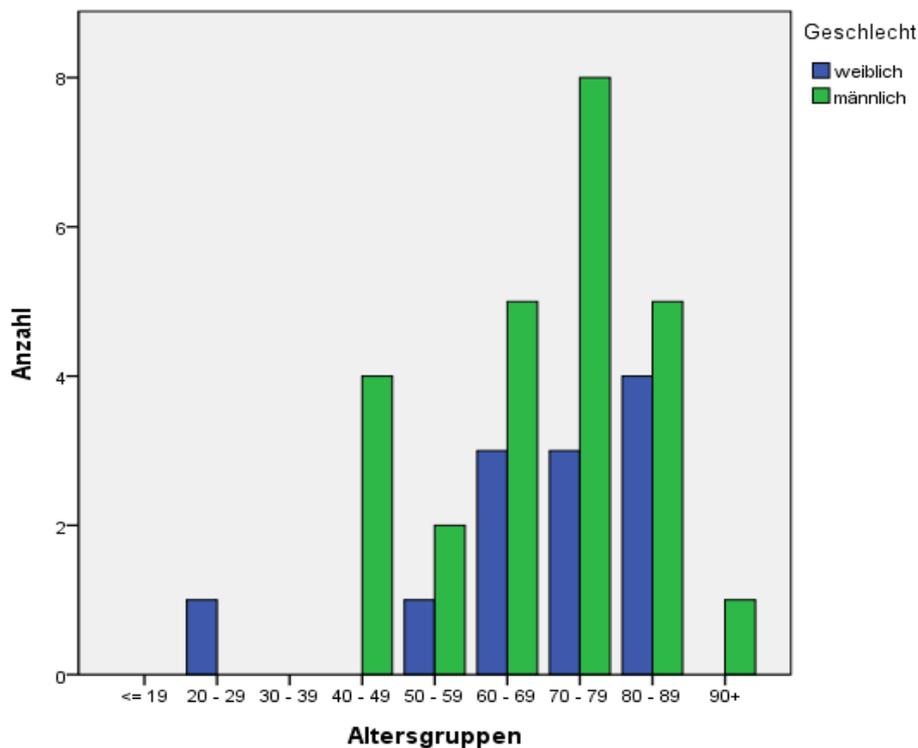


Abbildung 8: Anzahl der Fälle nach Aufteilung in Altersgruppen und Geschlechter

Die Todesarten aller 37 ausgewerteten Fälle waren natürlich. Die Mehrzahl (35,14 %) verstarben an Krankheiten des Herzkreislaufsystems, die Wenigsten (2,70 %) an Erkrankungen des Verdauungssystems. Bei 24,32 % der Fälle war die Todesursache unklar, da die Symptomatik keine eindeutige Todesursache erlaubt und/oder die Todesursache nicht durch eine Obduktion gesichert wurde. Eine genaue Klassifizierung

der Todesursache aller Fälle nach ICD-10-Diagnoseschlüssel bietet Abbildung 9: Kreisdiagramm Prozentzahl der Todesursachen.

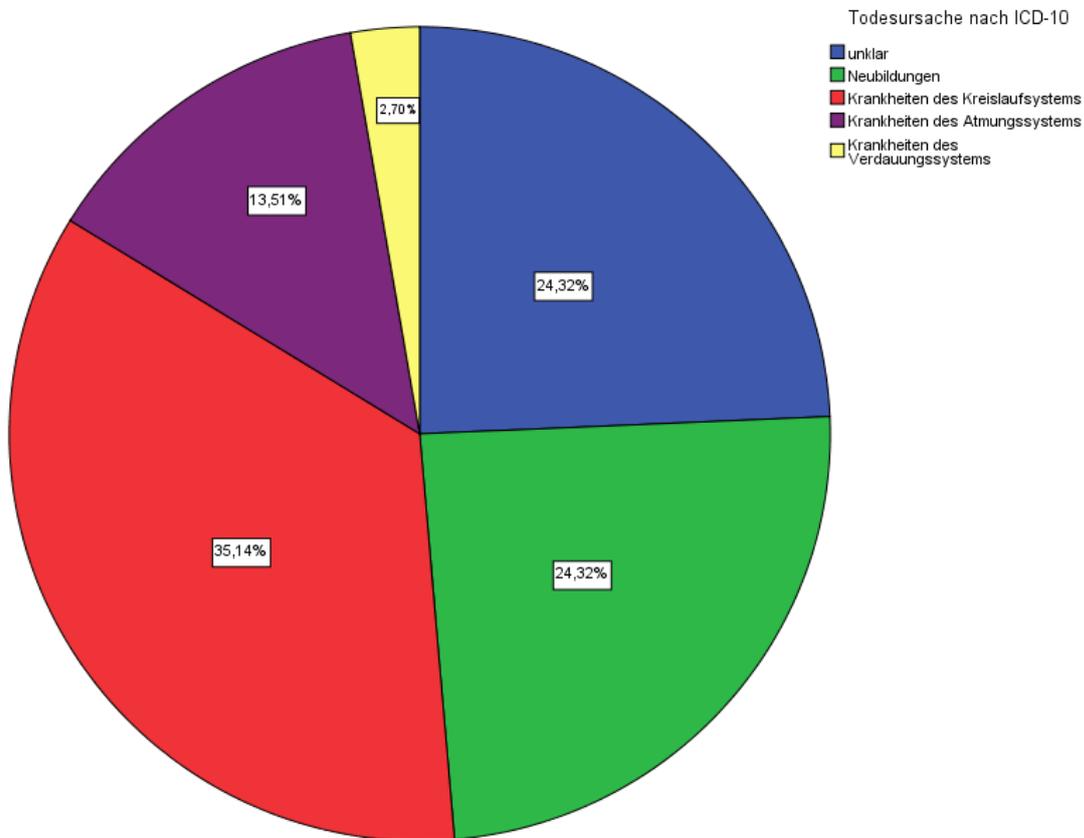


Abbildung 9: Kreisdiagramm Prozentzahl der Todesursachen

### 3.2. Verlauf der Spektren

Die Datenanalyse mit SPSS über alle Wellenlängen im Bereich von 520 nm bis 780 nm erfolgte über 66.536 spektroskopische Einzelwerte. Dabei war, wie oben beschrieben, die pm-Zeit 0 = 5.5 h, 1 = 11.5 h, 2 = 17.5 h und 3 = 24 h. Gültig waren zur pm-Zeit 0 17 %, jeweils 28,7 % zur pm-Zeit 1 und 2, sowie 25,6 % zur pm-Zeit 3 der erhobenen Daten (s. Tabelle 3: Häufigkeit der Messwerte zu den jeweiligen pm-Zeiten).

pm - Zeit	Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
0	11312	17,0	17,0	17,0
1	19104	28,7	28,7	45,7
2	19104	28,7	28,7	74,4
3	17016	25,6	25,6	100,0
Gesamt	66536	100,0	100,0	

Tabelle 3: Häufigkeit der Messwerte zu den jeweiligen pm-Zeiten

Graphisch dargestellt ergab sich folgendes Diagramm (s. Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Intensität der Livores mortis in Anhängigkeit zur pm-Zeit und Druckstärke). Es zeigt den zeitlichen Verlauf der Intensität der Livores mortis. Auf der x-Achse sind die Wellenlängen in nm, auf der y-Achse die Smooth Absorbance in absunits determiniert. Die jeweiligen Werte waren weiterhin auf die pm-Zeiten 0, 1, 2 und 3 zugeordnet, um den zeitlichen Verlauf der Intensitätsänderung der Livores mortis darzustellen. Dabei waren die blau unterlegten Balken der Druckstärke 0 = 0 Newton und grün unterlegten Balken der Druckstärke 1 = 25 Newton zuzuordnen. Der über der x-Achse rot eingegrenzte Bereich, war der Bereich um die Maxima 1 ( $556 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ ) und 2 ( $759 \text{ nm} \pm 8 \text{ nm}$ ), die in der statistischen Datenauswertung genauer betrachtet wurden.

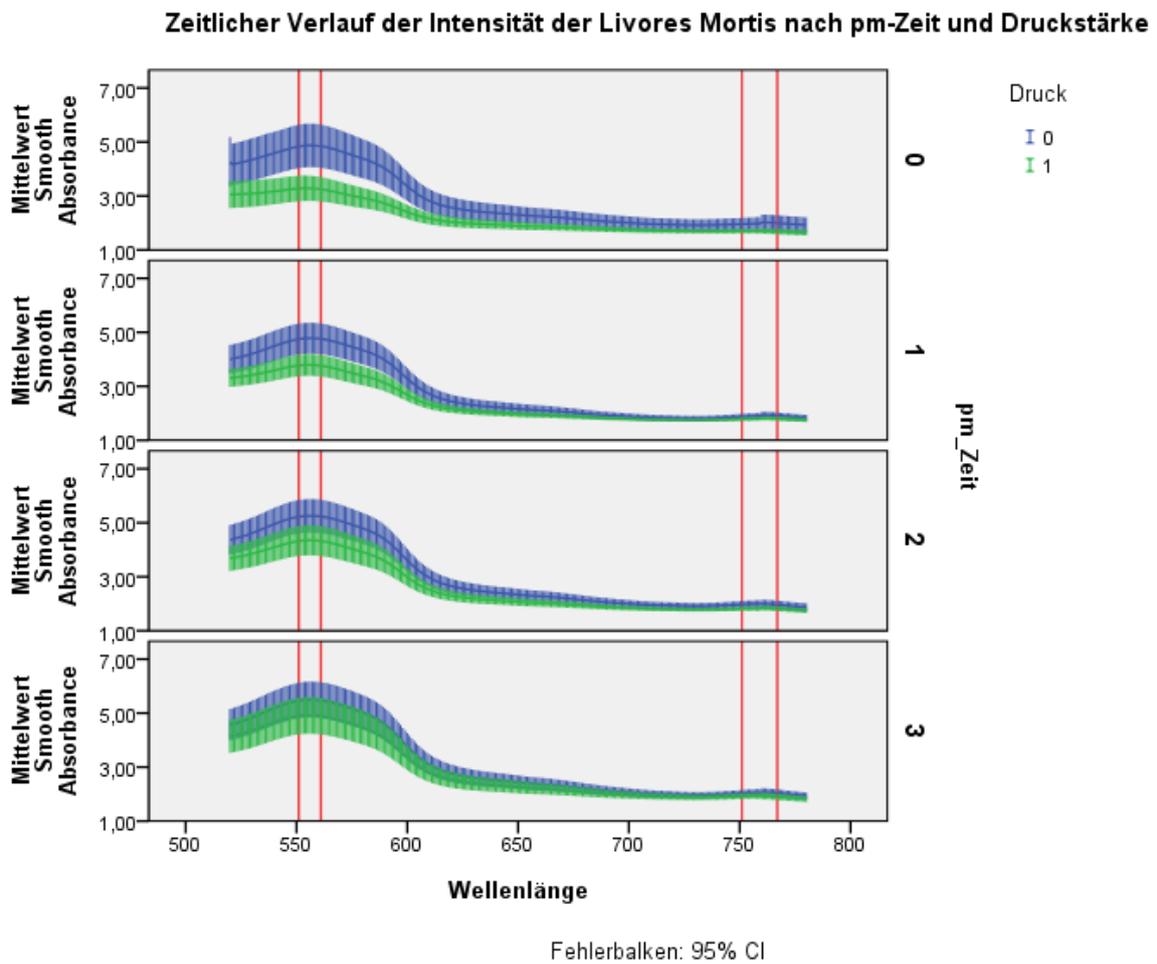


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Intensität der Livores mortis in Anhängigkeit zur pm-Zeit und Druckstärke

In dem Diagramm zeigte sich im zeitlichen Verlauf über 24 Stunden eine Annäherung und Überlappung der Kurven über den gesamten gemessenen Wellenlängenbereich von 520 nm bis 760 nm bei den Druckstärken von 0 N (blau) und 25 N (grün).

### 3.3. Verlauf der Wegdrückbarkeit Daumendruck

Folgende Grafik (s. Abbildung 11: Verlauf der Wegdrückbarkeit mit dem Daumendruck) zeigt die zeitliche Veränderung der Wegdrückbarkeit von Leichenflecken in gültigen Prozent innerhalb einer Gruppe mit gleicher Postmortalzeit. Angefangen bei einer vollständigen Wegdrückbarkeit von Leichenflecken 90,9 % bei der Gruppe von 5.5 h pm bis lediglich 2,9 % nach 24 h pm. Nach 11.5 h pm waren 35,1 % der Leichenflecken noch teilweise wegdrückbar, nach 17.5 h pm 73 %, nach 24 h pm 85,3 %. Nicht wegdrückbare Leichenflecken wurden erstmalig ab 11.5 h pm mit 2,7 % erfasst, jedoch nach Kühlungsexposition nach 48 h pm schon zu jeweils 40,5% teilweise und nicht wegdrückbar klassifiziert. Nach 72 h pm waren alle der dokumentierten Leichenflecken nicht mehr mit dem Daumendruck wegdrückbar.

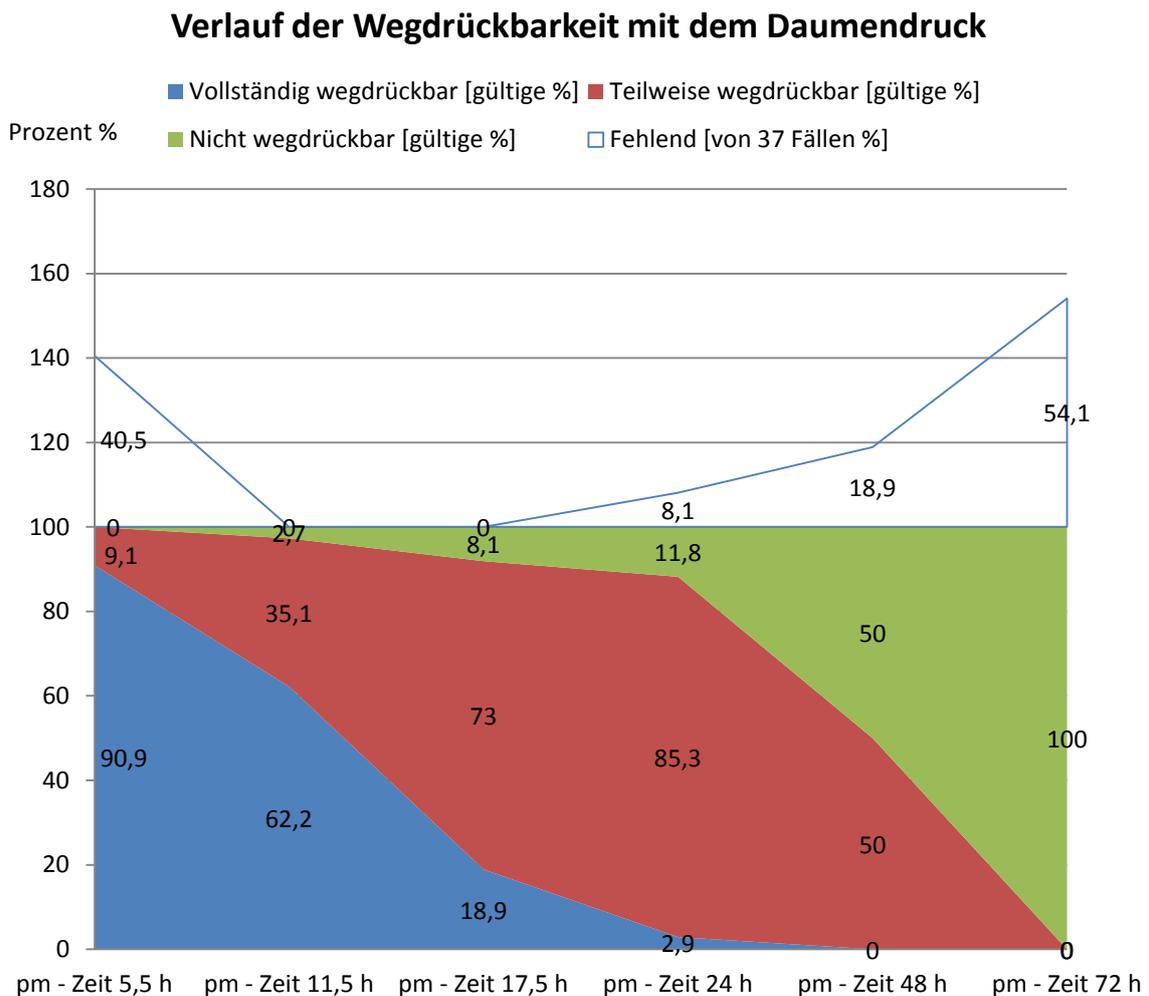


Abbildung 11: Verlauf der Wegdrückbarkeit mit dem Daumendruck

### 3.4. Verlauf der Wegdrückbarkeit Spektroskop

Der Verlauf der Wegdrückbarkeit wurde durch die Berechnung und den Vergleich der AUC durchgeführt. Dabei wurde wie oben beschrieben um Maximum 1 bei 556 nm ein Bereich von  $\pm 5$  nm (4,392 nm) und um Maximum 2 bei 759 nm ein Bereich von  $\pm 8$  nm (7,472 nm) zur statistischen Auswertung ausgewählt.

Nach statistischer Adjustierung der Daten ergab sich für das Maximum 1 bei 556 nm ein statistisch signifikanter linearer Zusammenhang zwischen der prozentualen Änderung der AUC ohne und mit Druckeinwirkung von 25 Newton im zeitlichem Verlauf über 24 Stunden ( $p = 0,0003$ ).

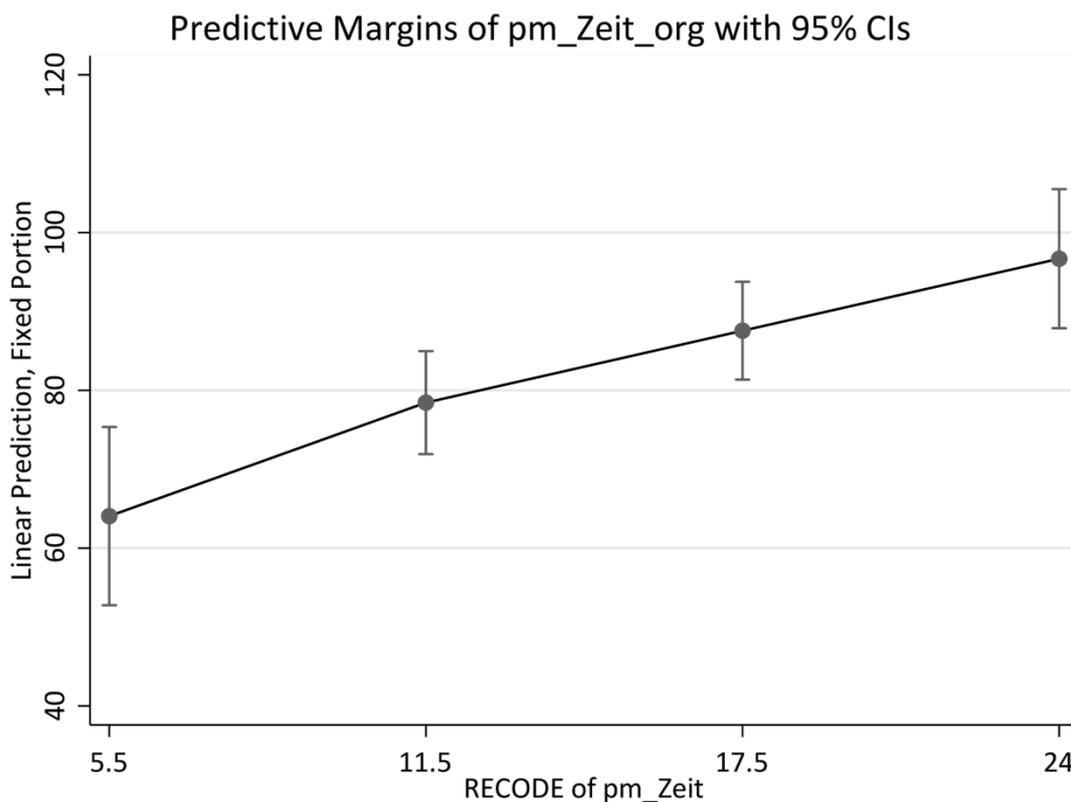


Abbildung 12: Differenz der ACU zu den jeweiligen pm-Zeiten von Maximum 1 bei 556 nm

Man erkennt in dieser Graphik (s. Abbildung 12: Differenz der ACU zu den jeweiligen pm-Zeiten von Maximum 1 bei 556 nm) im Mittel eine prozentuale Änderung der AUC von Druckeinwirkung von 0 Newton und 25 Newton bei 5,5 Stunden von 64,06 %, bei 11.5 Stunden von 78,45 %, bei 17.5 Stunden von 87,56 % und bei 24 Stunden von 96,69 %.

Bei Maxima 1 ist also innerhalb von 24 Stunden post mortem die spektroskopisch gemessene Fläche unter der Kurve mit und ohne Druckeinwirkung von 25 Newton zu 96,69 % identisch.

Der paarweise Vergleich zwischen den Messzeitpunkten ergab eine Änderung von 5.5 Stunden pm zu 11,5 Stunden pm von 14,38 %, von 11.5 Stunden pm zu 17.5 Stunden pm von 9,12 % und von 17.5 Stunden zu 24 Stunden pm zu 9,13 %.

Im Mittel ändert sich der prozentual wegdrückbare Anteil über die vier Messzeitpunkte um 11,96 %.

Ein signifikanter Einfluss der zeitunabhängigen Variablen wie Alter, Geschlecht, BMI, Umgebungstemperatur und zeitabhängigen Variablen wie Haut- und Rektaltemperatur konnte nicht festgestellt werden.

Für das Maximum 2 bei 759 nm konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der prozentualen Änderung der AUC ohne und mit Druckeinwirkung von 25 Newton im zeitlichen Verlauf über 24 Stunden hergestellt werden. Weder lineare, quadratische oder kubische Zusammenhänge konnten statistisch nachgewiesen werden ( $p > 0,11$ ).

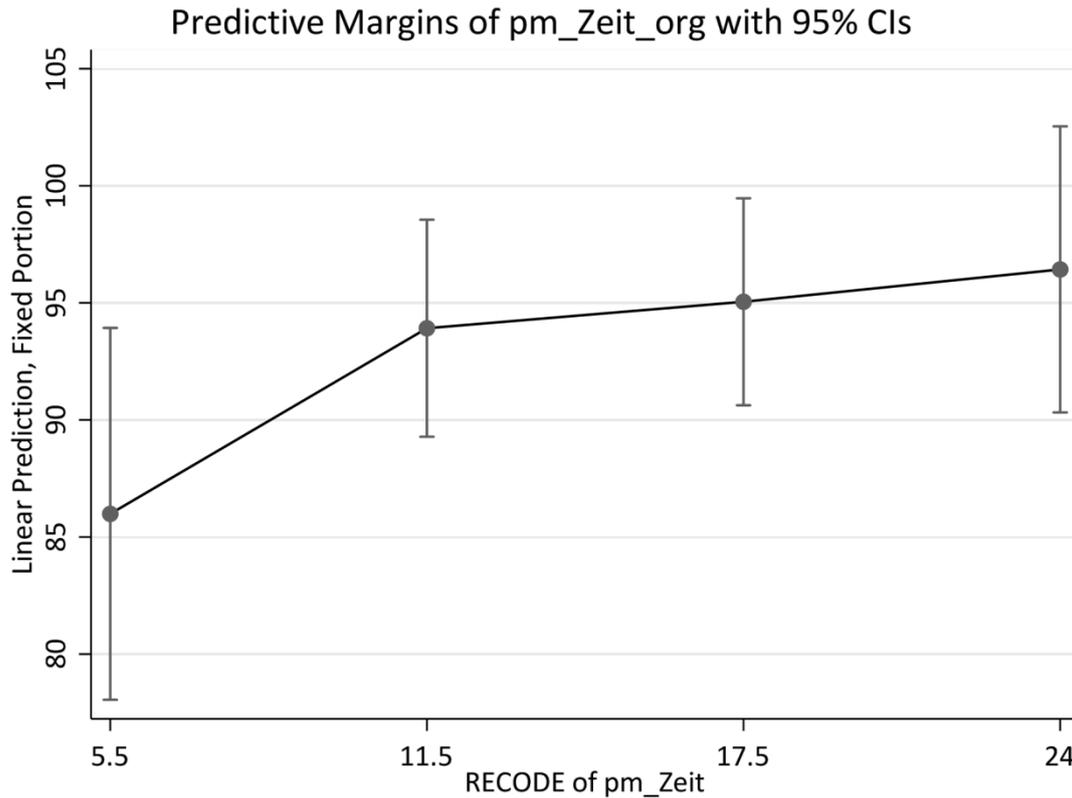


Abbildung 13: Differenz der ACU zu den jeweiligen pm-Zeiten von Maximum 2 bei 759 nm

Man erkennt in dieser Graphik (s. Abbildung 13: Differenz der ACU zu den jeweiligen pm-Zeiten von Maximum 2 bei 759 nm) im Mittel eine prozentuale Änderung der AUC von Druckeinwirkung von 0 Newton und 25 Newton bei 5.5 Stunden von 85,99 %, bei 11.5 Stunden von 93,92 %, bei 17.5 Stunden von 95,05 % und bei 24 Stunden von 96,43 % bei recht breit gestreuten 95 % - Konfidenzintervallen.

Der paarweise Vergleich zwischen den Messzeitpunkten ergab eine Änderung von 5.5 Stunden pm zu 11.5 Stunden pm von 7,93 %, von 11.5 Stunden pm zu 17.5 Stunden pm von 1,13 % und von 17.5 Stunden zu 24 Stunden pm zu 1,38 %.

Im Mittel änderte sich der prozentual wegdrückbare Anteil über die vier Messzeitpunkte um 3,63 %.

Ein signifikanter Einfluss der zeitunabhängigen Variablen Umgebungstemperatur mit einem Regressionskoeffizienten von 1,32 ( $p = 0,044$ ) und zeitabhängigen Variablen

Hauttemperatur mit einem Regressionskoeffizienten von -1,26 ( $p = 0,039$ ) konnte festgestellt werden.

### **3.5. Vergleich der Spektren und Wegdrückbarkeit im zeitlichen Verlauf**

Aufgrund des statistischen signifikanten Verlaufes von Maximum 1 wurde dieser Datensatz zum Vergleich zwischen den spektroskopischen Daten und der subjektiven Wegdrückbarkeit mit dem Daumendruck herangezogen.

Eine spektroskopische Wegdrückbarkeit sollte dabei als ein größer gleich 100% liegender Flächenanteil von Spektren mit 25 Newton Druckeinwirkung und Spektren ohne Druckeinwirkung definiert sein.

In der folgenden Grafik (s. Abbildung 14: Vergleich der spektroskopischen Wegdrückbarkeit in Bezug auf die Daumendruckmethode) sieht man auf der y-Achse die spektroskopische Wegdrückbarkeit in Prozent und auf der x-Achse die dazu gehörigen subjektiven Daten aus der Dokumentation der Qualität der Wegdrückbarkeit mit dem Daumendruck. Diese Daten sind farblich den Messzeitpunkten zugeordnet.

Theoretisch müsste bei mit Daumendruck wegdrückbaren Leichenflecken die spektroskopisch prozentuale Fläche unter der Kurve immer unter 100 % liegen und bei mit Daumendruck nicht wegdrückbaren immer über oder auf der 100 % - Marke liegen. Man erkannte eine Annäherung der spektroskopischen prozentualen Fläche vom subjektiven Daumendruck von wegdrückbar und teilweise wegdrückbar im zeitlichen Verlauf an die 100 % - Marke. Jedoch waren die Ergebnisse nicht eindeutig. Des Weiteren wurden in den ersten 24 Stunden pm nur acht mit dem Daumendruck nicht wegdrückbare Leichenflecken dokumentiert.

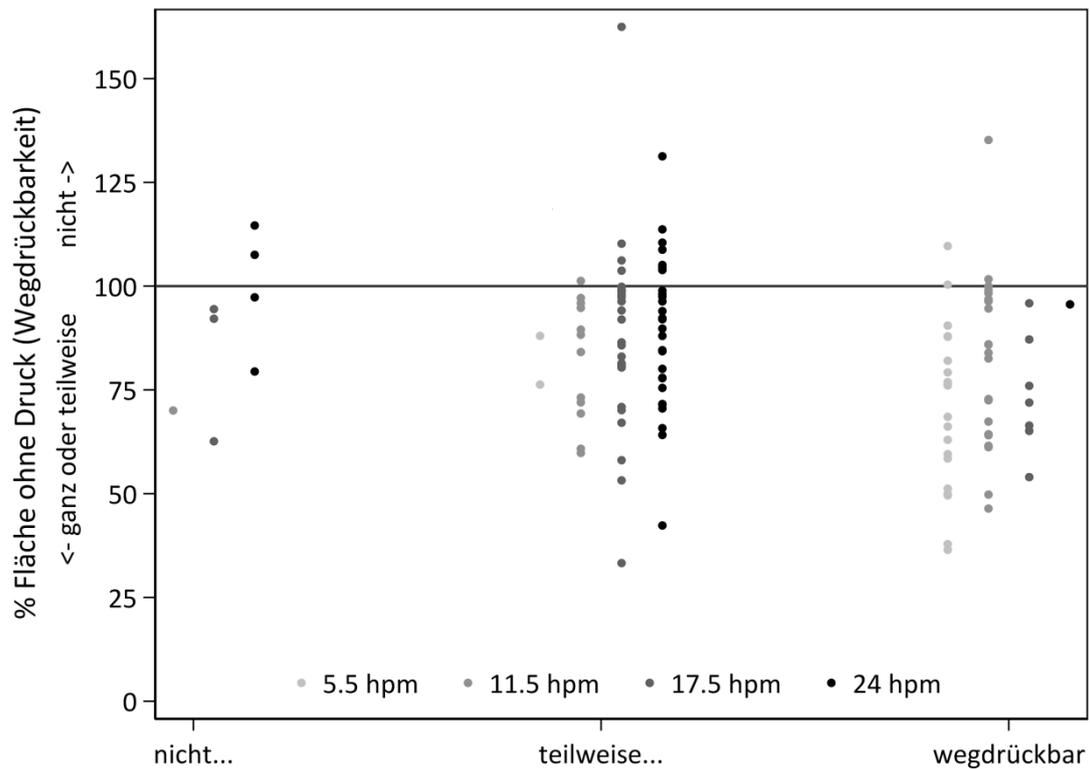


Abbildung 14: Vergleich der spektroskopischen Wegdrückbarkeit in Bezug auf die Daumendruckmethode

Auffallend waren Werte über der 100 % - Marke, die sich in allen Messzeitpunkten wiederfanden und zu späteren Messzeitpunkten häufiger auftraten. In diesen Fällen war die AUC der Intensität der Absorbance durch die Druckeinwirkung wider Erwarten gestiegen. Das Gerät detektierte nicht nur den optischen Eindruck, den man durch die Daumendruckmethode erhielt, sondern auch noch eventuelle Veränderungen des subkutanen/kutanen Bindegewebes, das sich im zeitlichen Verlauf autolytisch veränderte.

### 3.6. Verlauf der Ausprägung

Wie zu erwarten ändert sich durch die physiologischen Prozesse die Qualität der Ausprägung der Leichenflecken im zeitlichen Verlauf (s. Abbildung 15: Verlauf der Ausprägung).

Beginnend mit 27,3 % spärlich, 18,2 % mittelkräftig und 54,5 % kräftig ausgeprägten Leichenflecken zur pm Zeit 5.5 h ändert sich deren Qualität zu Messreihenende nach 72 h in 17,6 % mittelkräftige und nun 82,4 % kräftige Ausprägung der Leichenflecken.

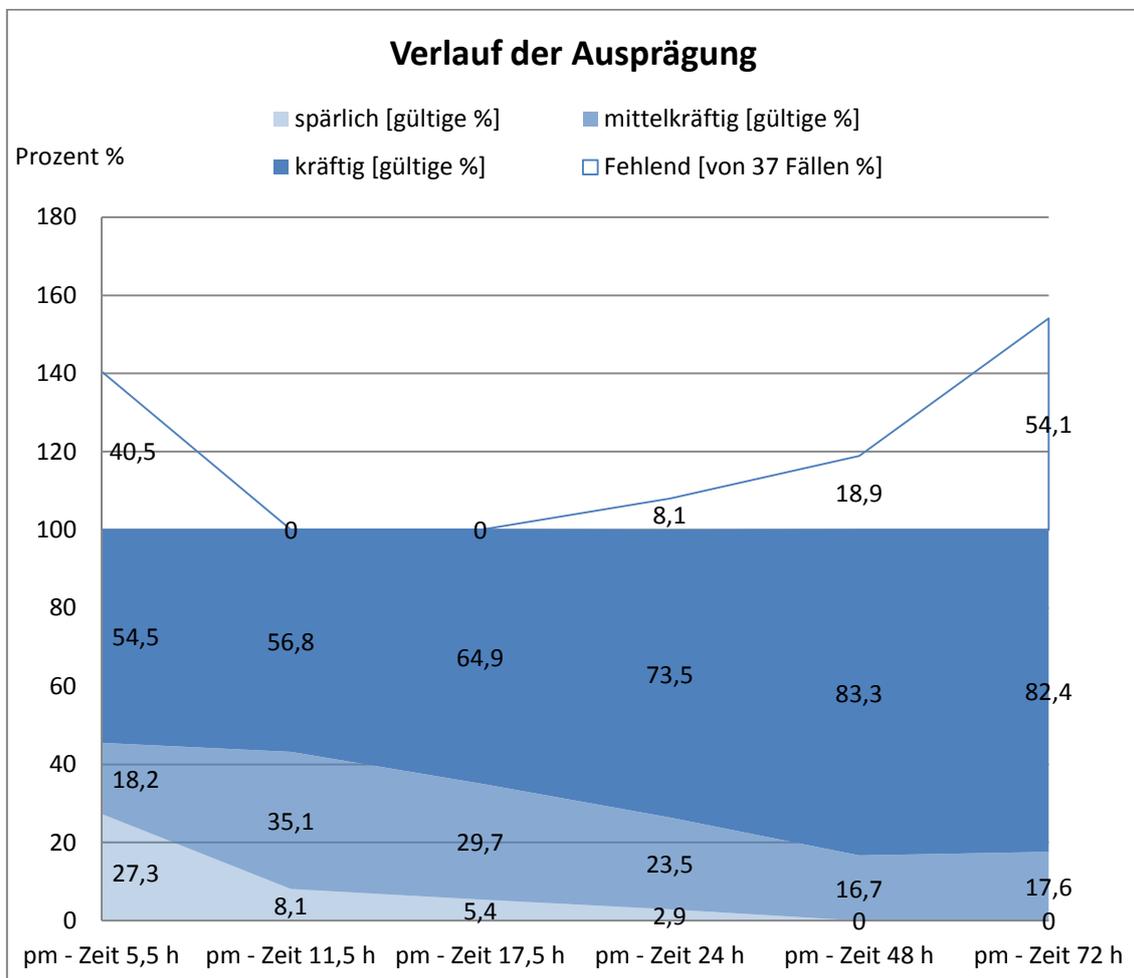


Abbildung 15: Verlauf der Ausprägung

### 3.7. Verlauf der Farbe

Einfluss auf den Verlauf der Farbe der Leichenflecken hat vor allem die Temperatur (s. Abbildung 16: Verlauf der Farbe). In den ersten 24 h pm lagen die Leichen bei relativ konstanter Raumtemperatur von 21,5 °C. Nach 36 h pm begann die Kühlungszeit, woraufhin sich nach 48 h pm die Farbgebung der Leichenflecke von vorher 100 % blaulivider Leichenflecken auf 43,3 % blaulivider und 56,7 % rötlichlivider Farbgebung änderte. Nach 72 h pm waren nur noch 5,9 % der Leichenflecken blaulivide, 70,6 % rötlichlivide und 23,5 % hellrot. Dieses Phänomen des Wechsels von blaulividen zu hellroten Leichenflecken ist in der Literatur als Reoxygenierung des Hämoglobins bei Kälteexposition beschrieben (Bohnert, Schulz, Belenkaia, & Liehr, 2007). Braunrote Leichenflecken, die bei einer Intoxikation mit Methämoglobinbildnern entstehen, konnten nicht identifiziert werden.

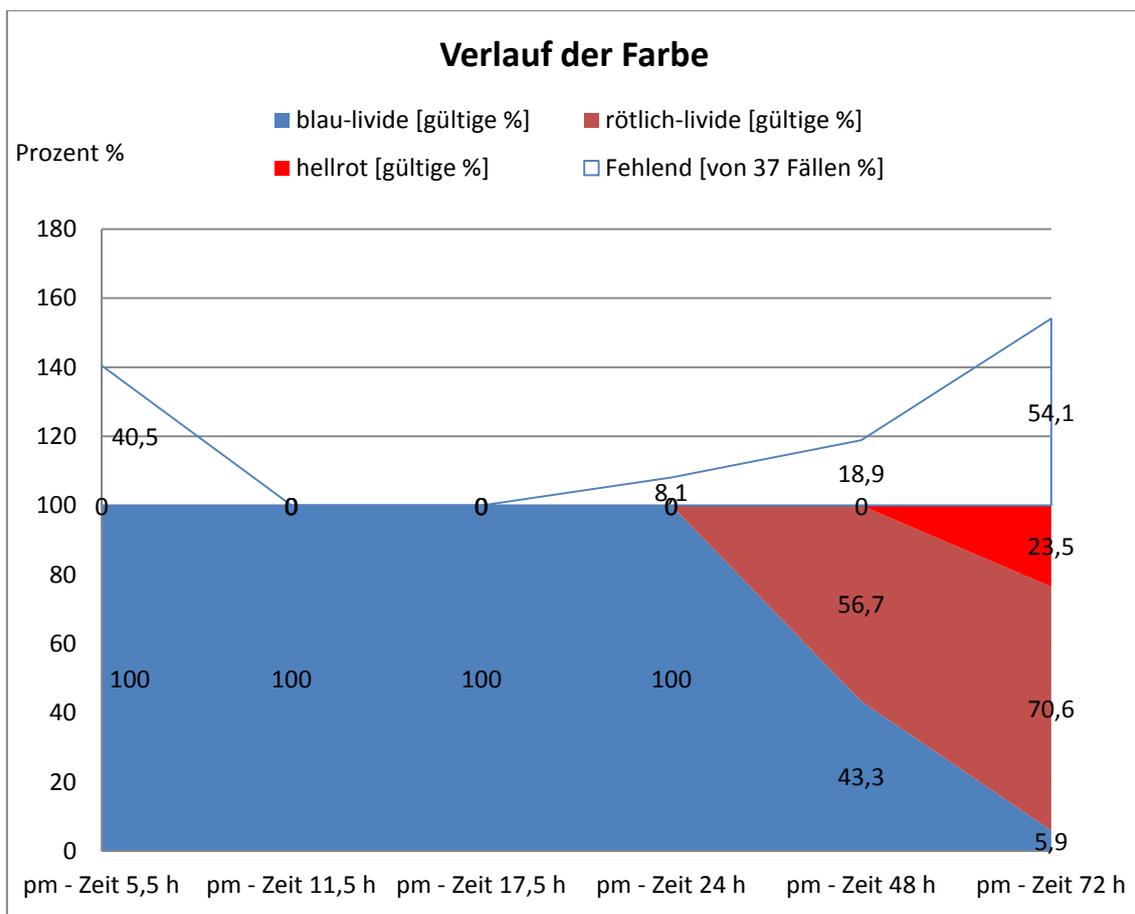


Abbildung 16: Verlauf der Farbe

### 3.8. Verlauf der Konfluenz

Laut der Literatur begannen Leichenflecken im Durchschnitt bei 2.5 h pm zu konfluieren. Dies deckte sich mit unseren Messergebnissen. Zum ersten Messzeitpunkt nach 5.5 h pm waren schon 54,5 % der Leichenflecken konfluiert, 40,9 % teilweise konfluiert und nur 4,5 % nicht konfluiert. Die Konfluenz der Leichenflecken nahm im zeitlichen Verlauf stetig zu, sodass nach 24 h 94,1 % der Leichenflecken komplett und nur noch 5,9 % teilweise konfluiert erschienen (s. Abbildung 17: Verlauf der Konfluenz).

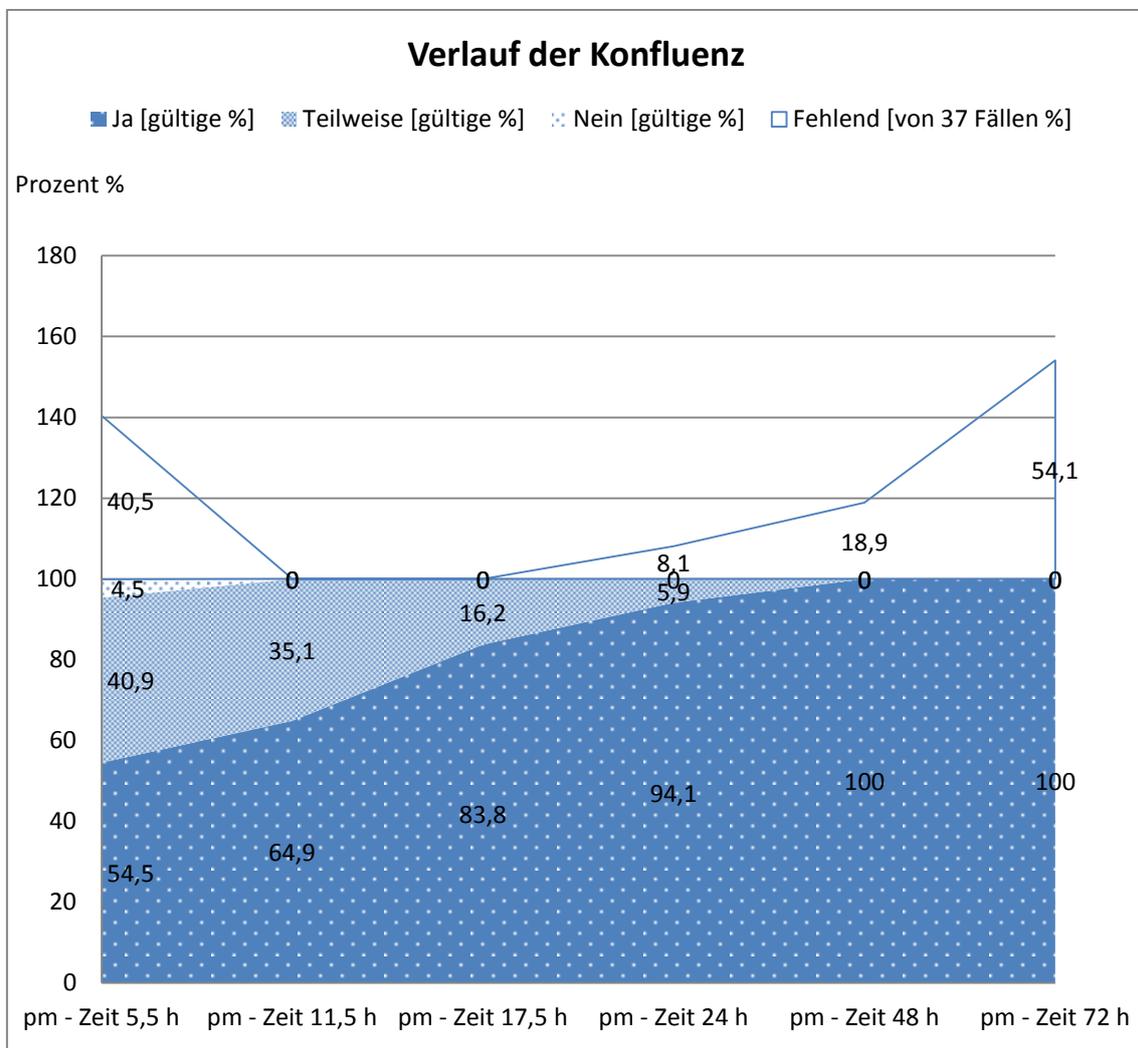


Abbildung 17: Verlauf der Konfluenz

### 3.9. Verlauf der Umgebungstemperatur

Bei 27 von 37 Fällen wurde eine Kühlungszeit dokumentiert. Von den 37 Fällen wurden jedoch 7 Leichen vor der 48 h Messung von dem Bestatter abgeholt oder seziert. Die Kühlungszeit sollte wenn möglich nach 36 post mortem erfolgen. Im Mittel wurde eine Kühlungszeit von 37,29 h erreicht (s. Tabelle 4: postmortale Kühlungszeiten).

**Kühlungszeiten in °C**

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Kühlungszeit p.m.	27	34,50	48,25	37,2870	2,65002
Gültige Werte (Listenweise)	27				

Tabelle 4: postmortale Kühlungszeiten

**Verlauf der Umgebungstemperatur in °C**

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Umgebungstemperatur 5,5 h	22	6,4	18,1	24,5	21,795	1,7456
Umgebungstemperatur 11,5 h	37	6,7	17,3	24,0	21,730	1,7073
Umgebungstemperatur 17,5 h	37	6,2	17,3	23,5	21,432	1,7385
Umgebungstemperatur 24 h	34	11,8	12,0	23,8	21,079	2,1658
Umgebungstemperatur 48 h	30	12,1	10,3	22,4	12,500	2,4546
Umgebungstemperatur 72 h	17	2,9	9,7	12,6	11,541	,7517
Gültige Werte (Listenweise)	11					

Tabelle 5: Verlauf der Umgebungstemperatur

Man erkennt aus der Tabelle 5 und Abbildung 18 über den Verlauf der Umgebungstemperatur, dass die Leichen in den ersten 24 h im Mittel einer Temperatur von 21,5°C ausgesetzt waren. Nach der Kühlung wurden die Leichen relativ konstanten Temperaturen im Kühlungsraum bei ca. 12°C gelagert. Die Abkühlung der Leichen sollte die Fäulnisprozesse verlangsamen, um nach 72 h eine Messung der Livores durchführen zu können. Eine Lagerung der Leiche über 72 h bei 21,5°C hätte die

Hämolyse- und Fäulnisprozesse induziert und somit die Messung der Livores beeinflusst.

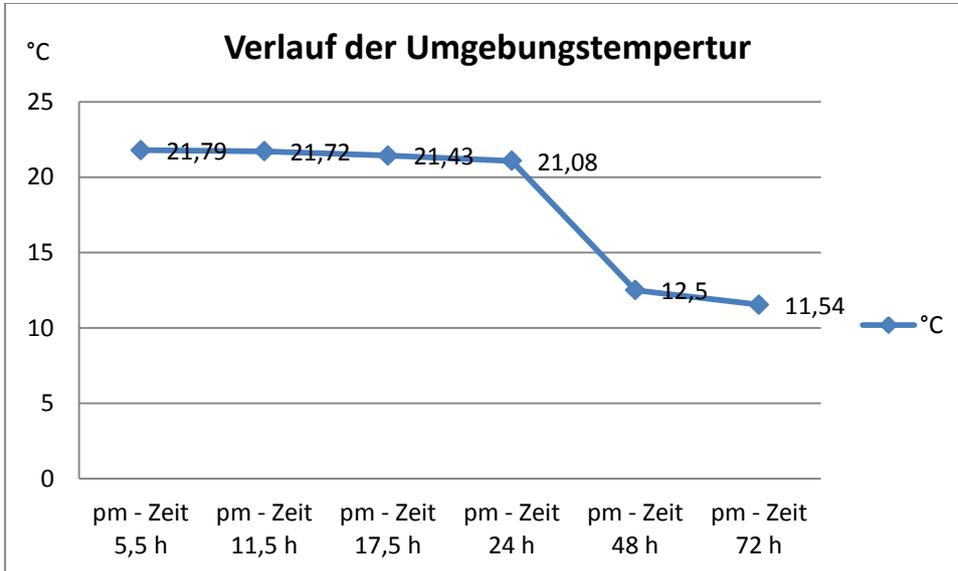


Abbildung 18: Verlauf der Umgebungstempertur

### 3.10. Verlauf der Hauttemperatur

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Hauttemperatur 5,5 h	22	12,4	20,4	32,8	27,423	3,4225
Hauttemperatur 11,5 h	37	14,9	15,0	29,9	25,522	3,1184
Hauttemperatur 17,5 h	37	8,4	20,0	28,4	24,630	2,2122
Hauttemperatur 24 h	34	7,6	19,5	27,1	23,688	1,8414
Hauttemperatur 48 h	30	11,0	12,4	23,4	15,930	2,2490
Hauttemperatur 72 h	17	6,0	9,5	15,5	12,582	1,4497
Gültige Werte (Listenweise)	11					

Tabelle 6: Verlauf der Hauttemperatur

Der Verlauf der Hauttemperatur zeigte eine deutlich höhere Varianz als der Verlauf der Umgebungstemperatur (s. Tabelle 6: Verlauf der Hauttemperatur und Abbildung 19: Verlauf der Hauttemperatur). Man erkannte, dass die Temperatur der Hautoberfläche kontinuierlich abnahm. Den stärksten Abfall sah man zwischen der 24 h und 48 h – Messung, da dort die Kühlung der Leiche erfolgte. Des Weiteren sah man, dass die Hauttemperatur am Anfang der Messung stärker sank und sich dann langsam der Umgebungstemperatur anpasste.

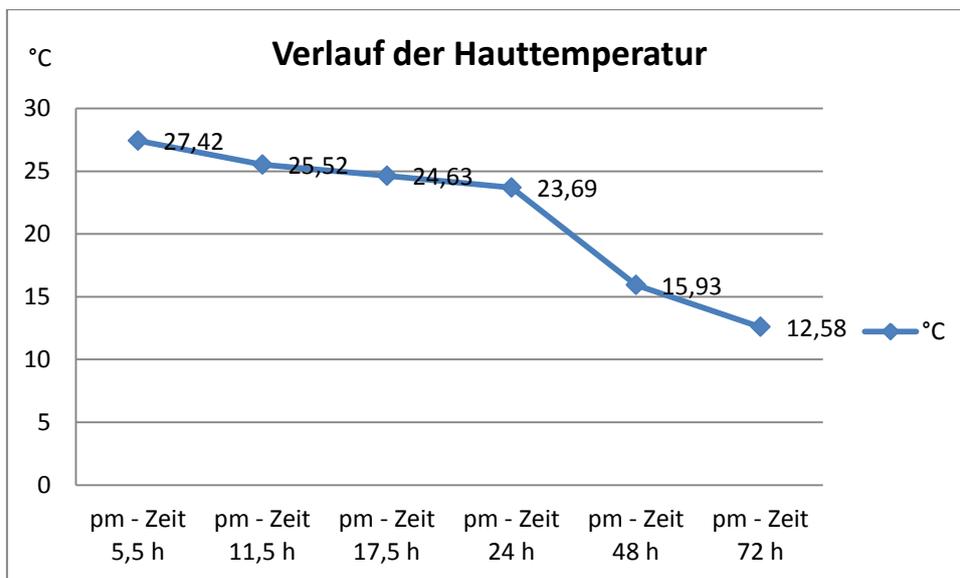


Abbildung 19: Verlauf der Hauttemperatur

### 3.11. Verlauf der Körperkerntemperatur

Verlauf der Körperkerntemperatur in °C

	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung
Rektaltemperatur 5,5 h	22	11,2	27,7	38,9	34,536	2,5918
Rektaltemperatur 11,5 h	37	11,0	25,2	36,2	31,208	2,5513
Rektaltemperatur 17,5 h	37	11,6	22,0	33,6	28,211	2,5863
Rektaltemperatur 24 h	34	9,1	20,8	29,9	25,971	2,3413
Rektaltemperatur 48 h	30	6,5	16,4	22,9	19,390	1,8865
Rektaltemperatur 72 h	17	3,9	12,2	16,1	14,088	1,2399
Gültige Werte (Listenweise)	11					

Tabelle 7: Verlauf der Körperkerntemperatur

In den ersten 24 h sank die Körperkerntemperatur alle 6 Stunden im Mittel um ca. 2,85°C bei einer Umgebungstemperatur von 21,5°C (s. Tabelle 7: Verlauf der Körperkerntemperatur). Danach sank die Temperatur durch den Kühlungseffekt deutlich schneller ab. Nach 72 h war die Körperkerntemperatur im Mittel nur noch 2°C über der Kühlungstemperatur von 12°C.

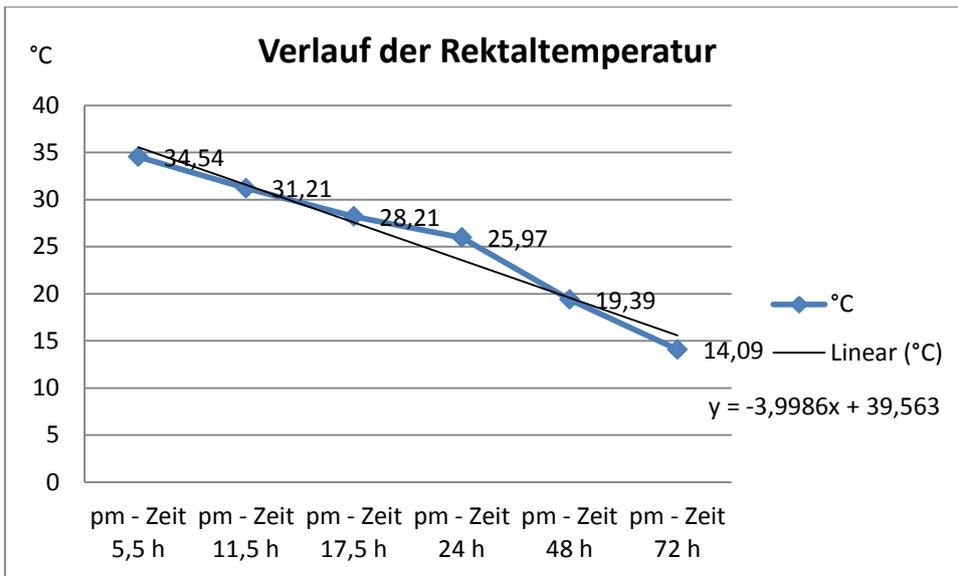


Abbildung 20: Verlauf der Körperkerntemperatur

Der lineare Teilverlauf der Trendlinie lässt sich durch die Formel  $y = -3,9986x + 39,563$  beschreiben (s. Abbildung 20: Verlauf der Körperkerntemperatur). In der Literatur ist ein sigmoidaler Verlauf der Körperkerntemperatur (Henßge C., 2002) beschrieben, der in dieser Messreihe nicht erfasst werden konnte.

### 3.12. BMI

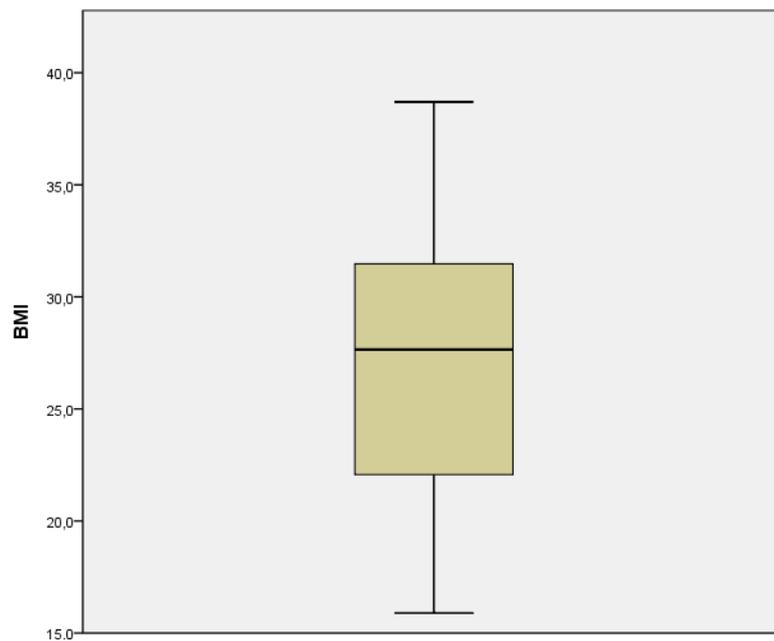


Abbildung 21: BMI

BMI						
	N	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
BMI	37	22,8	15,9	38,7	27,231	5,8618
Gültige Werte (Listenweise)	37					

Tabelle 8: BMI

Der Body Mass Index der untersuchten Fälle ergab Werte von 15,9 bis 38,7. Im Mittel hatten die Verstorbenen einen BMI von 27,23 (s. Abbildung 21: BMI und Tabelle 8: BMI).

## 4. Diskussion

### 4.1. Diskussion der Methode

In dieser Dissertation wurden mittels eines von der Firma Dermalog entwickelten Handspektroskops Reflexionsspektren von Leichenflecken untersucht. Das Gerät war nach kurzer Einweisung leicht einsetzbar und aufgrund einer USB-Schnittstelle mit allen gängigen Notebooks mit Windows Betriebssystem kompatibel. Durch im Gerät integrierte Piezzo-Kraftaufnehmer konnten Spektren in vorher definierten Druckbereichen aufgenommen werden. Ein Messvorgang war zeitlich in wenigen Sekunden durchführbar.

Die erste quantitative Prüfung der Wegdrückbarkeit von Leichenflecken bei bestimmten Druckstärken hatte Bakulev 1966 beschrieben (Bakulev, 1966) (Hunnius, Mallach, & Mittmeyer, 1973). Die Kombination der Methode der spektrometrischen Analyse von Leichenflecken unter ansteigenden Druckstärken wurde in der Literatur 1988 erstmalig durch Schuller et al. publiziert (Schuller, Pankratz, Wohlrab, & Liebhardt, 1988). Dabei wurden im zeitlichen Verlauf zur Quantifizierung der optischen Eigenschaften von Leichenflecken unterschiedliche Bezugssysteme, wie nur die Helligkeit (Vanezis P., 1991), der Helligkeitsbezugswert durch Schuller et al. (Schuller, Pankratz, & Liebhardt, 1987), das CIE-Lab-System durch Lins (Lins G. , 1973), Kaatsch et al. (Kaatsch, Stadler, & Nietert, 1993), Vanezis et al. (Vanezis & Trujillo, 1996) und Usumto et al. (Usumoto Y. et. al., 2009) sowie reflexionsspektrometrische Untersuchungen durch Bohnert et al. (Bohnert, Walther, Roths, & Honerkamp, 2005), verwendet.

Die für diese Studie verwendete Kombination von reflexionsspektroskopischen Untersuchungen bei gleichzeitiger druckabhängiger Aufnahme der Spektren war neuartig in diesem Bereich.

Die spektroskopische Analyse von Leichenflecken in Kombination mit Druckdifferenzen von 0 Newton und 25 Newton zeigte signifikante lineare Veränderungen um den Wellenlängenbereich 556 nm von Maximum 1 innerhalb von 24 Stunden postmortal (s. Abbildung 12: Differenz der ACU zu den jeweiligen pm-Zeiten von Maximum 1 bei 556 nm).

Somit scheint es mit dem von Dermalog entwickelten Reflexionsspektroskop für die ersten 24 Stunden generell möglich zu sein, eine Eingrenzung der Todeszeit unabhängig von zeitabhängigen/-unabhängigen Variablen zu ermitteln. Es bestätigte sich die These, dass sich v.a. in den ersten 20 postmortalen Stunden spektrometrische Veränderungen der Wegdrückbarkeit nachweisen lassen (Schuller, Pankratz, Wohrab, & Liebhardt, 1988).

Für Maximum 2 um 759 nm konnte ein statistischer Zusammenhang nicht dargestellt werden (s. Abbildung 13: Differenz der ACU zu den jeweiligen pm-Zeiten von Maximum 2 bei 759 nm).

Für folgende Arbeiten wäre eine Klassifizierung der Wegdrückbarkeit von Leichenflecken in vollständig und unvollständig für den Vergleich mit der Literatur vorteilhafter. Auch könnte eine dezidiere Skalierung der Messzeitpunkte um den Umschlagszeitpunkt der Wegdrückbarkeitsqualitätsänderungen, bei nachfolgenden Forschungsarbeiten signifikantere Ergebnisse liefern und den linearen Zusammenhang eventuell besser verdeutlichen.

Auch das Wissen um den Todeszeitpunkt könnte eine Verzerrung der Klassifizierung der Wegdrückbarkeit mit dem Daumendruck zu Folge haben, die sich aus den spektroskopischen Werten nicht immer widerspiegelte und den Vergleich der Klassifizierung der Wegdrückbarkeit der Leichenflecken mit dem Daumendruck und spektroskopischen Ergebnissen erschwerte.

## **4.2. Diskussion der Ergebnisse**

Aufgrund der speziellen Entwicklung und des einzigartigen Aufbaus des Handreflexionsspektrometers von Dermalog war ein Vergleich mit anderen wissenschaftlichen Arbeiten schwierig, da diese Arbeiten für die Auswertung und Erfassung der Daten andere Bewertungssysteme wie oben beschrieben benutzten.

Auch andere Messparameter wie Messungen an Hautstanzen (Lins G. , 1968), an lebender Haut (Lins G. , 1968) und unter anderen Druckstärken (Kaatsch, Schmidtke, &

Nietsch, 1994) ließen keinen direkten Vergleich der Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeiten zu.

Zudem waren interindividuelle Unterschiede der beschriebenen Qualitäten von Leichenflecken sehr groß ( (Fechner & Koops, 1982), (Fechner, Koops, & Henßge, 1984), (Scholz J., 2012)), was einen Vergleich der einzelnen Fälle untereinander erschwerte.

Laut Literatur ist die Wegdrückbarkeit von Leichenflecken vollständig bis maximal 20 Stunden (Anders S., Raupach T., & Sehner S., 2019) und unvollständig bis maximal 37,5 Stunden postmortal beschrieben (s. Tabelle 2: Eigenschaften der Totenflecke und ihre zeitliche Beziehung zur Todeszeit nach Angaben der Literatur 1905 bis 1963 unter Annahme einer symmetrischen Verteilung um den Durchschnittswert berechnet (Madea B., 2006).

Diese Aussagen ließen sich mit den spektroskopischen Ergebnissen dieser Arbeit für das Maximum 1 bei 556 nm für die ersten 24 Stunden post mortem vereinbaren. Erst ab der 24-Stunden-Messung war eine 96,69% Deckung der AUC mit und ohne Druckeinwirkung nachweisbar.

Die Auswertung der Eigenschaften der Leichenflecke in Bezug auf Ausprägung, Farbe und Konfluenz deckten sich im Wesentlichen mit den Daten der aktuellen Literatur. Jedoch waren diese Daten subjektiv erhoben und somit einem starken Einfluss des Betrachters unterlegen. Zudem ließ sich der Einfluss des Umgebungstemperaturverlaufes durch die im Mittel ab 37,29 h pm stattgefundene Kühlung der Leichen auf durchschnittlich 12°C auf die oben genannten Eigenschaften der Leichenflecken nicht quantifizieren.

Wider Erwarten war es trotz der Erhöhung des Druckes teilweise zum Anstieg der Intensität der Absorbance gekommen. Das Gerät misst nicht nur den optischen Eindruck, den man durch die Daumendruckmethode erhält, sondern auch noch eventuelle Veränderungen des subkutanen/kutanen Bindegewebes, das sich im zeitlichen Verlauf autolytisch veränderte. Diese Veränderung wurde mit der Daumendruckmethode nicht quantifiziert, sodass der Vergleich zwischen der klassischen Methode des Daumendrucks und der spektroskopischen Methode kaum möglich war. Anhand der Graphen und Diagramme erkannte man zwar eine Tendenz,

die jedoch nicht signifikante Veränderungen zeigte (s. Abbildung 14: Vergleich der spektroskopische Wegdrückbarkeit in Bezug auf die Daumendruckmethode).

Zur exakten Ermittlung von Todeszeitpunkten wären weitere Untersuchungen nötig, da die anfängliche Skalierung der Druckstärken in 5 Newton Abständen zu klein gewählt worden ist, sodass signifikante Zusammenhänge erst zwischen Druckdifferenzen von 0 Newton und 25 Newton eintraten. Auch eine Erhöhung des Druckmaximums auf 80 - 100 Newton (Kaatsch, Schmidtke, & Nietsch, 1994) und größere Druckstärkenänderung (Arriens, 1996) könnte spektroskopische Ergebnisse eventuell verdeutlichen. Jedoch ist bei zu hohen Druckstärken ( $> 25$  Newton) ein Vergleich mit klassischer Daumendruckmethode mit spektroskopischen Daten nicht mehr reevaluierbar, der in dieser Arbeit Anwendung gefunden hat. Für eine exakte Todeszeitbestimmung mittels spektroskopischer Untersuchungen in Kombination mit integrierter Druckmessung müssten weitere Untersuchungen mit höherer Fallzahl und veränderten Parametern durchgeführt werden.

### **4.3. Ausblick**

Aus den Daten dieser Studie ließ sich sagen, dass es mit dem Handreflexionsspektroskop von Dermalog möglich wäre für die ersten 24 Stunden eine Todeszeiteingrenzung zu errechnen, die Fallzahl jedoch nicht reichte, um die großen interindividuellen Unterschiede statistisch zu erfassen.

Auch könnten die Daten, die auch eine Auswertung verschiedener Hämoglobinderivate möglich machen würden, in anderen klinischen Bereichen Anwendung finden. Zum Beispiel als Oxygenierungsprüfung jeglichen Gewebes im operativen und stationären Bereich, als Carboxyhämoglobinmesser von Brandverletzten im Rettungsdienst/Feuerwehr oder auch als Identifikator von Methämoglobin bei zum Beispiel einer Pirlocainintoxikation.

Für den rechtsmedizinischen Bereich wäre in Zukunft vorstellbar das Handspektrometer über die USB-Schnittstelle mit der Stromversorgung eines Smartphones oder Ähnlichem zu betreiben und mit einer dazu programmierten App gespeist mit Algorithmen spektroskopischer Studien die Todeszeit auf bestimmte Zeitgrenzen

einzu­schränken. Auch eine Kombination von druckabhängigen spektroskopischen Aufnahmen und gleichzeitiger Auswertung von Hämoglobinderivaten als Eingrenzung der Todeszeit und Todesursache wäre denkbar.

## **5. Zusammenfassungen**

### **5.1. Zusammenfassung in Deutsch**

Die vorliegende Arbeit untersucht und beschreibt spektroskopische Untersuchungen des zeitlichen Verlaufes der Intensität und Wegdrückbarkeit von Totenflecken, die mittels eines von Dermalog entwickelten Reflexionsspektroskops druckabhängig aufgenommen wurden.

Dazu wurden an Leichen mit bekanntem Todeszeitpunkt spektroskopische Untersuchungen zu vorher definierten Messzeitpunkten und Druckstärken vorgenommen und zeitgleich die Qualität der Wegdrückbarkeit von Leichenflecken mittels der Daumendruckmethode dokumentiert.

Der zeitliche Verlauf an homogen erscheinendem Leichenfleckenareal aufgenommenen Spektren zeigte einen signifikanten linearen Zusammenhang um die Wellenlänge 556 nm, was als ein in der Literatur bekanntes Maximum für desoxygeniertes Hämoglobin darstellt. Dabei glich sich die prozentuale Änderung der AUC von Druckeinwirkung von 0 Newton und 25 Newton bei 5,5 Stunden von 64,06 %, bei 11.5 Stunden von 78,45 %, bei 17.5 Stunden von 87,56 % und bei 24 Stunden von 96,69 % aneinander an.

Ein signifikanter Einfluss der zeitunabhängigen Variablen wie Alter, Geschlecht, BMI, Umgebungstemperatur und zeitabhängigen Variablen wie Haut- und Rektaltemperatur konnte für das Maximum um 556 nm nicht festgestellt werden.

Das weitere untersuchte Maximum bei 759 nm zeigte weder einen linearen, quadratischen noch kubischen signifikanten Zusammenhang.

Eine Vergleichbarkeit der Wegdrückbarkeit von Leichenflecken von spektroskopischen Werten und subjektiver Daumendruckmethode hat sich als schwierig erwiesen, da zum einen die Anzahl nicht wegdrückbarer Leichenflecken innerhalb von 24 Stunden sehr gering war und zum anderen aufgrund der Kenntnis des Todeszeitpunktes eine Verzerrung der dokumentierten Qualität der Wegdrückbarkeit mittels Daumendruck stattgefunden haben könnte.

## 5.2. Summary in English

The present work investigates and describes spectroscopic examinations of the temporal course of the intensity and removability of dead spots, which were taken pressure - dependently by means of a reflection spectroscope developed by Dermalog.

For this purpose, spectroscopic examinations of previously defined measurement times and pressure intensities were performed on corpses with a known time of death, and at the same time the quality of the displacement of corpse stains by means of the thumb pressure method was documented.

The temporal course of homogeneously appearing spot areas showed a significant linear correlation around the 556 nm wavelength, which is a known maximum in the literature for deoxygenated hemoglobin. The percent change of the AUC at 0 Newton and 25 Newton at 5.5 hours was 64.06 %, at 11.5 hours 78,45 %, at 17.5 hours 87,56 % and at 24 hours 96,69% to each other.

A significant influence of the time-independent variables such as age, sex, BMI, ambient temperature and time-dependent variables such as skin and rectal temperature could not be determined for the maximum around 556 nm.

The further investigated maximum at 759 nm showed neither a linear, quadratic or cubic significant relationship.

A comparability of the removability of corpse stains from spectroscopic values and subjective thumb pressure method has proved to be difficult, since on the one hand, the number of non-removable corpse spots within 24 hours was very low and on the other hand due to the knowledge of the time of death, a distortion of the documented quality of removability by thumb pressure could have taken place.

## 6. Abkürzungsverzeichnis

ACU	Area under the curve
BMI	Body Mass Index
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
ca.	zirka
CIE	Commission internationale de l'éclairage
cm	Zentimeter
CMOS	Complementary Metal Oxid Semiconductor
CO	Kohlenmonoxid
CO-Hb	Carboxyhämoglobin
d.h.	das heißt
Dr.	Doktor
et al.	et alteri
griech.	griechisch
h	Stunden
Hb	Hämoglobin
Hb-O <sub>2</sub>	Oxyhämoglobin
ICD	International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems
lat.	Latein
LED	Light Emitting Diode

m	Meter
mA	Milliampere
µm	Mikrometer
mm	Millimeter
mol	Mol
N	Anzahl
NIR	Nahinfrarot
nm	Nanometer
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
p	P-Wert
ph	per hour
pm	post mortem
s.	siehe
USB	Universal Serial Bus
v.a.	vor allem
VIS	Visuelles Spektrum
W	Watt

## 7. Literaturverzeichnis

- Anders S., Raupach T., & Sehner S. (2019). Zeitgrenzen nicht-temperaturbasierter faktorender Komplexmethode zur forensischen Todeszeitdiagnostik. *Rechtsmedizin* 2019 · 29, S. 248 - 252.
- Arriens, P. (1996). Eine neue Methode zur Berechnung der Todeszeit. *Inauguraldissertation Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.*
- Bakulev, S. (1966). Blood changes in the area of the livors spots in violent and sudden death. *Subebnomed. eksp.(Mosk.)* 9, Nr 3, 3-6, Ref. *Dtsch Z. ges. gerichtl. Med.*, 60 (1967), S. 330 -331.
- Bäumler, W. (2006). *Lasertherapie in der Dermatologie Atlas und Lehrbuch.* Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Bohnert, M., Schulz, K., Belenkaia, L., & Liehr, A. (2007). Re-oxygenation of haemoglobin in livores after post-mortem exposure to a cold environment. *Int J Legal Med* 122, S. 91-96.
- Bohnert, M., Walther, R., Roths, T., & Honerkamp, J. (2005). A Monte Carlo based model for steady state diffuse reflectance spectrometry in human skin: estimation of carbon monoxide concentration in livor mortis. *Int J Legal Med* 119, S. 355-362.
- Bohnert, M., Weinmann, W., & Pollak, S. (1999). Spectrophotometric evaluation of postmortal lividity. *Forensic Sci Int* 99, S. 149-158.
- Brinkmann, B., & Madea, B. (2004). *Handbuch gerichtliche Medizin.* Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag.
- Brockhaus. (2003). *Der Brockhaus Naturwissenschaft und Technik* (Bd. 3). Deutschland: F.A.Brockhaus und Spektrum Akademischer Weg.
- Brunsting, L., & Sheard, C. (1929). The color of the skin as analyzed by spectrophotometric methods. *J Clin Invest*, S. 575 -592.

- Fechner, G., & Koops, E. (1982). Zur Wegdrückbarkeit der Leichenflecken durch länger dauernden statischen Druck. *Proceedings XII Kongress der internationalen Akademie für gerichtliche und soziale Medizin*, S. 909 -911.
- Fechner, G., Koops, E., & Henßge, C. (1984). Zur Abblassung der Livores unter definierten Druckbedingungen. *Z Rechtsmed* 93, S. 283 - 287.
- Henßge C. (2002). Todeszeitbestimmung an Leichen. *Rechtsmedizin* 12, S. 112–131.
- Hofmann, E. (1927). *Lehrbuch der gerichtlichen Medizin*. Berlin Wien: Urban & Schwarzenberg.
- Hunnius, P., Mallach, H., & Mittmeyer, H.-J. (1973). Über quantitative Druckmessung an Totenflecken zur Bestimmung der Todeszeit. *Z.Rechtsmedizin* 73, S. 235-244.
- Kaatsch, H.-J., Schmidtke, E., & Nietsch, W. (1994). Photometric measurement of pressure-induced blanching of livor mortis as an aid to estimating time of death. *Int J Leg Med* 106, S. 209-214.
- Kaatsch, H.-J., Stadler, M., & Nietert, M. (1993). Photometric measure of color changes in livor mortis as a function of pressure and time. *Int J Leg Med* 106, S. 91-97.
- Lins, G. (1968). Die Remissionsanalyse zur farblichen Charakterisierung der Leichenhaut. *Beitr Gerichtl Med* 24, S. 162 - 166.
- Lins, G. (1968). Remissionsmessung zur farblichen Charakterisierung der lebenden menschlichen Haut. *Beitr Gerichtl Med* 25, S. 271 - 277.
- Lins, G. (1973). Der Farbort der Totenflecke im Spektralfarbenentzug. *Beitr Gerichtl Med* 31, S. 203 - 212.
- Lins, G., & Blazek, V. (1982). Die Anwendung der Remissionsanalyse zur direkten farbmetrischen Bestimmung des Blutfleckenalters. *Z. Rechtmed* 88, S. 13 - 22.
- Lins, G., & Hamper, K. (1970). Das remissionsanalytische Hautfarbbild von artefiziellen Blutergüssen. *Beitr Gerichtl Med* 27, S. 232 - 238.
- Lins, G., & Kutschera, J. (1974). Die farbmetrische Bewertung der Grünfäule der Leichenhaut im Rahmen der programmierten Farbwertintegration. *Z. Rechtsmed* 75, S. 210 - 212.

- Löffler, G., Petrides, P., & Heinrich, P. (2007). *Biochemie und Pathobiochemie*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Madea B. (2006). *Die ärztliche Leichenschau*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Madea, B. (2007). *Praxis Rechtsmedizin*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Madea, B., & Dettmeyer, R. (2007). *Basiswissen Rechtsmedizin*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Mallach, H., & Mittmeyer, H.-J. (1971). Totenstarre und Totenflecke. *Z. Rechtsmedizin* 69, S. 70-78.
- Mittmeyer, H.-J. (1971). Abhängigkeit der Totenstarre und Totenflecke vom Leichenalter. *Beitr. gerichtl. Med.*
- Neave W. (1978). *Gerichtliche Medizin für Polizeibeamte. Kriminalistik*. Heidelberg.
- Scholz J. (2012). Untersuchungen zur morphologischen und farblichen Entwicklung von Leichenflecken. *Disseration Universität Hamburg*.
- Schuller, E., Pankratz, H., & Liebhardt, E. (1987). Farbortmessung an Totenflecken. *Beitr Gerichtl Med* 45, S. 169 - 173.
- Schuller, E., Pankratz, H., Wohlrab, S., & Liebhardt, E. (1988). Die Bestimmung des Farbortes der Totenflecken in Beziehung zur Wegdrückbarkeit. In G. Bauer (Hrsg.), *Gerichtsmedizin, Festschrift für Wilhelm Holczabek* (S. 295 - 302). Wien: Deutike.
- Schulz, K. (2009). Spektrometrische Untersuchung zur Reoxygenierung des Hämoglobins in Totenflecken bei postmortaler Kälteexposition. *Inaugural-Dissertation Universität Freiburg*.
- Schwarzacher, W. (1922). Die Anwendung der spektrophotometrischen Blutuntersuchung in der gerichtlichen Medizin. *Int J Leg Med*, S. 411 422.
- Thews, G., Mutschler, E., & Vaupel, P. (2005). *Vegetative Physiologie 5. Auflage*. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.

Usumoto Y. et. al. (2009). Estimation of postmortem interval based on the spectrophotometric analysis. *Legal Medicine* 12, S. 19 - 22.

Vanezis P. (1991). Assessing hypostasis by colormetry. *Forensic Science International* 52, S. 1 - 3.

Vanezis, P., & Trujillo, O. (1996). Evaluation of hypostasis using colorimeter measuring system and its application to assessment of the post-mortal interval (time of death). *Forensic Science International* 78, S. 19 - 28.

## 8. Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: links - leichte Wegdrückbarkeit der Totenflecke auf geringem stumpfen Druck, rechts – Totenflecke nur noch auf scharfkantigen Druck mit Pinzettenspitze bzw. -griff wegdrückbar (Madea B. , 2007) - 2 -
- Abbildung 2: Electromagnetic Wave Spectrum Horst Frank, Jailbird and Phrood, 17.März 2008 - 6 -
- Abbildung 3: Referenzspektren des Oxyhämoglobins (HbO<sub>2</sub> – blau) und des desoxygenierten Hämoglobins (Hb - grün) im sichtbaren Spektralbereich von Dermalog - 9 -
- Abbildung 4: 3D-Aufbau des Reflexionsspektrometers, Dermalog 17.03.10 - 16 -
- Abbildung 5: Strahlengang des Reflexionsspektrometers, Dermalog 17.03.2010 - 17 -
- Abbildung 6: 3D-Konstruktionsausschnitt für die Kraftmessung, Dermalog 17.03.2010 - 17 -
- Abbildung 7: Reflexionsspektrometer, Dermalog 17.03.2010 - 18 -
- Abbildung 8: Anzahl der Fälle nach Aufteilung in Altersgruppen und Geschlechter - 23 -
- Abbildung 9: Kreisdiagramm Prozentzahl der Todesursachen - 24 -
- Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Intensität der Livores mortis in Anhängigkeit zur pm-Zeit und Druckstärke - 26 -
- Abbildung 11: Verlauf der Wegdrückbarkeit mit dem Daumendruck - 27 -
- Abbildung 12: Differenz der ACU zu den jeweiligen pm-Zeiten von Maximum 1 bei 556 nm - 28 -
- Abbildung 13: Differenz der ACU zu den jeweiligen pm-Zeiten von Maximum 2 bei 759 nm - 30 -
- Abbildung 14: Vergleich der spektroskopische Wegdrückbarkeit in Bezug auf die Daumendruckmethode - 32 -
- Abbildung 15: Verlauf der Ausprägung - 33 -
- Abbildung 16: Verlauf der Farbe - 34 -

- Abbildung 17: Verlauf der Konfluenz - 35 -
- Abbildung 18: Verlauf der Umgebungstemperatur - 37 -
- Abbildung 19: Verlauf der Hauttemperatur - 38 -
- Abbildung 20: Verlauf der Körperkerntemperatur - 40 -
- Abbildung 21: BMI - 41 -

## 9. Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Eigenschaften der Totenflecke und ihre zeitliche Beziehung zur Todeszeit (Nach Angaben von Naeve (Neave W., 1978)) (Madea B., 2006) - 3 -
- Tabelle 2: Eigenschaften der Totenflecke und ihre zeitliche Beziehung zur Todeszeit nach Angaben der Literatur 1905 bis 1963 unter Annahme einer symmetrischen Verteilung um den Durchschnittswert berechnet. (Madea B., 2006) - 4 -
- Tabelle 3: Häufigkeit der Messwerte zu den jeweiligen pm-Zeiten - 25 -
- Tabelle 4: postmortale Kühlungszeiten - 36 -
- Tabelle 5: Verlauf der Umgebungstemperatur - 36 -
- Tabelle 6: Verlauf der Hauttemperatur - 37 -
- Tabelle 7: Verlauf der Körperkerntemperatur - 39 -
- Tabelle 8: BMI - 41 -

## **10.Danksagung**

Herzlich bedanken möchte ich mich bei allen Personen, die direkt und indirekt zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben, im Besonderen bei Herrn Prof. Dr. med. Püschel für die Überlassung dieses interessanten Themas.

Frau Dr. med. C. Edler und Herrn Prof. Dr. med. S. Anders für die sehr angenehme Betreuung, immer zur Verfügung stehende Hilfsbereitschaft sowie tatkräftige Unterstützung bis zur endgültigen Niederschrift dieser Arbeit.

Herrn Günther Mull, Dr. A. Kulcke, E. Lehmann und H.-C. Wulf von der Firma Dermalog, ohne deren Erfindungsreichtum die Idee dieser Arbeit gar nicht entstanden wäre.

Frau S. Sehner, die mit ihrer außerordentlichen mathematischen Fähigkeit statistische Probleme gelöst hat.

Meinen Eltern, ohne die für mich das Studium der Humanmedizin nicht möglich gewesen wäre.

Und schließlich meiner Ehefrau und dem noch nicht geborenen Kind, die mich stets ermutigt haben, diese Dissertation zu beenden.

## **11.Lebenslauf**

Lebenslauf entfällt aus datenschutzrechtlichen Gründen.



## **12.Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Hamburg, den 09.09.2019

Christian Ryan Roy Wessel