

Aus dem Institut für Rechtsmedizin  
der Universität zu Köln  
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. M. A. Rothschild

# **Auswertung von chemisch-toxikologischen Haaranalysen unter forensischen Aspekten**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der zahnärztlichen Doktorwürde  
der Medizinischen Fakultät  
der Universität zu Köln

vorgelegt von  
Anna Tafipolski  
aus Moskau (Russland)

promoviert am 07. Februar 2024



Dekan: **Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink**

1. Gutachter: **Universitätsprofessor Dr. med. M. A. Rothschild**
2. Gutachter: **Privatdozent Dr. med. M. H. J. Wiesen**

## Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Herr Dr. rer. nat. Martin Jübner  
Frau Anne Adams (statistische Beratung)  
Frau Julia Frank (statistische Beratung)

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die statistische Beratung erfolgte durch Frau Anne Adams und Frau Julia Frank vom Institut für Medizinische Statistik und Bioinformatik der Universität zu Köln.

Der dieser Arbeit zugrunde liegenden Datensatz wurde ohne meine Mitarbeit durch die wissenschaftlichen Mitarbeitenden der toxikologischen Abteilung in dem Institut für Rechtsmedizin zunächst zum Zweck der gutachterlichen Beurteilung in das laborinterne Management-System (LIMS) eingepflegt. Nach Anonymisierung der Daten durch Herrn Dr. M. Jübner wurde die weitere Bearbeitung von mir durchgeführt.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Messergebnisse wurden ohne meine Mitarbeit durch die technischen Mitarbeitenden der toxikologischen Abteilung des Instituts für Rechtsmedizin im Rahmen von Routineanalysen mittels gaschromatographisch/massenspektrometrischer Methodik erhoben.

Die statistischen Auswertungen wurden von mir mit der Statistiksoftware SPSS Version 28.0.1.0 durchgeführt.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den (25.09.2023)

Unterschrift:  .....

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich unterstützt und es mir ermöglicht haben, diese Doktorarbeit zu schreiben.

Zunächst möchte ich mich herzlich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Markus Rothschild, für seine umfassende Betreuung und vor allem dafür, dass er das Schreiben meiner Dissertation in seinem Institut ermöglicht hat, bedanken.

Ein besonderer herzlicher Dank geht an meinen Betreuer, Herrn Dr. rer. nat. Martin Jübner. Er hat mir das Thema der Arbeit zugeteilt, sich stets um organisatorische Angelegenheiten gekümmert und mich bei inhaltlichen Fragen vielseitig durch sein exzellentes fachliches Wissen begleitet. Ferner danke ich ihm für seine äußerst hilfreiche Korrektur der Dissertation sowie dafür, dass er für mich jederzeit ein offenes Ohr gehabt hat.

Des Weiteren möchte ich meinen Dank gegenüber Frau Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Hilke Andresen-Streichert äußern, die mir das Skript „Erfolgreich promovieren“ empfohlen hat, an dem ich mich bei der Anfertigung meiner Dissertation orientieren konnte.

Ein weiterer Dank gilt allen Mitarbeitenden des Instituts für Rechtsmedizin der Uniklinik Köln, die mir stets für technische, organisatorische und fachliche Fragen zur Verfügung standen.

Außerdem richte ich meinen Dank an Frau Anne Adams und Frau Julia Frank vom Institut für Medizinische Statistik und Bioinformatik der Uni Köln für die statistische Beratung sowie die Unterstützung bei der statistischen Auswertung.

Ein besonderer Dank geht an meine Freunde und vor allem meine Familie. Insbesondere an meinen Ehemann Konstantin und meine kleine Tochter Lena, die mir Kraft und Zuversicht gegeben und mich in schwierigen Zeiten unterstützt haben.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die immer an mich geglaubt haben. Diese Arbeit möchte ich meiner Mutter widmen, die leider frühzeitig infolge einer schweren Krankheit von uns gegangen ist.

Für meine Mama

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>9</b>
<b>1. ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>10</b>
<b>2. EINLEITUNG</b> .....	<b>11</b>
2.1. Das menschliche Haar .....	11
2.1.1. Aufbau und Struktur des Haares.....	11
2.1.2. Die Haarfarbe .....	16
2.2. Die forensische Haaranalyse .....	20
2.2.1. Ziele und Anwendungsgebiete.....	20
2.2.2. Methoden der Haaranalyse.....	26
2.2.3. Validität.....	29
2.3. Ausgangslage und Problembeschreibung .....	30
2.4. Fragestellungen und Ziele der Arbeit .....	31
<b>3. MATERIAL UND METHODEN</b> .....	<b>32</b>
3.1. Material .....	32
3.1.1. Amfetamine .....	32
3.1.2. Cannabinoide .....	33
3.1.3. Cocain und Opiate.....	34
3.2. Methoden.....	35
3.2.1. Aufbereitung der Haarproben .....	35
3.2.2. Der Nachweis von Amfetaminen.....	35
3.2.3. Der Nachweis von Cannabinoiden.....	37
3.2.4. Der Nachweis von Cocain und Opiaten.....	38
3.3. Grenzwerte .....	39
3.3.1. Amfetamine .....	39
3.3.2. Cannabinoide .....	39
3.3.3. Cocain und Opiate.....	40

3.4.	Statistische Auswertungen .....	41
<b>4.</b>	<b>ERGEBNISSE.....</b>	<b>42</b>
4.1.	Anlass der Untersuchung und Haarfarben.....	42
4.2.	Substanzklassen.....	44
4.2.1.	Substanznachweise gesamt .....	44
4.2.2.	Substanznachweise bei Verstorbenen .....	45
4.2.3.	Substanzklassen in Abhängigkeit von der Haarfarbe der gesamten Kohorte ..	46
4.2.4.	Substanzklassen nach Haarfarben bei Verstorbenen.....	48
4.3.	Mittlere Konzentrationen der Substanzen bei Verstorbenen .....	50
4.4.	Gruppierte Boxplots nach Haarfarbe und Substanzgruppe.....	51
4.4.1.	Cannabinoide .....	51
4.4.2.	Amfetamine .....	51
4.4.3.	Cocain.....	52
4.4.4.	Opiate .....	53
4.5.	Gruppierte Boxplots nach Substanzklasse und Anlass .....	54
4.5.1.	Cannabinoide .....	54
4.5.2.	Amfetamine .....	55
4.5.3.	Cocain.....	56
4.5.4.	Opiate .....	57
4.6.	Kreuztabellen Substanzklassen nach Anlass .....	58
4.6.1.	Cannabinoide und Anlass .....	58
4.6.2.	Amfetamine und Anlass .....	60
4.6.3.	Cocain und Anlass .....	61
4.6.4.	Opiate nach Anlass .....	62
4.7.	Kreuztabellen Substanzklassen nach Haarfarbe .....	64
4.7.1.	Cannabinoide nach Haarfarbe .....	64
4.7.2.	Amfetamine nach Haarfarbe .....	65
4.7.3.	Cocain nach Haarfarbe .....	67
4.7.4.	Opiate nach Haarfarbe .....	68

<b>5. DISKUSSION .....</b>	<b>70</b>
5.1. Ausblick.....	76
<b>6. LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>78</b>
<b>7. ANHANG.....</b>	<b>82</b>
7.1. Abbildungsverzeichnis.....	82
7.2. Tabellenverzeichnis.....	83

## Abkürzungsverzeichnis

ACN	Acetonitril
Amf	Amfetamin
BE	Benzoylecgonin
BSTFA	N,O- Bis(trimethylsilyl)trifluoroacetamid
CBD	Cannabidiol
CBN	Cannabinol
CG-MS	Gaschromatografie-Massenspektrometrie
Coc	Cocain
Cod	Codein
DP	dermal Papilla
EDDP	Ethylidindimethyldiphenylpyrrolin
EME	Ecgoninmethylester
M	Matrix
MC1R	Melanocortin- 1- Rezeptor
Metamf	Metamfetamin
MAM	6-Monoacetylmorphin
MBHFBA	N-Methyl-bis-Heptafluorbutyramid
MDA	Methylen-Dioxy-Amfetamin
MDEA	Methylen-Dioxy-EthylenAmfetamin
MDMA	Methylen-Dioxy-Metamfetamin
Mor	Morphin
MPU	Medizinisch-psychologische Untersuchung
rpm	revolutions per minute/ Umdrehungen pro Minute
THC	Tetrahydrocannabinol
THC-CS	Tetrahydrocannabinol-Carbonsäure
THC-OH	11-Hydroxy-Tetrahydrocannabinol
UV	Ultraviolett

## 1. Zusammenfassung

Die forensische Haaranalyse entwickelte sich zu einer bewährten und relevanten Methode der forensischen Toxikologie. Sie wird im Rahmen polizeilicher, staatsanwaltschaftlicher und gerichtlicher Fragestellungen eingesetzt. Ziel einer forensischen Haaranalyse ist es, den Konsum von verschiedenen Wirkstoffen wie Medikamenten, Alkohol und Betäubungsmitteln oder aber eine entsprechende Abstinenz nachzuweisen.

In der Abteilung für forensische Toxikologie des Instituts für Rechtsmedizin der Uniklinik Köln werden routinemäßig Haaranalysen durchgeführt, doch auch Blut und Urin werden auf Medikamente oder illegale Substanzen im Rahmen von verkehrsrechtlichen oder strafrechtlichen Fragestellungen getestet.

Die vorliegende Arbeit analysierte die Ergebnisse der Untersuchungen der Haarproben von 720 Personen retrospektiv anhand der Fragestellung, welche Rückschlüsse sich auf das Konsummuster sowie den Einfluss der Haarfarbe auf die quantitative Nachweise ziehen lassen. Dabei wurde die Frage gestellt, ob möglicherweise die Haarfarbe eine der limitierenden Faktoren bei forensischen Haaranalysen sein könnte und wie in diesem Fall die Limitierung zu berücksichtigen wäre. Ferner stellte sich die Frage nach einer möglichen Einordnung des Konsummusters der Probandinnen und Probanden hinsichtlich des Anlasses der Untersuchung (z. B. Jugendamt, Fahrerlaubnisbehörde).

Die statistischen Auswertungen zeigten einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Anlässen der Testung und der Rate an positiven Tests bei allen Substanzgruppen. Die Haarfarbe als limitierender Faktor konnte in der vorliegenden Studie nicht festgestellt werden. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Haarfarben waren nicht signifikant. Zur Haarfarbe als limitierender Faktor bedarf es weitere Forschungen.

## **2. Einleitung**

### **2.1. Das menschliche Haar**

#### **2.1.1. Aufbau und Struktur des Haares**

Haare werden auch als Hautanhangsgebilde bezeichnet, denn sie bestehen aus Horn, der gleichen Substanz wie die Finger- und Fußnägel. Dabei handelt es sich um bereits abgestorbene Zellen. Deshalb enthalten weder Haare noch Finger- und Fußnägel Nerven oder Blutgefäße (Madea & Musshoff 2004). Der Mensch hat rund fünf Millionen Haare am gesamten Körper, davon entfallen 100.000 bis 150.000 auf die Kopfhare. Die Anzahl der Haare auf dem Kopf hängt dabei von der Haarfarbe der jeweiligen Person ab. Die meisten Haare auf dem Kopf besitzen blonde Menschen mit rund 150.000 Haaren. Dunkelhaarige und Brünette tragen etwa 100.000 Kopfhare und die wenigsten Haare auf dem Kopf besitzen die Rothaarigen mit circa 90.000 (Madea & Musshoff 2004).

Die Funktion der Haare ist es, den Körper nach außen abzugrenzen und ihn vor schädlichen Umwelteinflüssen zu schützen. Die gesamte Hautoberfläche des Menschen ist dabei mit Haaren – sichtbar oder nicht sichtbar – bedeckt. Dabei können verschiedene Typen von Haaren voneinander unterschieden werden, je nachdem, an welcher Körperregion die jeweiligen Haare wachsen. Eine Million Haare machen bereits die Kopf- und die Gesichtsbehaarung zusammen aus. Die Haarfollikeldichte beläuft sich dabei auf 200 Follikel pro Quadratzentimeter Haut (Madea & Musshoff 2004).

Das menschliche Haar allgemein stellt ein polymeres, stark vernetztes und teilweise kristallines Netzwerk dar. Es enthält eine Vielzahl an funktionellen Gruppen wie Säuren, Basen und Peptiden. Menschliche Haare bestehen zum größten Teil aus Proteinen, vorwiegend dem Protein Keratin. So machen 65–90 % der Haarsubstanz Proteine, überwiegend Keratin, aus. Zu 15–35 % enthält ein menschliches Haar Wasser und zu 1–9 % Lipide, vor allem das Sebum, das in den Talgdrüsen gebildet wird (Harkey 1993).

Die Haare beim Menschen sind bereits von Geburt an angelegt. Ab der sechsten Schwangerschaftswoche entwickelt der menschliche Embryo bereits Haare. Dabei werden sämtliche Haarfollikel am Körper angelegt. Bei der Geburt besitzt ein neugeborener Mensch bereits alle Haarfollikel am gesamten Körper, dementsprechend kommt es zu keinen erneuten Anlagen von Follikeln mehr. Nicht alle Follikel bilden jedoch bereits von Geburt an Haare aus. Die Ausbildung von Körperbehaarung aus den Follikeln kann zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Lebens erfolgen. So bilden die Haarfollikel erst ab dem 12. bis 13. Lebensjahr die Schamhaare und bei Männern die Barthaare (Madea & Musshoff 2004).

Das menschliche Haar setzt sich aus Haarschaft, Haarzwiebel und Haarwurzel zusammen. Eine schematische Darstellung des menschlichen Haares wird in der nachfolgenden Abbildung 1 gezeigt.

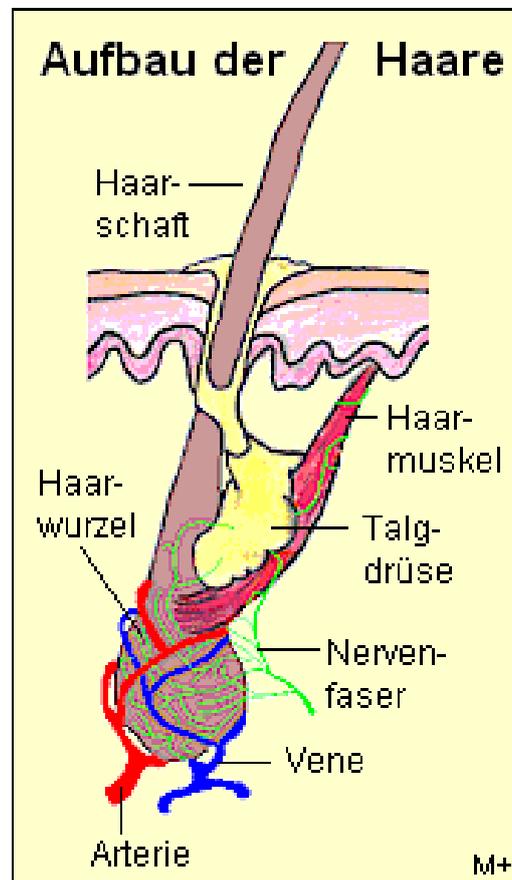


Abbildung 1: Aufbau des menschlichen Haares

Quelle: MedizinInfo online: <http://www.medizininfo.de/hautundhaar/haar/haaraufbau.htm> (Zuletzt abgerufen am 04.05.2022).

Wie im obigen Bild zu sehen ist, stellt der Haarschaft den nach außen sichtbaren Teil des Haares dar. Haarwurzel und Haarzwiebel befinden sich in der Haut. Die Haarwurzeln sind dabei fest in der Haut verankert. Ihre Enden sind verdickt. Diese verdickten Enden sind die Haarzwiebeln. Sie sind an der aus Bindegewebe bestehenden Haarpapille in der Haut verankert. Diese Vorrichtung befestigt die Haare in der Haut. Die Haarwurzel ist eng mit dem Haarfollikel verbunden. Aus dem obigen Schaubild wird ersichtlich, dass Haarwurzel und Haarschaft mit der Talgdrüse verbunden sind. Diese dient dazu, das Haar einzufetten und flexibel sowie geschmeidig zu machen. Ebenfalls in der obigen Grafik zu sehen ist der Haarmuskel. Jedes Haar wird von einem Muskel und von Nervenfasern in der Haut umgeben. Diese dienen dazu, Veränderungen in der Umgebung wie beispielsweise Temperatur oder Berührungen zu fühlen (Madea & Musshoff 2004).

In den Haarfollikeln wird das Haar gebildet und dessen Wachstum geht von dort aus. Die Haarfollikel ragen dabei 4 mm in die Haut hinein und sind funktionell eng mit den Talgdrüsen in der Haut verknüpft. An der Basis der Haarfollikel findet das Wachstum statt und dabei erfolgt die Zellteilung, die für das Haarwachstum verantwortlich ist. Die Zellen vergrößern dort ihr Volumen und dadurch kommt es zu deren Verlängerung. Die Farbe der Haare wird in der Keratinisierungszone gebildet. Dort synthetisieren die Zellen die Farbpigmente Phänomelanin oder Melanin. Ebenso findet in der Keratinisierungszone die Verhornung des Haares statt und dabei entstehen die Haarfasern, die sogenannten Fibrillen (Madea & Musshoff 2004; Herrmann & Trinkkeller 2015).

An der Basis der Haarwurzel ist die Haarpapille zu finden, die in der unten stehenden Abbildung 2 dargestellt ist.



Abbildung 2: Haarpapille

Quelle: Dermweb: <http://www.dermweb.com/hairnailsmucoousmembranes/histo1page.htm> (Zuletzt abgerufen am 05.05.2022).

Diese wird mithilfe von zahlreichen Kapillaren durchblutet und so mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt. In der obigen Abbildung wird die Papille mit DP für *dermal papilla* gekennzeichnet. In ihrem Zentrum, der Matrix, die im obigen Bild mit einem M beschriftet ist, liegt der Bildungs- und Wachstumsbereich des Haares. Dort werden permanent neue Keratinozyten hergestellt, die sich aus epidermalen Stammzellen entwickeln (Madea & Musshoff 2004; Herrmann & Trinkkeller 2015).

In der Matrix befinden sich auch die Melanozyten, diejenigen Zellen, welche die Pigmente für die Haarfarbe produzieren. Melanozyten synthetisieren das Melanin und speichern es in Melanosomen, die sie dann an die Keratinozyten abgeben. Der Haarschaft wird von Hornzellen gebildet, die vom Haarfollikel aus zur Oberfläche der Haut und darüber hinaus

gelangen und so als sichtbare Haare in Erscheinung treten (Madea & Musshoff 2004; Herrmann & Trinkkeller 2015).

Der sichtbare Teil des Haares besteht demnach aus abgestorbenen Hornzellen, die aus drei unterschiedlichen Schichten zusammengesetzt sind (Herrmann & Trinkkeller 2015):

1. Schuppenschicht (Cuticula)
2. Mark (Medulla)
3. Faserschicht (Cortex)

Diese werden in der unteren Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Die anatomischen Schichten des menschlichen Haares

Quelle: Medlexi.de: <https://medlexi.de/Datei:Haare.jpg> (Zuletzt abgerufen am 05.05.2022)

Die äußerste Schicht der Haare bildet die Schuppenschicht oder Cuticula. Diese stellt eine dünne, mehrlagige Schicht dar und umhüllt den Cortex, die sogenannte Faserschicht, wie in der obigen Grafik zu sehen ist. Die Cuticula ist durchsichtig. Durch sie schimmern daher die Farbpigmente des Haares durch. Den Hauptbestandteil des Haares bildet der Cortex, die Faserschicht. Dort befinden sich auch die Pigmente für die Haarfarbe. Die innerste Schicht bildet das Mark, das als Medulla bezeichnet wird (Madea & Musshoff 2004; Herrmann & Trinkkeller 2015).

Die Cuticula besteht aus abgestorbenen, verhornten Zellen, die wie Schuppen übereinanderliegen, ähnlich wie bei einem Tannenzapfen. Die Funktion der Cuticula ist der Schutz der inneren Haarschichten und -fasern. Der Cortex setzt sich aus langen,

keratinisierten Zellen zusammen, die in Fibrillen von einer Länge von circa 100 µm angeordnet sind. In diesen Zellen befinden sich die Pigmente Melanin und Phäomelanin, welche die Farbe der Haare ausmachen und im nachfolgenden Unterkapitel noch näher beschrieben werden. In der Medulla sind die Zellen weniger dicht angeordnet als im Cortex. In der Medulla können sich außerdem Lufteinschlüsse befinden (Harkey 1993; Herrmann & Trinkkeller 2015). Für die Medizin und vor allem für den Bereich der Forensik ist die Cuticula von herausragender diagnostischer Bedeutung, denn in ihr können Gift- und Schadstoffe nachgewiesen werden (Harkey 1993).

Menschliche Haare wachsen zwischen 0,6 und 2 cm pro Monat (Herrmann & Trinkkeller 2015; Harkey 1993), wobei es große individuelle Unterschiede gibt. Generell kann gesagt werden, dass ein menschliches Haar im Durchschnitt circa 1 cm pro Monat wächst (Madea & Musshoff 2004; Herrmann & Trinkkeller 2015; Harkey 1993). Die Dauer eines Wachstumszyklus eines menschlichen Haares beträgt zwei bis sieben Jahre und kann individuell stark variieren, abhängig von der genetischen Veranlagung, dem Geschlecht und dem Lebensstil (Herrmann & Trinkkeller 2015).

Während dieser Zeit durchläuft ein Haar drei unterschiedliche Phasen (Elsässer 2013; Herrmann & Trinkkeller 2015):

1. Die Anagenphase (Wachstumsphase)
2. Die Katagenphase (Übergangsphase)
3. Die Telogenphase (Ruhephase)

Die Anagenphase stellt die längste und wichtigste Phase der Wachstumszyklus dar. Die Dauer variiert individuell zwischen zwei und sieben Jahren. Das Haar befindet sich in der Anagenphase so lange, wie die Zellen in der Matrix (siehe obige Abbildung 2) befähigt sind, neue Pigment- und Hornzellen zu produzieren. Die meisten Haare, die sich auf dem Kopf eines Menschen befinden (ca. 80–90 %), sind zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Anagenphase (Elsässer 2013; Madea & Musshoff 2004). Die Katagenphase stellt hingegen eine Art Übergangsphase dar und dauert zwischen 2 und 3 Wochen. Während dieser Zeit wird das Wachstum dieses bestimmten Haares eingestellt. Das Haar löst sich nun von der Haarpapille (Abbildung 2) und geht in die sogenannte Telogenphase über. Diese kennzeichnet die Ausfallphase des jeweiligen Haares und dauert zwischen 2 und 4 Monate. Es können ca. 3 % der Haare sich in der Katagenphase- und bis zu 15 % in der Telogenphase befinden (Elsässer 2013). Die Telogenphase ist von der Regeneration des Haarfollikels und der Haarpapille (siehe Abbildungen 1 und 2) gekennzeichnet. Die Matrix und die Papille (Abbildung 2) regenerieren sich und damit beginnt die Bildung eines neuen Haares. Dieses wird allmählich an die Hautoberfläche geschoben und ersetzt das alte Haar, das nun ausfällt (Elsässer 2013).

## 2.1.2. Die Haarfarbe

In Kapitel 2.1.1 wurden Aufbau, Struktur und Wachstum des menschlichen Haares erläutert und es wurde ersichtlich, dass es sich beim menschlichen Haar um ein komplexes Hautanhangsgebilde bestehend aus mehreren Schichten handelt. Neben Proteinen, Wasser und Lipiden enthält das menschliche Haar auch Pigmente, deren Zusammensetzung die Haarfarbe ausmachen (Elsässer 2013).

Die Naturhaarfärbung des Menschen stellt ein kontinuierliches Spektrum dar, das von einer Vielzahl an Genen gesteuert wird (Tully 2007). Bis heute sind nicht alle genetischen Anlagen für die Haarfarbe bekannt (Pavan & Sturm 2019). Eines der bekanntesten Gene, welche die Haar- und auch die Hautfarbe bestimmen, codiert für den Melanocortin-1-Rezeptor (MC1R). Hierzu ist bekannt, dass eine bestimmte Mutation im Gen des MC1R für rote Haare verantwortlich ist. Rund 1 % der Weltbevölkerung besitzt von Natur aus rote Haare (Tully 2007; Roberts et al. 2015).

Die häufigste Haarfarbe weltweit ist schwarz. Mehr als 50 % der Weltbevölkerung hat schwarze Haare (Sturm 2009; Pavan & Sturm 2019). Die zweithäufigste Haarfarbe ist Dunkelbraun. Dunkle und schwarze Haare sind genetisch dominant. In Europa haben die meisten Menschen brünette bis dunkle Haare (Sturm 2009). Von Natur aus blonde Haare besitzen lediglich 2 % der Menschen auf der Welt, die vorwiegend in Nord- und Osteuropa zu finden sind. Am seltensten sind von Natur aus rote Haare. Dies kommen am häufigsten bei Menschen in Irland, Schottland und Wales vor (Sturm 2009).

Die Haarfarbe ist genetisch festgelegt (Pavan & Sturm 2019). Die Palette der menschlichen Haarfarben reicht von hellem Weißblond bis zu tiefem Schwarz und beinhaltet dazwischen die unterschiedlichsten Schattierungen und Kombinationen. Verantwortlich für die Farbe der menschlichen Haare ist das Pigment Melanin (Elsässer 2013; Harkey 1993). Das Melanin kommt in zwei unterschiedlichen Formen vor (Elsässer 2013; Pavan & Sturm 2019):

- als Eumelanin
- als Phäomelanin

Ferner existieren auch oxidierte Formen des Eumelanins und des Phäomelanins: das Oxyeumelanin sowie das Oxyphäomelanin. Das Verhältnis der obig genannten Pigmente sowie das Verhältnis zu deren oxidierten- und reduzierten Formen bestimmen die jeweilige Haarfarbe (Pavan & Sturm 2019; Sturm 2009; Elsässer 2013; Tully 2007; Ito & Wakamatsu 2011).

Im menschlichen Körper wird sowohl Eumelanin als auch Phäomelanin hergestellt. Allerdings ist das Verhältnis dieser Pigmente von Mensch zu Mensch unterschiedlich (Pavan & Sturm 2019). Überwiegt die Konzentration des Eumelanins, so erhält der betroffene Mensch eine

dunklere Haarfarbe und umgekehrt können die Haare eine rote oder blonde Farbe annehmen, wenn das Phäomelanin dominiert. Generell kommt es bei einer geringen Konzentration von Eumelanin zu einer helleren Haarfarbe. Wird eine hohe Menge an Eumelanin produziert, so wird die Haarfarbe brünett, dunkel oder schwarz (Pavan & Sturm 2019; Sturm 2009; Ito & Wakamatsu 2011).

Die Strukturformeln der beiden Pigmente zeigt die nachfolgende Abbildung 4.

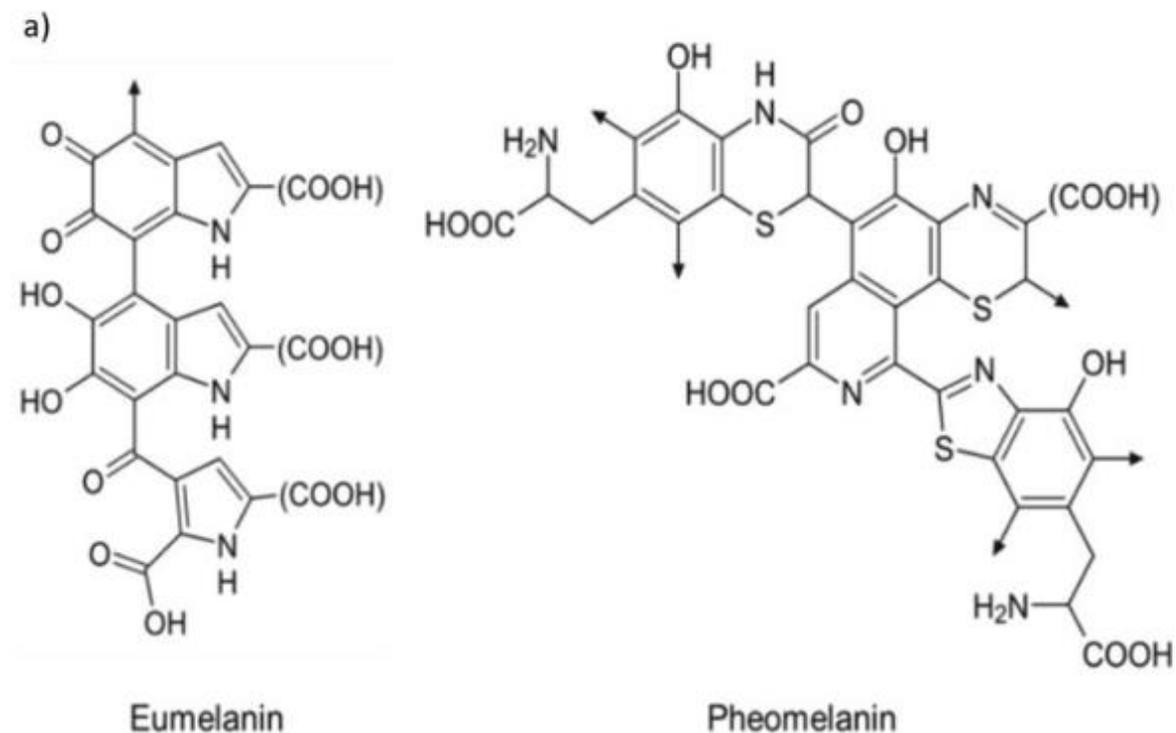


Abbildung 4: Strukturformeln von Eumelanin und Phäomelanin

Quelle: Roberts et al. 2015, S. 55

Für die Synthese von Melanin sind die Melanosomen zuständig. Bei diesen handelt es sich um Zellorganellen, welche den Lysosomen ähnlich sind (Roberts et al. 2015). Die Melanosomen befinden sich in den Melanozyten. Diese Zellen können in unterschiedlichen Geweben vorkommen, darunter in Haarfollikeln und Hautzellen. Das Eumelanin dient dem Schutz der Haut vor Sonneneinstrahlung, insbesondere vor der ultravioletten (UV-)Strahlung (Pavan & Sturm 2019). Bei den Haaren werden die Pigmente in den Melanozyten, die sich im Haarfollikel befinden, gebildet. Während der Anagenphase (siehe Kapitel 2.1.1.) bilden die Melanozyten die sogenannten Melanosomen. Diese werden im Cortex des Haares (siehe Kapitel 2.1.1) eingelagert (Harkey 1993).

Die Melanosomen verfügen über das Enzym Tyrosinase. Dieses stellt das wichtigste Enzym in der Melanogenese dar. Das Enzym katalysiert die Umwandlung von L-Tyrosin zu L-

Dopachinon. Daraus wird in einer Reihe an enzymatischen Schritten Eumelanin oder Phäomelanin gebildet (Sturm 2009; Ito & Wakamatsu 2011).

Mittels Cystein kann aus Dopachinon nun Cysteinyl-Dopa entstehen und daraus Alanyl-Hydroxyl-Benzothiazin. Dies kennzeichnet die Schritte der Biosynthese des roten oder gelben Phäomelanins. An der Bildung von Eumelanin ist die Dopachrom-Tautomerase beteiligt, welche die Umwandlung von Dopachinon in schwarzes Eumelanin katalysiert (Shakil et al. 2019).

Ergrautes und weißes Haar hat seine Pigmentierung verloren. Dies lässt sich durch die verminderte Aktivität der Tyrosinase erklären. Somit werden keine Pigmente mehr synthetisiert und auch keine mehr in den Haarschaft eingebaut werden. Das Haar erhält daher eine weiße, durchsichtige Farbe, denn statt Pigment werden nun Luftblasen eingeschlossen. Da aber nicht jedes Haar gleichzeitig seine Pigmente verliert, weil nicht in jedem Haarfollikel die Aktivität der Tyrosinase abnimmt, kann es zu einer Mischung aus noch pigmentierten und nicht mehr pigmentierten Haaren kommen. Manche Haare sind dann weiß, während die anderen noch ihre natürliche Farbe behalten. Bei dunklem und braunem Haar erscheint diese Mischung optisch als graues Haar (Roberts et al. 2015; Shah et al. 2018; Sturm 2009; Elsässer 2013).

Die einzelnen Schritte der Pigmentsynthese in den Melanozyten im Haarfollikel zeigt die unten stehende Abbildung 5.

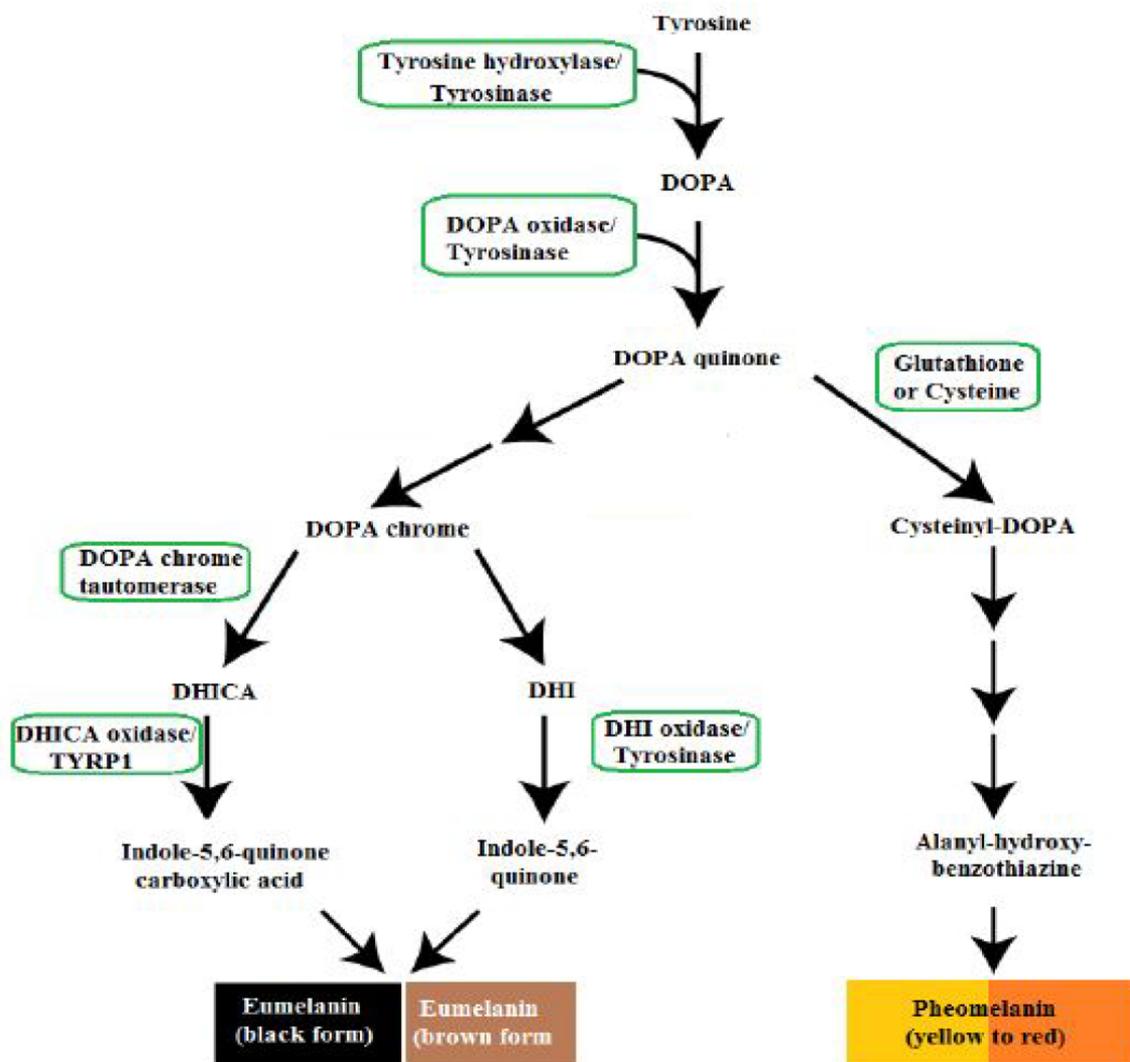


Abbildung 5: Synthese-Pathway des Eumelanins und des Phäomelanins im Haarfollikel

Quelle: Shah et al. 2018, S. 254

Das obige Bild stellt die biochemischen Prozesse in den Melanozyten dar, die an der Bildung der Haarfarbe beteiligt sind. Links ist der Pathway für das dunkle Eumelanin dargestellt, während rechts die Schritte bei der Genese des hellen oder roten Phäomelanins gezeigt werden (Shah et al. 2018).

Bei der Inkorporation von Substanzen und Abbauprodukten im Haar spielt dessen Melaningehalt eine entscheidende Rolle, denn Drogen, Arzneistoffe und Abbauprodukte werden vermehrt in stärker pigmentierten Haaren eingelagert (Madea & Musshoff 2004). Die Diffusion aus den Haarfollikeln erfolgt über die Melanozyten, die in Kapitel 2.1.1 beschrieben wurden. Melanozyten verfügen über einen sauren pH-Wert im Gegensatz zum Blut, das basisch ist. Aufgrund dieses Säure-Basen-Unterschiedes kommt es zu einer Anhäufung von basischen Substanzen im Zytoplasma der Melanozyten. Diese binden sich an das Melanin

und werden dadurch protoniert. Dies erschwert deren Rücktransport ins Blut. Infolgedessen lagern sich die Substanzen verstärkt in den Melanozyten an. Je stärker pigmentiert das Haar ist (braun, dunkel, schwarz), desto mehr Substanzen können an das Melanin binden und sich ins Haar einlagern (Madea & Musshoff 2004).

Dabei wird zwischen den dunklen und braunen Eumelaninen und den gelben- und roten Phäomelaninen unterschieden, die für die individuelle Pigmentierung der Haare verantwortlich sind (Tully 2007; Roberts et al. 2015). Die Eumelanine sind sehr robust und verhalten sich bei physiologischem pH-Wert polyanionisch. Dunkelhaarige Menschen besitzen viel Eumelanin, während bei blonden- und rothaarigen Personen vor allem das Phäomelanin vorherrscht (Tully 2007; Roberts et al. 2015). Letztere sind durch eine deutlich geringere Stabilität gekennzeichnet als die Eumelanine. Auch verfügen die Phäomelanine über eine geringere Bindungsfähigkeit an bestimmte Substanzen als Eumelanine. Frühere Studien ergaben, dass die Haare von dunkelhaarigen Menschen mit viel Eumelanin über eine signifikant stärkere Fähigkeit, Fremdstoffen im Haar einzulagern, verfügen. Die dunklen Eumelanine binden Fremdstoffe stärker und formieren stabilere Bindungen mit Letzteren (Henderson et al. 1998; Henderson 1993; Gygi et al. 1996).

## **2.2. Die forensische Haaranalyse**

### **2.2.1. Ziele und Anwendungsgebiete**

Die Haaranalyse ist eine bekannte und bedeutsame Methode in der forensischen Toxikologie, die hinsichtlich polizeilicher, staatsanwaltschaftlicher und gerichtlicher Fragestellungen dazu dienen kann, eine Aufnahme von verschiedenen Wirkstoffen wie Medikamenten, Alkohol und Betäubungsmitteln nachzuweisen (Harkey 1993).

Wirkstoffe sowie deren Abbauprodukte werden über eine passive Diffusion in das Haar eingebaut. Dies erfolgt über die Blutkapillaren im Haarfollikel (siehe Kapitel 2.1.1, Abbildung 1). Auch über den Schweiß und die Talgdrüsen (Abbildung 1) können Arzneistoffe, Drogen sowie deren Abbauprodukte in den Haarschaft eingebaut werden. Ferner existieren externe Kontaminationsmöglichkeiten, beispielsweise über Dämpfe, Rauch oder Partikel in der Luft (Kintz 2017; Cuypers & Flanagan 2018). Ein Beispiel dafür sind Kinder, die in drogenkonsumierenden Familien wohnen und regelmäßig einer externen Drogenkontamination exponiert sind (Mantiniaks et al., 2019).

Die Kopfhaare des Menschen eignen sich besonders gut für die Analyse auf etwaigen Substanzmissbrauch, denn in den Haaren lagern sich die Substanzen und/oder deren Abbauprodukte für längere Zeit ein, was bedeutet, dass sie auch noch über ein längeres Zeitfenster nach dem erfolgten Missbrauch bzw. der Aufnahme nachgewiesen werden können

(Harkey 1993). So können zahlreiche Substanzen wie Drogen und Arzneimittel in Blut und Urin nach Stunden bis Tagen schon nicht mehr nachgewiesen werden, während diese Substanzen sich in das wachsende Haar einlagern und noch nach Monaten nachweisbar sein können (Harkey 1993; Kintz 2017; Mantinieks et al. 2019). Durch eine Haarwäsche lassen sich die Substanzen nicht vollständig entfernen, allerdings kann es bei chemischer Behandlung der Haare wie Colorieren, Dauerwelle oder Blondierungen zu einer Abnahme von Analytenkonzentration in den Haaren in einem Maße kommen, dass Analyten nicht mehr nachweisbar sind (Mantinieks et al. 2019).

Die Haaranalyse als Mittel der Spurensicherung ist seit mehr als zwei Jahrhunderten bekannt. Allerdings war sie damals noch nicht so weit entwickelt wie heute. Im 19. Jahrhundert untersuchten Forensikerinnen und Forensiker vor allem die Farbe, Form und die Dicke der Haare, um etwaige Rückschlüsse auf eine bestimmte Täterin oder einen bestimmten Täter ziehen zu können. Dabei wurde nicht nach Substanzen, sondern gezielt nach bestimmten Personen gesucht, bei welchen die Struktur und Farbe der Haare mit denjenigen, die am Tatort gefunden wurden, übereinstimmten. Die forensische Haaranalyse hinsichtlich Substanzen wurde im Jahr 1858 begründet und im „Praktischen Handbuch der gerichtlichen Medizin“ das erste Mal beschrieben (Casper 1858).

Allerdings war die Sensitivität der damaligen Haaranalysen noch sehr gering und ein gezielter Substanznachweis gelang erst im Jahr 1979. Damals gelang es Forensikerinnen und Forensikern das erste Mal, Morphin im Haar nachzuweisen (Sachs 1997). In den folgenden Jahren und Jahrzehnten wurden die Verfahren und Techniken stetig verbessert, so wurde beispielsweise mit unterschiedlichen Extraktionsflüssigkeiten und enzymatischen Aufschlussverfahren experimentiert. Während dieser Jahre etablierte sich auch die Chromatografie. Kombiniert wurden chromatografische Verfahren außerdem mit der Massenspektrometrie. Die große Herausforderung, die sich allerdings immer noch stellte, war die Beurteilung hinsichtlich Kontaminationen und der nachträglichen Auswaschung von Substanzen. Bis zum Jahr 1981 war daher die forensische Haaranalyse auf den Nachweis der Substanzen Codein und Morphin limitiert (Valente et al. 1981).

Valente et al. (1981) gelang es Anfang der 1980er-Jahre das erste Mal, Cocain im Haar nachzuweisen. Heutzutage lässt sich eine Vielzahl an Substanzen im Haar nachweisen. Chromatografische Verfahren gekoppelt mit Massenspektrometrie stellen dabei den Goldstandard in der forensischen Haaranalyse dar. Bereits zu Beginn der 2000er-Jahre ließen sich nicht nur Opiate, sondern auch schon Cocain, Benzodiazepine, Amfetamine sowie Tetrahydrocannabinol (THC) im Haar nachweisen (Villain et al. 2004).

Heutzutage können viele Substanzen im Rahmen der forensischen Haaranalyse nachgewiesen werden. So können Aussagen über das Ausmaß sowie die Dauer eines

Substanzabusus bei einer Person anhand der forensischen Haaranalyse getroffen werden. Ebenso können auch Aussagen über die Umweltbedingungen erfolgen, unter denen eine bestimmte Person lebt oder lebte (Ferreira et al. 2019; Airlie et al. 2021). Neben den forensischen Analysen können auch mittels der Haaranalyse klinische Fragestellungen untersucht werden. Beurteilungen der Schuldfähigkeit einer Person können auf der Basis von Haaranalysen erfolgen, auch Abstinenznachweise im Rahmen von fachärztlichen Gutachten können auf diese Weise erbracht werden. Klinisch lassen sich eine regelmäßige Medikamenteneinnahme und Therapiecompliance mittels Haaranalyse nachweisen (Wilkinson & Gwinnett 2020).

Forensisch-toxikologische Haaranalysen werden somit aktuell vor allem im Zusammenhang mit sowohl klinischen als auch rechtlichen Untersuchungen durchgeführt. Sie dienen vor allem dem Nachweis oder Ausschluss des Konsums bestimmter Substanzen. Nachgewiesen werden können sowohl Drogen und Medikamente als auch Abbauprodukte von bestimmten Substanzen. Der Zeitraum der Nachweisbarkeit wird dabei durch die Länge der Haare bestimmt. Möglich ist auch ein Nachweis nach einem einmaligen Konsum eines bestimmten Medikaments oder einer bestimmten illegalen Substanz. Allerdings werden in solchen Fällen besondere Anforderungen an die Analysemethoden gestellt. Bei einer forensischen Haaranalyse sind folgende Faktoren zu berücksichtigen (Wilkinson & Gwinnett 2020; Ferreira et al. 2019; Madea & Musshoff 2004):

- Unterschiede im Wachstum und in der Wachstumsphase der Haare sowie der Inhomogenität des Untersuchungsmaterials
- Unterschiede in der Verteilung und Konzentration der zu untersuchenden Substanz im Haar
- Matrixeffekte, beispielsweise durch das Melanin (siehe Kapitel 2.1.2).
- Chemische Stabilität der zu analysierenden Substanz im Hinblick auf die Extraktionsmethode und -kinetik
- Berücksichtigung äußerer Einflüsse wie Kontamination oder kosmetische Behandlungen wie Haarfärbungen oder Blondierungen

Bis heute werden im Rahmen einer forensischen Haaranalyse hohe Qualitätsanforderungen sowohl an das Equipment und die Prozedur selbst als auch an das durchführende Personal gestellt. Haarproben dürfen beispielsweise nicht in denselben Räumlichkeiten untersucht werden wie Stoffproben, da hierbei die Kontaminationsgefahr hoch ist (Cuypers & Flanagan 2018; Funes & Bridge 2021; Wilkinson & Gwinnett 2020).

Die Probenentnahme zeichnet sich insofern als vorteilhaft aus, als sie nicht invasiv erfolgt. Für die Analyse werden in der Regel 30–50 mg Haare pro Analysegang benötigt. Die Proben werden bevorzugt vom Hinterkopf entnommen, aufgrund der bestmöglichen Standardisierung

und da in diesem Bereich das Haarwachstum regelmäßig stattfindet (Haare in der Ruhephase bis max. 20 %). In Ausnahmefällen können auch andere (Körper-)Haare (Achsel-, Bart-, Scham - und Brusthaare) verwendet werden (Haare in der Ruhephase 40–60 %). Die Entnahme muss entsprechend dokumentiert und bei der Interpretation berücksichtigt werden (Andresen-Streichert 2018; Uhl 2000). Die Wachstumsrate des Haares beträgt durchschnittlich ca. 0,8–1,5 cm pro Monat. Für die Praxis wird regelhaft angenommen, dass 1 cm Haar einem Beobachtungszeitraum von etwa einem Monat (Uhl 2000) entspricht. In der Regel wird ein 6 cm langer Haarabschnitt untersucht, der unter diesen Voraussetzungen einen Beobachtungszeitraum von sechs Monaten abbildet (Andresen-Streichert 2018; Uhl 2000).

Die Abgabe einer Haarprobe erfolgt in der Regel freiwillig. Ohne die Einwilligung der betroffenen Person kann eine Haarprobe gegen deren Willen nur unter strafrechtlich relevanten Bedingungen erfolgen. Eine solche kann lediglich unter richterlicher Anordnung stattfinden. Es ist nicht gestattet, gegen den Willen der betroffenen Person eine Haarprobe zur Analyse zu entnehmen, wenn kein strafrechtlicher Tatbestand und keine richterliche Anordnung vorliegen. Heimlich und gegen den Willen der betroffenen Probandin oder des betroffenen Probanden entnommene und analysierte Haarproben widersprechen dem Grundgesetz, in welchem der Schutz der Persönlichkeitsrechte aller Bürgerinnen und Bürger geregelt ist (Bundesamt für Justiz online, o. J.).

Die Substanzen, die ins Haar eingeschlossen werden, müssen hierfür bestimmte Voraussetzungen erfüllen, damit überhaupt eine Inkorporation im Haar möglich ist. Dabei sind auch die biochemischen Mechanismen, wie die Substanzen im Körper eliminiert werden, von entscheidender Bedeutung. So besitzt eine Vielzahl an Stoffen, die berauschend wirken, eine kurze Halbwertszeit im Körper. Diese Stoffe werden zügig im Körper zu ihren Metaboliten abgebaut, was deren Nachweis deutlich erschwert oder sogar komplett verunmöglicht (Cuypers & Flanagan 2018; Funes & Bridge 2021).

Infolgedessen konzentrieren forensische Analysen sich nicht nur auf den Nachweis der Substanz selbst, sondern auch auf deren Metaboliten (Wilkinson & Gwinnett 2020). Allerdings sind aufgrund der chemischen Eigenschaften und der Halbwertszeit im Körper nicht alle Substanzen im Haar nachweisbar (Cuypers & Flanagan 2018; Funes & Bridge 2021; Wilkinson & Gwinnett 2020).

Mithilfe der forensischen Haaranalyse können bei lebenden Menschen Aussagen zu folgenden Sachverhalten gemacht werden (Cuypers & Flanagan 2018; Funes & Bridge 2021; Wilkinson & Gwinnett 2020; Madea & Musshoff 2004):

- Chronischer Substanzabusus
- Konsumverhalten hinsichtlich illegaler Stoffe oder Arzneimittelabusus
- Nachweis oder Ausschluss des Eigenkonsums bestimmter Substanzen

- Veränderungen im Konsumverhalten
- Deliktische Einzelapplikation

Die forensische Haaranalyse kann sowohl im Rahmen des Verwaltungsrechts, des Strafrechts oder des Versicherungsrechts als auch im Kinder- und Jugendschutzrecht zum Einsatz kommen (Kintz 2017; Madea & Musshoff 2004).

Einen besonderen Stellenwert in der forensischen Haaranalyse besitzen hierbei die Opiate (Funes & Bridge 2021; Pozebon et al. 2017). Hierzu zählen nicht nur die eigentlichen Opiate wie Schmerzmittel oder Heroin, sondern auch Substitutionsprodukte wie Methadon oder Codein, die beispielsweise die im Rahmen einer ärztlichen Therapie eingenommen werden. Sowohl ein Substanzabusus als auch eine ärztlich verordnete Schmerz- oder Substitutionstherapie können bei Opiaten eine entscheidende Rolle spielen. „Opiate“ stellt daher einen Sammelbegriff für die unterschiedlichen morphinähnlichen Alkaloide dar, die sowohl illegal eingenommene Substanzen als auch legale Arzneistoffe sein können. Alle oben erwähnten Stoffe haben gemeinsam, dass sie eine morphinähnliche pharmakologische Wirkung im Körper entfalten (Rygaard et al. 2021; Madea & Musshoff 2004).

Wenn es um illegalen Substanzabusus geht, so ist in den USA der Missbrauch von Fentanyl am häufigsten (Kilmer et al. 2022). In Deutschland werden hingegen am häufigsten Cannabis und Amfetamine konsumiert (Beauftragter der Bundesregierung für Sucht- und Drogenfragen 2023). Heroin ist Diacetylmorphin. Hierbei handelt es sich um einen halbsynthetischen Stoff, der aus dem Rohopium des Schlafmohnes durch Acetylierung hergestellt wird. Das illegal gehandelte Heroin kann unterschiedliche Reinheitsgrade aufweisen, weshalb auch im Rahmen einer forensischen Haaranalyse unter Umständen gleichzeitig auch Codein oder Papaverin nachgewiesen werden können (Rygaard et al. 2021; Funes & Bridge 2021; Wilkinson & Gwinnett 2020).

Das Heroin wird in den meisten Fällen intravenös konsumiert, jedoch kann das Pulver auch auf einer Folie erhitzt und der Dampf inhaliert werden. Das Heroin versetzt die Konsumentinnen und Konsumenten in einen schmerzfreien, entspannten und euphorischen Rauschzustand und macht sehr schnell abhängig, denn bei wiederholtem Konsum nimmt die Sensitivität der körpereigenen Opioid-Rezeptoren ab. Bei Überdosierung treten Sedierung, Miosis und Atemdepression ein (Quinn et al. 1997). Heroin wird nach Konsum durch Hydrolyse zu 6-Monoacetylmorphin (MAM) abgebaut, dieses wird dann zu Morphin verstoffwechselt. Die Halbwertszeit von Heroin im Körper beträgt zwei bis neun Minuten, diejenige des 6-Monoacetylmorphins beläuft sich auf 5,3–38 Minuten (Madea & Musshoff 2004).

Für die Wirkung des Heroins scheint vor allem das dopaminerge System im *Nucleus accumbens* mit den dazugehörigen Opioid-Rezeptoren verantwortlich zu sein (Kreek et al. 2012). Das Abbauprodukt von Heroin, das Morphin, kann im Labor in Körperflüssigkeiten

nachgewiesen werden, unter anderem in Speichel, Urin und Blut. Im Urin können sowohl Morphin als auch Codein noch mehrere Stunden bis Tage nach dem Konsum nachgewiesen werden (Madea & Musshoff 2004). Im Rahmen einer Haaranalyse hingegen wird vor allem entweder das Heroin selbst oder seine Abbauprodukte 6-Monoacetylmorphin und Morphin festgestellt (Madea & Musshoff 2004).

Von entscheidender Relevanz im Zusammenhang mit dem Opioid-Konsum oder einer Opioid-Therapie ist das Methadon. Dieses wird Heroinabhängigen im Rahmen einer Substitutionstherapie ärztlich verordnet. Methadon wird oral eingenommen und lindert die Entzugssymptomatik im Rahmen eines Heroinentzuges. Methadon wird im Körper zu Ethylidindimethyldiphenylpyrrolin (EDDP) abgebaut, das neben Methadon in einer forensischen Haaranalyse nachgewiesen werden kann (Madea & Musshoff 2004).

Ein weiteres und relevantes Produkt, dessen Konsum mittels forensischer Haaranalyse nachgewiesen werden kann, ist das Cocain. Hierbei handelt es sich um das Hauptalkaloid des Cocastrauches. Cocain wird meist durch die Nase inhaliert oder geraucht, kann aber auch intravenös injiziert werden. Das Rauschgefühl hängt dabei auch davon ab, wie das Cocain appliziert wurde. Cocain wird vor allem in der Leber durch Hydrolasen abgebaut und verstoffwechselt. Dabei entstehen die Abbauprodukte Benzoyllecgonin mit einer Halbwertszeit von 4,5–7 Stunden und Ecgoninmethylester mit einer Halbwertszeit von drei bis fünf Stunden. Des Weiteren entstehen die Stoffwechselprodukte Ecgonin und Norcocain (Madea & Musshoff 2004).

Derivate des Cocains werden heutzutage als Lokalanästhetika verwendet (Novocain, Lidocain, Xylocain, Ultracain beispielsweise). Cocain wird jedoch auch missbräuchlich konsumiert. Es ist als Arzneimittel nur als Augentropfen zugelassen. Bei dem Stoff handelt es sich um einen Dopamin-, Serotonin- und Noradrenalin-Wiederaufnahmehemmer, daher wirkt Cocain stimmungsaufhellend, antriebs- sowie leistungssteigernd. Cocain scheint vor allem psychisch abhängig zu machen. Die Entstehung einer körperlichen Abhängigkeit von Cocain ist nicht im Detail geklärt und umstritten (Rygaard et al. 2021; Funes & Bridge 2021; Wilkinson & Gwinnett 2020).

Im Rahmen forensisch-toxikologischer Untersuchungen kann Cocain in Blut- und Urinproben oder auch mittels Haaranalyse nachgewiesen werden. In den Körperflüssigkeiten kann Cocain bis circa 12–24 Stunden nach Konsum nachgewiesen werden. Der Nachweis mittels forensischer Haaranalyse kann sogar noch Monate nach dem Konsum gelingen (Madea & Musshoff 2004). Im Blut und Urin finden sich vor allem die Abbauprodukte, während im Haar überwiegend das Cocain selbst eingelagert wird (Madea & Musshoff 2004). Neben Heroin und Cocain kann eine Vielzahl weiterer Substanzen und Arzneistoffe mittels Haaranalyse nachgewiesen werden. So können inzwischen Psychopharmaka wie Antidepressiva der

Klasse der Noradrenalin-Serotonin-Wiederaufnahmehemmer ebenfalls im Rahmen von Haaranalysen gefunden werden. Dies kann beispielsweise zum Nachweis der Medikamenteneinnahme erfolgen. Auch Benzodiazepin-Tranquilizer, Cannabinoide und Amfetamine lassen sich per Haaranalyse nachweisen (Madea & Musshoff 2004).

## **2.2.2. Methoden der Haaranalyse**

Das Haar stellt eine komplexe Matrix dar (Koch et al. 2020), wie sie in Kapitel 2.1 bereits beschrieben wurde. Dies ist bei der forensischen Haaranalyse ein entscheidender Punkt und stellt für Forensikerinnen und Forensiker eine Herausforderung dar. Da Haare sich an der Oberfläche des Körpers befinden, sind sie täglich zahlreichen Umwelteinflüssen ausgesetzt, was es ebenfalls zu berücksichtigen gilt. Hierbei stellt sich eine weitere Herausforderung, nämlich die Kontaminationen aus der Umwelt, die in einer forensischen Haaranalyse von entscheidender Relevanz ist und stets in Betracht gezogen werden muss, um falsch positive Ergebnisse auszuschließen (Wilkinson & Gwinnett 2020; Ferreira et al. 2019; Madea & Musshoff 2004):

Einen besonders hohen Stellenwert besitzt in der forensischen Haaranalyse daher die Dekontamination der Haarproben (Madea & Musshoff 2004). Hierfür gibt es unterschiedliche Methoden. Cuypers und Flanagan (2018) führten hierzu eine systematische Literaturliteraturarbeit durch. Vor dem Hintergrund der Problematik der Kontaminationen aus der Umwelt und der damit verbundenen Herausforderung der Interpretation der Ergebnisse, stellten Cuypers und Flanagan (2018) die Forschungsfrage auf, welche Methodik am besten geeignet sein könnte, um falsch positive Ergebnisse auszuschließen und so schwerwiegende Rechtsirrtümer zu vermeiden.

Cuypers und Flanagan (2018) führten hierzu eine systematische Literatursuche in der Datenbank PubMed durch und suchten zwischen 2010 und 2016 nach Studien, die sich mit der forensischen Haaranalyse und der Kontamination von Haaren befassten. Insgesamt konnten 71 relevante Studien gefunden werden. Cuypers und Flanagan (2018) fanden heraus, dass ein positiver Testbefund auf Drogen, deren Metaboliten und Abbauprodukte nicht nur vom Konsum oder von einer therapeutischen Anwendung her stammen kann, sondern auch aus der Umwelt, beispielsweise wenn ein Familienmitglied, eine Freundin oder ein Freund bzw. eine Bekannte oder ein Bekannter im gleichen Raum eine bestimmte Substanz (wie z. B. THC oder Crack) raucht. Die Substanzen können sich aus der Umwelt an den Haaren ablagern. Auch kann eine Übertragung durch Anfassen bestimmter Gegenstände, auf denen sich Reste von Substanzen finden können, erfolgen. Ein wichtiger Faktor sind weiterhin kosmetische Behandlungen des Haares wie Blondieren, Färben oder Glätten. Diese kosmetischen Behandlungen können wiederum zu falsch negativen Ergebnissen führen, da

sie die Substanzkonzentration im Haar erheblich reduzieren. Auch die Wachstumsrate des Haares spielt eine wichtige Rolle (Cuypers & Flanagan 2018).

Cuypers und Flanagan (2018) gelangen zu dem Ergebnis, dass die Gas- oder Flüssigkeitschromatografie in Kombination mit der Massenspektrometrie genaue Ergebnisse liefert, wenn es darum geht, eine bestimmte Substanz im Haar nachzuweisen. Die Literaturanalyse von Cuypers und Flanagan (2018) ergab, dass die Gas- oder Flüssigkeitschromatografie mit Massenspektrometrie Substanzen im Haar zuverlässig und mit einer hohen Sensitivität nachweisen kann. Trotzdem stellen sich bis heute noch Herausforderungen und Probleme.

Diese betreffen vor allem die Vorbereitung der Haarproben sowie die Qualitätskontrolle. Eine Möglichkeit hierzu wäre es, unbelastetes Haar als mögliche Negativkontrolle zu nutzen. Um das zu analysierende Haar von Kontaminationen zu befreien, existiert bereits eine Vielzahl an Lösungsmitteln und Protokollen. Allerdings besteht hierbei das Risiko, dass auch die nachzuweisende Substanz aus dem Haar herausgelöst oder in die Medulla des Haares transportiert wird. Cuypers und Flanagan (2018) konnten keine standardisierte Prozedur zur Dekontamination ausmachen. In den unterschiedlichen Studien wurden verschiedene Methoden angewendet, was einen Vergleich der Studien deutlich erschwert. Da noch keine standardisierte Methode existiert, bleiben die Herausforderung der Interpretation der Ergebnisse sowie die Problematik, wie mögliche Kontaminationen aus der Umwelt zuverlässig ausgeschlossen werden können, weiterhin bestehen (Cuypers & Flanagan 2018).

Einen besonders hohen Stellenwert bei der Haaranalytik nimmt daher der Prozess der Dekontamination ein. Diese wird von unterschiedlichen Forschungs- und Arbeitsgruppen auf verschiedene Arten und Weisen praktiziert. Die Gemeinsamkeit besteht allerdings bei allen Forschungsgruppen darin, dass eine bis mehrere Waschzyklen erfolgen, um die Verunreinigungen, die sich auf der Oberfläche der Haare befinden, zu entfernen. Die Polarität der Lösungsmittel kann hierbei variieren. Ziel der Waschungen ist es, die Kontaminationen möglichst zu entfernen, während die inkorporierten Substanzen dabei erhalten bleiben (Cuypers & Flanagan 2018). Allerdings zeigte sich, dass die unterschiedlichen Waschprozeduren nicht sämtliche Kontaminationen restlos entfernen können. Hierbei handelt es sich um einen sensiblen Balanceakt: Entfernen aller Verunreinigungen versus Erhaltung der inkorporierten Substanzen. Dies stellt bis heute eine bedeutende Herausforderung dar. Der Einfluss der Waschprozeduren auf die Kutikula des Haares kann unterschiedlich ausfallen, je nachdem, welche Methode zur Anwendung kommt. Entsprechend können auch die Testergebnisse variieren (Ferreira et al. 2019; Davies et al. 2020).

In der forensischen Haaranalytik wird zudem die Massenspektrometrie angewendet. Das Analyseprinzip der Massenspektrometrie basiert auf der Ionisierung von unterschiedlichen

Molekülen, wobei verschiedene Ionenquellen zur Anwendung kommen. Im Massenspektrometer werden Ionen erzeugt, die in einem elektrischen Feld beschleunigt werden. Die elektrische Ladung wird durch einen Elektronenvervielfacher zu einem detektierbaren Strom verstärkt. Die Auftrennung erfolgt nach dem Verhältnis Masse zu Ladung. Des Weiteren besteht auch die Möglichkeit, statt Gas- eine Flüssigchromatografie vor der Massenspektrometrie zu verwenden (Ferreira et al. 2019; Davies et al. 2020).

Ein positives Ergebnis einer Haaranalyse weist grundsätzlich darauf hin, dass eine Person entweder Drogen konsumierte oder sich in der Nähe von drogenkonsumierenden Personen befand. Im Umkehrschluss muss ein negatives Ergebnis den Nachweis von Konsum nicht unbedingt ausschließen, bspw. dann, wenn die Haare zur Untersuchungszeit behandelt wurden (Aufhellung, Dauerwelle etc.) oder ein Konsum nur einmalig (selten) stattfand (Andresen-Streichert 2018; Uhl 2000). Bei Haaranalysen zum Nachweis oder Ausschluss eines Cannabiskonsums spielen der Hauptwirkstoff D-9-Tetrahydrocannabinol (THC), Cannabidiol (CBD), Cannabinol (CBN), sowie THC-OH und THC-CS eine wichtige Rolle.

Das Institut für Rechtsmedizin der Uniklinik Köln entwickelte eine neue automatisierte Analysenmethode zum Nachweis sowohl von THC-CS und THC-OH als auch von THC, CBN und CBD im Haar. Die Analyse der fünf Analyten kann anhand der GS-MS/MS in einer Kombination mit Elektronenionisierung in einem Arbeitsgang erfolgen (Kieliba et al., 2018). Ab dem Jahr 2016 wurde diese Methode erfolgreich für die Haaranalysen zum Nachweis von Cannabiskonsum im Institut der Rechtsmedizin an Uniklinik Köln verwendet. Mit nur einer GC-MS gehen zwei entscheidende Limitationen einher: 1) Nur ein begrenztes Spektrum an kleinen, volatilen Komponenten kann damit analysiert werden und 2) die GC-MS verfügt über eine Schwäche bei der Detektion von molekularen Ionen. Nicht vorhandene oder nur schwache molekulare Ionen resultieren in einer begrenzten Sensitivität für die Identifikation bestimmter Stoffe. Substanzen, die nicht in der bereits vorhandenen Datenbank gespeichert sind, können nur in einem geringfügigen Maß oder gar nicht erkannt und identifiziert werden (Amirav et al. 2008).

Die GC-MS mit Supersonic Molecular Beams (Überschallmolekularstrahlen) wird auch Supersonic GC-MS genannt. Sie basiert auf sowohl GC und MS als auch auf molekularen Strahlen, die mit Überschallgeschwindigkeit emittiert werden. Die Substanzen werden dabei durch die Ionenquelle katapultiert. Die Ionenquelle ist hierbei inert. Durch die zusätzliche Ionenquelle können auch bislang unbekannte Substanzen identifiziert werden, zudem kann die Sensitivität für bekannte Stoffe erhöht werden (Amirav et al. 2008).

### 2.2.3. Validität

Seit dem Jahr 1979 gibt es das Verfahren, Haare auf regelmäßigen Drogenkonsum zu untersuchen. Dabei werden die Haare auf Spuren der entsprechenden Betäubungsmittel oder deren Abbauprodukte analysiert (Baumgartner et al. 1979).

Baumgartner et al. (1979) beschrieben die Untersuchung von Haarproben auf Heroin und andere Opiate. Die Autorinnen und Autoren der Studie untersuchten dabei Haare auf Heroin und Morphin sowie deren Derivate mittels Radioimmuno-Assay. Am häufigsten ist die forensische Haaranalyse in den USA zu finden, wo Mitarbeitende auf Drogenkonsum getestet werden. In Deutschland werden täglich bis zu 15.000 Haaranalysen durchgeführt, allerdings nicht im Rahmen eines Drogentests am Arbeitsplatz, sondern vor allem im Zusammenhang mit der Fahrerlaubnis. Dabei geht es hauptsächlich darum, im Rahmen einer medizinisch-psychologischen Untersuchung (MPU) herauszufinden, ob die betroffene Person während der vergangenen Wochen und Monate oder auch einmalig Drogen konsumierte, welche deren Fahrtüchtigkeit beeinträchtigen können. Auch im Rahmen von Bewährungsauflagen bei Drogendelikten kommen forensische Haaranalysen zum Einsatz. Dabei geht es darum, nachzuweisen, ob sich der betroffene Mensch an die Bewährungsauflagen hielt und somit abstinent blieb.

Drogenkonsum durch eine forensische Haaranalyse nachzuweisen, zählt heutzutage zu den sichersten und zuverlässigsten Kontrollverfahren im Fachbereich der Forensik (Bolcato et al. 2021). Wenn Menschen Medikamente oder illegale Substanzen konsumieren, lässt sich inzwischen eine Vielzahl an Stoffen im Haar nachweisen (Bolcato et al. 2021). Die Rückstände der Substanzen können bis zu mehreren Monaten nach dem Konsum im Haar nachgewiesen werden (Ferreira et al. 2019; Davies et al. 2020).

Am Anfang der Analyse kann ein unspezifischer Nachweis mittels eines immunologischen Assays erfolgen. In die forensische Haaranalyse können mehrere Methoden involviert sein, je nachdem, welche Substanzen es nachzuweisen gilt. Wird ein immunologisches Assay vor dem eigentlichen spezifischen Test gemacht, so liefert dieses Hinweise darauf, dass unter Umständen illegale Substanzen oder bestimmte Medikamente konsumiert wurden. Fällt das Assay positiv aus, so folgen weitere spezifische Analysen mit Gaschromatografie und Massenspektrometrie (Madea & Musshoff 2004). Mittels dieses Verfahrens kann die eingenommene Substanz exakt detektiert werden. Infolgedessen liefert die forensische Haaranalyse Gewissheit darüber, ob bestimmte Medikamente oder illegale Drogen konsumiert wurden und vor allem, welche Stoffe die betroffene Person zu sich nahm (Madea & Musshoff 2004; Bolcato et al. 2021).

Ebenso kann die forensische Haaranalyse auch Aussagen darüber treffen, wie häufig die Substanzen eingenommen wurden (Haedener et al. 2021; Salomone et al. 2019; Madea & Musshoff 2004; Bolcato et al. 2021; Wilkinson & Gwinnett 2020).

### **2.3. Ausgangslage und Problembeschreibung**

In der Abteilung für forensische Toxikologie des Instituts für Rechtsmedizin der Uniklinik Köln werden regelmäßig Haare, Urin und Blut auf Medikamente, Betäubungsmittel und Alkohol untersucht. Die Ergebnisse dienen sowohl verkehrsrechtlichen (Fahreignung) als auch strafrechtlichen Fragestellungen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden bereits durchgeführte Haaranalysen ausgewertet, was eine retrospektive Einschätzung über eine mögliche Korrelation zwischen Konsummuster und nachgewiesenen Konzentrationen ermöglichen soll.

Hierzu werden bereits erhobene Daten von Probandinnen und Probanden, von denen in den letzten zehn Jahren – im Zeitraum vom 01.10.2010 bis zum 30.09.2020 – im Institut für Rechtsmedizin der Uniklinik Köln Haare asserviert wurden (720 Probandinnen und Probanden), ausgewertet. Dazu wurden die Daten der Personen, deren Kopfhaare analysiert wurden, ausgewertet. Für die Auswertung wurden Körperhaare ausgenommen, da diese eine andere Wachstumsgeschwindigkeit haben und ein anderes Wachstumsphasenverhältnis aufweisen als Kopfhaare und somit unter den Bedingungen dieser Studie mit den Kopfhaaren nicht vergleichbar sind. Für die Auswertung von Haaranalysen wurden die Daten aus rechtlichen und ethischen Gründen anonymisiert. Die Anonymisierung wurde folgendermaßen sichergestellt:

Jeder Probandin und jedem Probanden wurde eine intern festgelegte sieben- oder achtstellige Nummer (als Beispiel A1234567) zugeordnet. Die ersten zwei Ziffern entsprachen der Jahreszahl und die weiteren fünf Ziffern stellten eine fortlaufende Nummerierung dar. Diese wurden im Rahmen der Auswertung vollständig gelöscht. Jeder Probandin und jedem Probanden wurde eine Ziffer von 1 bis 720 zugeteilt, sodass ein unmittelbarer Rückschluss auf Personen nicht möglich war. Im Rahmen der Routineanalysen wurden die entnommenen Haarproben, im Auftrag von Probandinnen oder Probanden, Bezirksregierung, Jugendämtern und Staatsanwaltschaften, auf das Vorhandensein von Betäubungsmitteln oder Drogen wie Cannabis, Cocain, Amfetamine (Crystal Meth, Ecstasy, Speed) und Opiode (Heroin, Morphin, Codein, Methadon) sowohl bei lebenden als auch bei verstorbenen Menschen untersucht.

## **2.4. Fragestellungen und Ziele der Arbeit**

Die folgenden wissenschaftlichen Fragen sollen im Rahmen des geplanten Projektes beantwortet werden:

- Lässt sich anhand von bestimmten Konzentrationen eine Aussage zum Konsummuster treffen?
- Inwieweit sind Faktoren wie Haarfarbe etc. limitierend bzw. zu berücksichtigen?
- Kann basierend auf diesen Erkenntnissen eine statistische Einschätzung von Konzentrationen der einzelnen Wirkstoffgruppen im Hinblick auf die Einordnung zukünftiger Routinefälle getroffen werden?

### **Ziele**

Die Ziele dieses Forschungsprojektes sind folgende:

- Statistische Auswertungen hinsichtlich einer möglichen Korrelation zwischen vermutlichem Konsummuster und tatsächlich bestimmten Wirkstoffkonzentrationen in den Haaren
- Abschätzung, ob Faktoren wie die Haarfarbe derartige Auswirkungen limitieren oder wie diese sinnvoll in einer statistischen Abschätzung eingebunden werden könnten

### **Arbeitshypothese**

Folgende Faktoren können die Aufnahme und Einlagerung von Fremdsubstanzen in Haaren beeinflussen:

- Melaninaffinität,
- Lipophilie und
- Basizität der jeweiligen Substanz

Die geringere Durchlässigkeit von Biomembranen für polare Stoffe ist ein wichtiger Grund dafür, dass die lipophileren Muttersubstanzen oft in höheren Konzentrationen gefunden werden als ihre hydrophileren Metaboliten (Madea & Musshof, 2004). Frühere Studien konnten einen Zusammenhang zwischen der Haarfarbe und der Bindung von Fremdsubstanzen im Haar feststellen (Henderson et al. 1998; Henderson 1993; Gygi et al. 1996). Allerdings sind diese Zusammenhänge zwischen Haarfarbe und Grad der Inkorporation von Fremdsubstanzen bis heute nicht im Detail erforscht. Die vorliegende Arbeit soll neue Erkenntnisse hierzu beitragen.

### 3. Material und Methoden

Die Aufarbeitung und Analysen der Haarproben erfolgten im Rahmen der validierten und akkreditierten Standardanalyseverfahren des Instituts für Rechtsmedizin der Uniklinik Köln, die im Folgenden zur besseren Nachvollziehbarkeit beschrieben werden.

#### 3.1. Material

##### 3.1.1. Amfetamine

Nachfolgend werden die benötigten Urlösungen beschrieben:

###### Natronlauge 1 Molar

40 g Natriumhydroxid (Karl Roth GmbH, Karlsruhe) wurden in 1 Liter destilliertem Wasser gelöst.

###### Gesättigte Natriumhydrogencarbonat Lösung

Zu 100 ml destilliertem Wasser wurde so lange Natriumhydrogencarbonat (VWR International, Darmstadt) zugegeben, bis ein ungelöster Bodensatz verblieb.

###### HCl in Methanol, 0,1 M

2,5 ml 1 mol/liter HCl in Methanol (Firma Bernd Kraft, Maxdorf) wurde mit Methanol (Karl Roth GmbH, Karlsruhe) auf 25 ml aufgefüllt.

###### Isohexan (VWR International, Darmstadt)

Die Beschriftungen der Gefäße enthielten das Namenskürzel der jeweiligen Arbeitslösung, das Datum des Ansetzens, das Verfallsdatum, das Lösungsmittel sowie den Namen der jeweiligen Labormitarbeiterinnen oder des Mitarbeiters, welche bzw. welcher die Lösung angesetzt hatte. Bei jedem neuen Ansatz einer Arbeitslösung wurde das Formular zur Chargenverwaltung ausgefüllt.

Zur Herstellung von Kalibrationslösungen wurden Verdünnungen aus den obigen Urlösungen hergestellt. Die Verdünnungen erfolgten ausschließlich in Methanol. Die entsprechende Verdünnungstabelle ist in der nachfolgenden Tabelle 1 zu finden.

Unterschiedliche Amfetamine und deren Derivate konnten nachgewiesen werden:

- Amf (Amfetamin)
- Metamf (Metamfetamin)
- MDMA (Methylen-Dioxy-Metamfetamin)
- MDEA (Methylen-Dioxy-Ethylenamfetamin)
- MDA (Methylen-Dioxy-Amfetamin)

Für jede Messreihe wurde eine Kalibration erstellt. Die Herstellung der Arbeitslösungen für die Kalibration erfolgte durch entsprechende Verdünnungen der Urlösungen. Nachfolgend wird die Verdünnungstabelle Kalibrationslösungen für Amfetamine in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Verdünnungslösungen zur Kalibration zum Nachweis von Amfetaminen

Quelle: Institut für Rechtsmedizin Universitätsklinik Köln 2019

Substanz	Konzentration der Urlösung	Menge Urlösung	Verdünnung mit Methanol	Konzentration der Arbeitslösung
Amfetamin D5	1 mg/ml	25 µl	10 ml	2,5 ng/µl
Met-Amfetamin D11	1 mg/ml	25 µl	10 ml	2,5 ng/µl
MDMA D5	1 mg/ml	25 µl	10 ml	2,5 ng/µl
MDA D5	1 mg/ml	25 µl	10 ml	2,5 ng/µl
MDEA D5	1 mg/ml	25 µl	10 ml	2,5 ng/µl

### 3.1.2. Cannabinoide

Die für den Nachweis von Cannabis und Cannabinoiden benötigten Urlösungen werden nachfolgend beschrieben:

#### 1 M Natriumhydroxidlösung

20 g Natriumhydroxid (Karl Roth GmbH, Karlsruhe) wurde in 500 ml bidestilliertem Wasser aufgelöst.

#### Isohexan/Ethylacetat (9:1)

90 ml Isohexan (VWR International, Darmstadt), 10 ml Ethylacetat (VWR International, Darmstadt).

#### Kontrolllösung K 0,015 (LGC Prochem GmbH, Wesel)

Für die dotierte Haarkontrolle K 0,015 (0,015 ng/ml je Analyt) wurde eine separate Kontroll-Kombinations-Stammlösung verwendet. Die Lösungsmittelkonzentration betrug 10 µg/ml je Analyt. Aus der Kontrollstammlösung wurde die Kontrolllösung hergestellt, indem 30 µl der Kontrollstammlösung in einen 20 ml Messkolben gegeben und dieser bis zur Marke mit Methanol (Karl Roth GmbH, Karlsruhe) aufgefüllt wurde.

Um die Kalibrationskurve zu erstellen, wurden aus den oben beschriebenen Urlösungen Standardarbeitslösungen durch Verdünnung hergestellt. Die Kalibrationslösungen enthielten zudem die zu bestimmenden Substanzen in bereits definierten Konzentrationen. Hierbei bestand die Möglichkeit, die folgenden Substanzen nachzuweisen:

- Tetrahydrocannabinol (THC)
- Cannabinol (CBN)

- Cannabidiol (CBD)

Die Verdünnungen erfolgten wie in der nachfolgenden Tabelle 2 gezeigt.

Tabelle 2: Verdünnungstabelle für die Kalibration zum Nachweis von Cannabinoiden

Quelle: Institut für Rechtsmedizin Universitätsklinik Köln, 2016

Substanz	Konzentration Urlösung mg/ml	in µl Urlösung	Mit Methanol aufgefüllt	Soll- Konzentration Stammlösung in ng/µl
THC	1	50	5 ml	10
CBN	1	50		
CBD	1	50		

### 3.1.3. Cocain und Opiate

Folgende Lösungen wurden für die Haaranalyse auf Opiate verwendet:

#### Phosphatpuffer, pH: 6,0

6,81 g Natriumphosphat (VWR International, Darmstadt) wurden in 500 ml bidestilliertem Wasser gelöst.

Der pH wurde mithilfe von 1 M Natronlauge (VWR International, Darmstadt) auf 6,0 eingestellt.

#### Essigsäure 0,1 Mol/Liter

1,5 ml konzentrierte Essigsäure (VWR International, Darmstadt) wurde mit 250 ml destilliertem Wasser verdünnt.

#### Elutionsmittel

240 ml  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  (VWR International, Darmstadt) wurden mit 60 ml 2-Propanol (VWR International, Darmstadt) und 6 ml konzentriertem  $\text{NH}_3$  gemischt (VWR International, Darmstadt). Das Elutionsmittel wurde bei jedem Lauf neu angesetzt.

#### Derivatisierungslösung

25 % BSTFA in Ethylacetat

Von der Kontrolllösung EEN (EME, EDDP, Norcocain) wurden 25 µl zu 25 mg Cocain-Poolhaarkontrolle zugesetzt. Die Aufarbeitung und Messung erfolgten identisch zu den Proben.

## **3.2. Methoden**

### **3.2.1. Aufbereitung der Haarproben**

Als Untersuchungsmaterial wurden menschliche Kopfhare verwendet. Die entnommenen Haarproben wurden der Länge nach vermessen, Länge sowie Haarfarbe wurden dokumentiert. Die Auswahl der Haarsegmente erfolgte in Zusammenarbeit mit der Bereichsleitung. Der zu untersuchende Haarstrang wurde in ein 50ml-Becherglas gegeben und mit 5 ml Dichlormethan (VWR International Darmstadt) gewaschen. Die Waschflüssigkeit wurde abgenommen und je ein beschriftetes Glasröhrchen gefüllt. Die Flüssigkeit wurde unter dem Abzug eingedampft und die Röhrchen wurden mit Parafilm verschlossen. Die gewaschenen Haare wurden bis zur Trocknung im Becherglas unter den Abzug gestellt. Anschließend wurden die getrockneten Haare in einen Mahlzylinder gefüllt, zwei Mahlkugeln zugegeben und fünf Minuten lang gemahlen, bis sie fast puderfein waren. Das so gewonnene Haarpuder wurde in beschriftete Glasröhrchen transferiert und gewogen. Die standardmäßig eingesetzte Probenmenge betrug 50 mg. Pro Mahlgang wurden die Haare von jeweils nur einer Probandin bzw. einem Probanden gemahlen und die Mahlkugeln sowie der Mahlzylinder anschließend mit Wasser und Aceton (VWR International Darmstadt) sorgfältig gewaschen und an der Luft getrocknet. Jeweils 25 mg Haarpulver wurden zur Weiterverarbeitung in beschriftete Schliffreagenzgläser gefüllt. Die Dokumentation der Aufbereitungen erfolgten auf den jeweiligen offiziellen Formblättern und in WinLIMS.

Anschließend wurden interne Standards zugefügt, ein Extrakt wurde hergestellt und im Anschluss derivatisiert (dadurch erhöht sich die thermische Stabilität des Extraktes und die Nachweisempfindlichkeit verbessert sich). Nach der Derivatisierung konnte der Extrakt auf das Vorhandensein von Analyten anhand von unterschiedlichen Analysemethoden untersucht werden (Institut für Rechtsmedizin, Probeaufbereitung Haare, 2018).

Die Methode der Wahl bei der Haaranalyse auf Fremdstoffe ist die Gaschromatografie in Verbindung mit der Massenspektrometrie. In speziellen Fällen, in denen eine höhere Sensitivität und Spezifität gefordert sind, werden auch die Gaschromatografie in Verbindung mit Tandem-Massenspektrometrie oder die Flüssigkeitschromatografie in Verbindung mit der Tandem-Massenspektrometrie verwendet (Sachs, 2000).

### **3.2.2. Der Nachweis von Amfetaminen**

Zunächst erfolgte die Zugabe eines internen Standards. Dafür wurde aus einer UrLösung eine verdünnte interne Standardarbeitslösung nach einem bestimmten Schema hergestellt. Die Verdünnung erfolgte für alle Analyten in Methanol. Daraufhin folgte eine Flüssig-Flüssig-Extraktion durch die Zugabe von Natronlauge und Isohexan. Im Anschluss wurde die Lösung

zentrifugiert. Anschließend wurden von der überstehenden Isohexan-Phase 4 ml abgenommen und in ein Reagenzglas überführt. Die wässrige Phase wurde verworfen. Schließlich folgte die Derivatisierung. Diese wurde mit MBHFBA durchgeführt. Nun wurde der Extrakt mittels GC-MS gezielt qualitativ und quantitativ auf alle Analyten untersucht. Die Nachweisgrenze nach internen Standards für die Amfetamine beträgt 0,1 ng/mg.

Die Haare wurden wie in Kapitel 3.2.1. beschrieben gemahlen und nach der Zugabe der entsprechenden deuterierten Standards mit verdünnter Salzsäure versetzt. Anschließend wurde das Haar mithilfe von Ultraschall aufgeschlossen. Danach wurde das Gemisch mit verdünnter Natronlauge alkalisiert und daraufhin erfolgte eine Flüssig-Flüssig-Extraktion mit Isohexan. Die Analyse der Substanzen im Haar fand mittels Gaschromatografie und Massenspektrometrie statt.

Für die Kalibration wurden 50 mg Leerhaar und 20 µl der internen Kalibrations- und Arbeitslösung (siehe Tabelle 1) verwendet. Zu jeder Probe wurde eine Matrixblank zur Prüfung der Analyt-Verschleppungen gemessen. Die Matrix Blank wurde ebenfalls aus 50 mg Leerhaar und 25 µl der Kalibrations- und Arbeitslösung hergestellt. Für jede Messreihe wurde eine neue Kalibration erstellt. Die Kalibrationslösungen wurden durch Verdünnen der Urlosungen hergestellt (Tabelle 1).

Direkt nach der Kalibration wurde die Kontrollprobe gemessen. Die Positivkontrolle bestand aus Medidrug® (Medichem, Steinenbronn), zur Negativkontrolle wurde eigenes Haar (Poolhaar) entnommen. Die Positivkontrolle Medichem wurde direkt nach der Kalibration gemessen. Die Messung der Negativkontrolle des Poolhaares erfolgte spätestens nach 20 Messungen von Realproben. Nach weiteren 20 Realproben erfolgten wiederum die Positivkontrolle mit Medichem sowie die Negativkontrolle mit Eigenhaar.

### Extraktion

Für die Messungen wurden 50 mg Haarproben eingewogen. 20 µl der internen Standardarbeitslösung und 1 ml einer 0,1 M Salzsäurelösung wurden zugegeben. Das Proberöhrchen wurde dann mit einem Eindrückstopfen verschlossen und drei Stunden lang im Ultraschallbad inkubiert. Anschließend wurde es zwei Minuten lang bei 2.500 rpm zentrifugiert. Der Überstand wurde entnommen und in ein 10ml-Schliffzentrifugenglas transferiert. Der Niederschlag wurde mit 1 ml destilliertem Wasser versetzt und kräftig geschüttelt sowie erneut zwei Minuten bei 2.500 rpm zentrifugiert. Der Überstand wurde abgenommen und mit dem bereits vorher abgenommenen Überstand vereint. Anschließend wurden 1 ml 1 M Natronlauge und 5 ml Isohexan zugegeben, das Röhrchen wurde verschlossen und 10 Minuten in einem Schüttler inkubiert. Danach wurde fünf Minuten bei 3.000 rpm zentrifugiert. Abschließend wurden 4 ml der überstehenden Isohexan-Phase abgenommen und in ein Reagenzglas überführt. Die wässrige Phase wurde dabei verworfen.

### Derivatisierung

Die Derivatisierung erfolgte durch Eindampfen der Isohexan-Phase. Zuerst wurden 50 µl 0,1 M methanolische HCl dazu gegeben, anschließend wurde bei Raumtemperatur unter Stickstoff vorsichtig eingedampft. Nach der Trocknung wurden sofort 70 µl MBHFBA (Machinery Nagel GmbH, Düren) zugesetzt. Die unverschlossene Probe wurde 30 Minuten bei 120 °C erhitzt. Nach dem Abkühlen wurden 0,5 ml Isohexan zugegeben und 15 Sekunden am Vortex gemischt. Danach wurden 100 µl gesättigte Natriumhydrogencarbonat-Lösung zugesetzt und eine Minute am Vortex gemischt. Anschließend wurde drei Minuten bei 2.500 rpm zentrifugiert. 100 µl der oberen Isohexanphase wurden entnommen und in Probegläschen für die Massenspektrometrie umgefüllt.

### Gaschromatografie und Massenspektrometrie

Die Messung erfolgte am Gerät FT 100/2. Die obig beschriebenen gewonnenen Proben wurden mittels GC-MS auf die gesuchten Substanzen untersucht. Die Messung erfolgte mit der Xcalibur-Software. Die Auswertung der Messdaten erfolgte mit der Software Trace Finder 4.1.

### **3.2.3. Der Nachweis von Cannabinoiden**

Nach Zugabe von internen Standards wurden die Substanzen mit Iso-Hexan-Ethylacetat-Gemisch mittels Flüssig-Flüssig-Extraktion aus dem Probenmaterial extrahiert. Die Derivatisierung erfolgte wie bei Cocain und Opiaten auch mit BSTFA. Anschließend erfolgte die Analyse gaschromatographisch-tandemmassenspektrometrisch (GS/MS-MS). Folgende Nachweisgrenzen wurden festgelegt:

- THC, CBN, CBD – 0,005 ng/mg
- THC-CS, THC-OH – 0,2 pg/mg

Für den Nachweis von Cannabinoiden wurde 25 mg Haarprobe verwendet. Die Haare wurden, wie bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben, gemahlen und anschließend mit verdünnter Natronlauge 1 M versetzt. Durch Erhitzen auf 120 °C wurde das Haar aufgeschlossen. Die zu analysierenden Substanzen wurden danach mit dem Isohexan-Ethylacetat-Gemisch (siehe Kapitel 3.1.2.) aus den Proben extrahiert. Die Derivatisierung erfolgte mit BSTFA.

Für die Kalibration wurden aus den Urlosungen jeweils interne Stammlösungen hergestellt. Diese enthielt die zu bestimmenden Substanzen in bereits vorgegebenen, fest definierten Konzentrationen. Für die Kontrolllösung K 0,015 wurde eine separate Kontrollstammlösung mit einer Konzentration von 10 µg/ml pro Analyt eingesetzt. Pro Serie wurde jeweils eine Nullprobe, eine dotierte Kontrollprobe und zwei DHF-Kontrollproben mitgeführt. Nach jeweils 30 Realproben wurde wieder jeweils eine DHF-Kontrollprobe gemessen.

### Extraktion

25 mg der gemahlene Haare wurden in ein Schliffreagenzglas eingewogen. Hierzu wurde 1 ml 1 M Natronlauge zugesetzt und das Proberöhrchen mit einem Schliffpfropfen verschlossen. Die Mischung wurde anschließend 10 Minuten lang im 120 °C Wasserbad gekocht. Nachdem sich das Gemisch abgekühlt hatte, wurden 5 ml der Isohexan-Ethylacetat hinzugegeben. Das Röhrchen wurde mit dem Stopfen wieder verschlossen und das Gemisch von Hand zwei Minuten lang kräftig geschüttelt. Anschließend wurde zwei Minuten lang bei 2.500 rpm zentrifugiert. Die überstehende Lösungsmittelphase wurde vorsichtig abgenommen und mit einem mit Watte und Natriumsulfat beschichteten Glastrichter in ein Reagenzglas filtriert. Die verbliebene wässrige Phase wurde wiederum mit 0,5 ml Isohexan-Ethylacetat versetzt und am Vortex kräftig geschüttelt sowie erneut zwei Minuten lang bei 2.500 rpm zentrifugiert. Die überstehende Lösungsmittelphase wurde abgenommen und in das Reagenzglas mit der bereits vorhandenen Lösungsmittelphase filtriert. Die wässrige Phase wurde verworfen.

### Derivatisierung

Die organische Phase wurde bei 40 °C am VapoTherm abgedampft. Das trockene Extrakt wurde mit 25 µl BSTFA versetzt, aufgelöst und in einen Mikroinsert eines Probengläschens überführt.

### Gaschromatografie und Massenspektrometrie

Die Proben wurden gezielt auf Cannabinoide und ihre Derivate untersucht, wie bereits in Kapitel 3.2.2. beschrieben. Zur Auswertung wurde das Programm Mass Hunter benutzt.

#### **3.2.4. Der Nachweis von Cocain und Opiaten**

Ein Beleg von Cocainkonsum erfolgt über den Nachweis des Hauptmetaboliten Benzoyllecgonin (aber auch Cocaethylen und Norcocain). Nach Mahlen der Haare folgte die Zugabe von internen Standards, nämlich eine Verdünnung für alle Analyten in ACN (Acetonitril). Anschließend folgte eine Festphasenextraktion mit Zugabe von Phosphatpuffer, Essigsäure und Elutionsmittel. Die Derivatisierung wurde mit einer Lösung von BSTFA in Ethylacetat durchgeführt. Cocain, Methadon und EDDP lassen sich nicht derivatisieren und wurden im Derivatisierungsgemisch nur gelöst und underivatisiert vermessen. Anschließend folgte die Analyse gaschromatografisch-tandemmassenspektrometrisch.

Folgende Nachweisgrenzen wurden festgelegt:

- Cocain, Ecgoninmethylester (EM) – 0,05 ng/mg
- Norcocain, Benzoyllecgonin, Cocaethylen – 0,025 ng/mg
- 6- MAM, Morphin, Codein, DHC, Methadon – 0,025 ng/mg

- EDDP – 0,05 ng/mg

Pro Serie wurden zu Beginn sowohl eine Nullprobe als auch eine DHF-Kontrollprobe gemessen. Die Proben wurden mittels Gaschromatografie und Massenspektrometrie gezielt auf die Analyten untersucht. Die hierfür verwendete Software war Mass Hunter mit dem Programm GC/MS-Acquisition. Die Messung erfolgte mit dem Prüfmittel FT 100/6. Für die Auswertung wurde ebenfalls das Programm Mass Hunter verwendet.

### 3.3. Grenzwerte

#### 3.3.1. Amfetamine

Für die Amfetamine galten die Grenz- und Nachweiswerte, die in der nachfolgenden Tabelle 3 übersichtlich dargestellt werden.

Tabelle 3: Grenzwerte Amfetamine

Quelle: Institut für Rechtsmedizin, Grenzwerte Analyte GC-MS Amfetamine, 2012

Substanz	Nachweisgrenze [ng/mg]	Bestimmungsgrenze [ng/mg]	Kalibrationsgerade kleinster Wert [ng/mg]	Kalibrationsgerade höchster Wert [ng/mg]
Amfetamin	0,1	0,1	0,1	10,0
Metamfetamin	0,1	0,1	0,1	10,0
MDA	0,1	0,1	0,1	10,0
MDMA	0,1	0,1	0,1	10,0
MDEA	0,1	0,1	0,1	10,0

#### 3.3.2. Cannabinoide

Die folgenden Nachweisgrenzen, die in der unten stehenden Tabelle 4 dargestellt sind, wurden für Cannabinoide definiert.

Tabelle 4: Grenzwerte für Cannabinoide

Quelle: Institut für Rechtsmedizin, Grenzwerte Analyte GC-MSMS: Methadon, Cocain, Opiate, Cannabinoide, 2017

THC-Haare	Nachweisgrenze/Cut-off	Bestimmungsgrenze	Kalibrationsbereich
THC-COOH	0,2 pg/mg	0,5 pg/mg	0,5–20 pg/mg
THC-OH	0,2 pg/mg	0,5 pg/mg	0,5–20 pg/mg
THC	0,005 ng/mg	0,005 ng/mg	0,005–2 ng/mg
CBN	0,005 ng/mg	0,005 ng/mg	0,005–2 ng/mg
CBD	0,005 ng/mg	0,005 ng/mg	0,005–2 ng/mg

Der Kalibrationsbereich lag bei 0,01–2,5 ng/mg.

Gemäß Validierung nach AM-FT-206 wurden die folgenden Grenzwerte definiert (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Grenzwerte für Cannabinoide nach AM-FT-206

Quelle: Institut für Rechtsmedizin, Grenzwerte Analyte GC-MSMS: Methadon, Cocain, Opiate, Cannabinoide, 2017

THC-Haare	Nachweisgrenze [ng/mg]	Bestimmungsgrenze [ng/mg]	Mittelwert ca. Konz. im Leerhaarpool (n = 4) [ng/mg]
Cannabidiol (CBD)	0,005	0,01	0,0014
THC	0,005	0,01	0,0029
Cannabinol (CBN)	0,005	0,01	0,0030

### 3.3.3. Cocain und Opiate

Die Grenzwerte für Opiate und Cocain können der nachfolgenden Tabelle 6 entnommen werden. Der Kalibrationsbereich lag bei 0,05–5,0 ng/mg.

Tabelle 6: Grenzwerte für Cocain und Opiate

Quelle: Institut für Rechtsmedizin, Grenzwerte Analyte GC-MSMS: Methadon, Cocain, Opiate, Cannabinoide, 2017

Substanz	Nachweisgrenze [ng/mg]	Bestimmungsgrenze [ng/mg]	Stabilität max. rel. Anteil [%] (von Muttersubstanzkonz.) Kal 1, 0,05 (n = 4)	Stabilität max. rel. Anteil [%] (von Muttersubstanzkonz.) Kal 6 5,0 (n = 3)	Matrix Blank/Verschlappung Mittelwert Konz. [ng/mg] (n = 5)	Matrix Blank/Verschlappung RSD [%] (n = 5)
EME	0,05	0,05	0	0	-	-
EDDP	0,05	0,05	5,4	4,8	-	-
Methadon	0,025	0,05	entfällt	entfällt	-	-
Norcocain	0,025	0,05	0	0	-	-
Cocain	0,025	0,1	entfällt	entfällt	0,0043	135
Cocaethylen	0,025	0,05	2,3	2,1	-	-
BE	0,025	0,05	4,3	1,5	0,0267	16
DHC	0,025	0,05	entfällt	entfällt	-	-
Codein	0,025	0,05	entfällt	entfällt	-	-
Mor	0,025	0,05	21,0	21,7	-	-
6-MAM	0,025	0,05	entfällt	entfällt	-	-

### 3.4. Statistische Auswertungen

Alle Auswertungen wurden mit der Statistiksoftware SPSS Version 28.0.1.0 durchgeführt.

Die Datenbank, welcher die Ergebnisse der Haarproben entnommen wurden, war WinLims. Zunächst wurden die einzelnen Substanzen zu Substanzklassen zusammengefasst. Dies führte zu den Substanzklassen Cannabinoide, Amfetamine, Cocain und Opiate. Die Bildung der Substanzklassen erfolgte über die Berechnung eines Summenscores für jede Klasse für jede Probandin und jeden Probanden. Weiter wurden diejenigen Probandinnen und Probanden, die auf die jeweiligen Substanzen untersucht wurden und bei denen kein positiver Nachweis auf bestimmte Substanzgruppen erfolgte, umcodiert. Ihnen wurde ein weiterer Wert für fehlende Werte zugewiesen (-99) mit der Begründung, dass diese nicht in die weiteren Berechnungen für die Lagemaße eingehen. Somit ist 999 codiert für jene Datensätze, die auf die bestimmte Substanz bzw. die Substanzklasse nicht untersucht wurden, während die -99 für Personen codiert ist, die untersucht wurden, deren Ergebnisse jedoch negativ ausfielen.

Im weiteren Verlauf erfolgten deskriptive Auswertungen, die im Folgenden erläutert werden:

- Für jede Substanz gab es eine Nachweisgrenze/einen Schwellenwert. Anhand der vorhandenen Schwellenwerte wurde entschieden, ob ein stattgehabter Konsum anzunehmen ist oder nicht.
- Kategorielle Variablen waren als absolute und relative Häufigkeiten dargestellt, für stetige Variablen waren Mittelwert, Standardabweichung, Median, Perzentile, Minimum und Maximum angegeben.
- Für die grafische Darstellung von kategoriellen Variablen wurden Kreisdiagramme genutzt. Die grafische Darstellung der stetigen Variablen erfolgte mittels Boxplots.
- Weiter wurden Kreuztabellen erstellt und mittels des Exakten Test nach Fisher Signifikanztestungen durchgeführt. Für die grafische Darstellung wurden Balkendiagramme mit relativen Häufigkeiten genutzt.
- Die Einheit pg/mg der Cannabinoide THC-OH und THC-CS wurde in ng/mg umgerechnet, um einen einheitlichen Vergleich der Daten zu ermöglichen.

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Anlass der Untersuchung und Haarfarben

Insgesamt wurden 720 Haarproben untersucht. Die nachfolgenden Tabellen zeigen den jeweiligen Anlass der Untersuchungen und deren Verteilung (Tabelle 7) sowie die unterschiedlichen Haarfarben und deren Verteilung (Tabelle 8):

*Tabelle 7: Anlass der Haaruntersuchung*

*Quelle: Eigene Darstellung*

	<b>N</b>	<b>%</b>
Fahreignung	397	55,1 %
Jugendamt	93	12,9 %
Polizei	16	2,2 %
Leiche	137	19,0 %
Sonstige	77	10,7 %

*Tabelle 8: Haarfarbe; Verteilung*

*Quelle: Eigene Darstellung*

	<b>N</b>	<b>%</b>
Schwarz	42	5,8 %
Braun	381	52,9 %
Grau	11	1,5 %
Blond	281	39,0 %
Sonstige	5	0,7 %

In der obigen Tabelle wird ersichtlich, dass der häufigste Anlass für eine Haaranalyse die Fahreignung war, bei 55,1 % der Haarproben ging es um die forensische Haaranalyse aufgrund der Feststellung der Fahreignung. Bei 12,9 % der Haarproben wurden das Jugendamt eingeschaltet, bei 19,0 % handelte es sich um einen verstorbenen Menschen, in 2,2 % der Fälle fanden polizeiliche Untersuchungen statt und bei 10,7 % handelte es sich um sonstige Anlässe wie zum Beispiel Gericht und Privatangelegenheiten.

Am häufigsten wurden braune Haare untersucht. Bei 52,9 % der Haarproben handelt es sich um braune Haare. 39,0 % der Haarproben waren blond, 5,8 % schwarz, 1,5 % grau und bei 0,7 % handelte es sich um sonstige Haarfarben wie zum Beispiel rote Haare. Dies wird in der nachfolgenden Abbildung 6 grafisch und übersichtlich dargestellt.

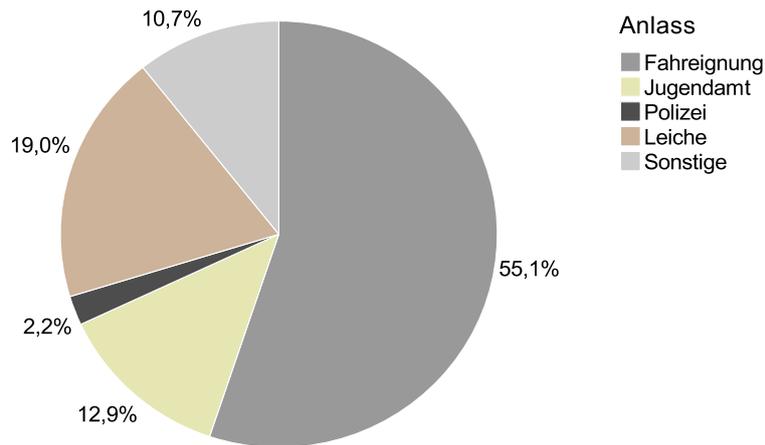


Abbildung 6: Anlass der Haaruntersuchungen in Prozent

Quelle: eigene Darstellung

Die obige Abbildung stellt die Anteile der jeweiligen Untersuchungsanlässe in Prozent der Gesamtzahl an Proben dar.

Die Verteilung der einzelnen Haarfarben kann der unten stehenden Abbildung 7 entnommen werden.

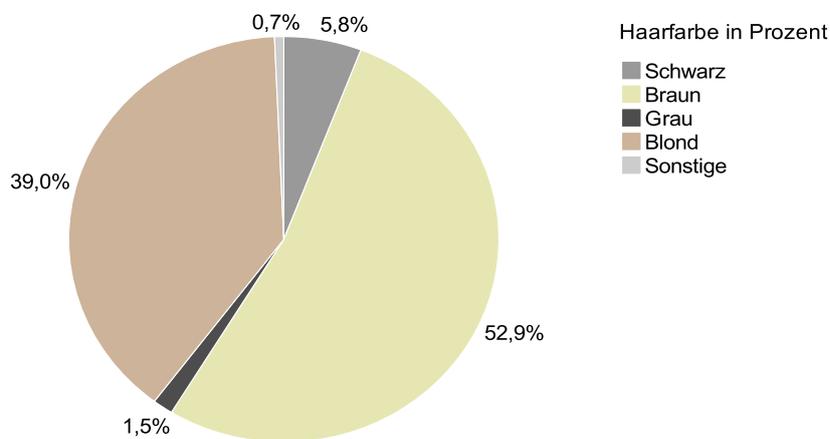


Abbildung 7: Haarfarben der untersuchten Personen in Prozent

Quelle: eigene Darstellung

## 4.2. Substanzklassen

### 4.2.1. Substanznachweise gesamt

Bei den  $N = 720$  untersuchten Haarproben wurden unterschiedliche Substanzen gefunden. Diese wurden nach Substanzklassen eingeteilt. Deren deskriptive Statistiken werden in der nachfolgenden Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Deskriptive Statistiken der vier untersuchten Substanzklassen unter Berücksichtigung der Mittelwerte ( $M$ ), der Standardabweichungen ( $SD$ ), des Medians und der Perzentile in ng/mg.

Quelle: eigene Darstellung

	<b>N</b>	<b>C<sub>min</sub></b>	<b>C<sub>max</sub></b>	<b>M</b>	<b>SD</b>	<b>Median</b>	<b>25. Perz.</b>	<b>75. Perz.</b>
Cannabinoide	324	0,0000*	15,4890	0,4556	1,395	0,0350	0,0053	0,2856
Nicht untersucht	396							
Untersucht, aber ohne positiven Nachweis	68							
Opiate	558	0,0000*	96,4900	3,0886	11,5747	0,0000*	0,0000*	0,0000*
Nicht untersucht	162							
Untersucht, aber ohne positiven Nachweis	434							
Cocain	517	0,0000*	288,7000	5,915	26,1067	0,0000*	0,0000*	0,4465
Nicht untersucht	203							
Untersucht, aber ohne positiven Nachweis	284							
Amfetamine	638	0,0000*	189,1000	3,8261	17,0952	0,0000*	0,0000*	0,2908
Nicht untersucht	82							
Untersucht, aber ohne positiven Nachweis	439							

Anmerkungen: Werte sind in ng/mg angegeben.

\*Rundungsbedingte Werte. Der wahre Wert ist  $> 0,0000$ , jedoch kann er an dieser Stelle nicht angezeigt werden.

Wie die obige Tabelle zeigt, wurden vier Substanzklassen untersucht: Cannabinoide, Amfetamine, Cocain und Opiate. Die obige Tabelle zeigt die Anzahl der untersuchten Haarproben pro Substanzklasse, die Zahl der Proben, in welchen die jeweiligen Substanzklassen nachgewiesen wurden, sowie die Anzahl der negativen Proben pro Substanzklasse. Als deskriptive Maße wurden Mittelwerte und Mediane, die Standardabweichungen und die 25%- sowie 75%-Perzentile berechnet.

Der höchste Median ist bei der Substanzklasse der Cannabinoide zu finden ( $M_{Med} = 0,0350$  ng/mg), während der Median bei den Opiaten, Cocain sowie Amfetaminen bei ( $M_{Med} = 0,0000$  ng/mg) lag. Die meisten Proben lieferten einen positiven Nachweis auf Cannabinoide ( $n = 256$ ).

#### 4.2.2. Substanznachweise bei Verstorbenen

Die nachfolgende Tabelle 10 zeigt die positiven und negativen Proben in der Kohorte der Verstorbenen mit  $n = 137$  Haarproben. In Tabelle 10 finden sich die deskriptiven Statistiken der untersuchten Substanzklassen bei den Leichen unter Berücksichtigung der Mittelwerte, der Standardabweichungen, des Medians und der Perzentile.

Tabelle 10: Deskriptive Statistiken der vier untersuchten Substanzklassen bei Verstorbenen unter Berücksichtigung der Mittelwerte ( $M$ ), der Standardabweichungen ( $SD$ ), des Medians und der Perzentile in ng/mg.

Quelle: eigene Darstellung

	<b>N</b>	<b>C<sub>min</sub></b>	<b>C<sub>max</sub></b>	<b>M</b>	<b>SD</b>	<b>Median</b>	<b>25. Perz.</b>	<b>75. Perz.</b>
Cannabinoide	105	0,0000*	15,4890	0,5119	1,7815	0,0417	0,0050	0,2356
Nicht untersucht	32							
Untersucht, aber ohne positiven Nachweis	22							
Opiate	124	0,0000*	96,4900	13,2963	21,4381	0,7240	0,0000*	21,5823
Nicht untersucht	13							
Untersucht, aber ohne positiven Nachweis	44							
Cocain	102	0,0000*	288,7000	21,3963	52,0146	0,4150	0,0000*	11,7450
Nicht untersucht	35							
Untersucht, aber ohne positiven Nachweis	33							
Amfetamine	118	0,0000*	177,0000	9,5241	25,5303	0,2850	0,0000*	5,2125
Nicht untersucht	19							
Untersucht, aber ohne positiven Nachweis	52							

Anmerkungen: Werte sind in ng/mg angegeben.

\*Rundungsbedingte Werte. Der wahre Wert ist  $> 0,0000$ , jedoch kann er an dieser Stelle nicht angezeigt werden.

Bei Verstorbenen wurden am häufigsten Cannabinoide nachgewiesen ( $n = 83$ ), gefolgt von Opiaten ( $n = 80$ ). Bei 66 Leichen konnten Amfetamine nachgewiesen werden und bei 69 Verstorbenen waren die Nachweise auf Cocain positiv. In der Kohorte der Verstorbenen weist die Substanzklasse des Cocains den höchsten Mittelwert auf (21,3963 ng/mg), gefolgt von den Opiaten (13,2963 ng/mg). Der höchste Median wurde mit ( $M_{Med} = 0,7240$  ng/mg) für Opiate gefunden, während der Median für Cocain bei ( $M_{Med} = 0,4150$  ng/mg) lag. Der geringste Median mit ( $M_{Med} = 0,0417$  ng/mg) wurde für Cannabinoide gemessen, während der Median der Amfetamine bei mit ( $M_{Med} = 0,2850$  ng/mg) lag.

### 4.2.3. Substanzklassen in Abhängigkeit von der Haarfarbe der gesamten Kohorte

Die positiven Nachweise in den jeweiligen Substanzklassen innerhalb der gesamten Kohorte wurden in Abhängigkeit von der Haarfarbe untersucht. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Deskriptive Statistiken der vier untersuchten Substanzklassen in Abhängigkeit von der Haarfarbe unter Berücksichtigung der Mittelwerte (M), der Standardabweichungen (SD), des Medians und der Perzentile in ng/mg.

Quelle: eigene Darstellung

	<b>N</b>	<b>C<sub>min</sub></b>	<b>C<sub>max</sub></b>	<b>M</b>	<b>SD</b>	<b>Median</b>	<b>25. Perz.</b>	<b>75. Perz.</b>
<b>Schwarz</b>								
Cannabinoide	22	0,0000*	0,9730	0,1929	0,2806	0,0634	0,01275	0,30678
Fehlend**	20							
Opiate	31	0,0000*	31,6100	2,2689	6,5470	0,0000*	0,0000*	0,0900
Fehlend**	11							
Cocain	28	0,0000*	288,7000	20,9238	63,9867	0,0640	0,0000*	0,8268
Fehlend**	14							
Amfetamine	36	0,0000*	73,8800	5,2468	15,3457	0,0000*	0,0000*	0,07500
Fehlend**	6							
<b>Grau</b>								
Cannabinoide	6	0,0000*	0,1700	0,0357	0,0669	0,0065	0,0000*	0,0658
Fehlend**	5							
Opiate	9	0,0000*	0,5900	0,0887	0,2002	0,0000*	0,0000*	0,1040
Fehlend**	2							
Cocain	9	0,0000*	39,7700	5,0351	13,1087	0,0000*	0,2300	2,5060
Fehlend**	2							
Amfetamine	8	0,0000*	2,5800	0,3225	0,9122	0,0000*	0,0000*	0,0000*
Fehlend**	3							
<b>Braun</b>								
Cannabinoide	139	0,0000*	6,4945	0,4556	0,9573	0,0430	0,0,60	0,4225
Fehlend**	242							
Opiate	292	0,0000*	96,4900	3,8392	14,1000	0,0000*	0,0000*	0,0000*
Fehlend**	89							
Cocain	272	0,0000*	229,1250	7,0244	27,209	0,0000*	0,0000*	0,7865
Fehlend**	109							
Amfetamine	344	0,0000*	177,0000	3,5027	16,2346	0,0000*	0,0000*	0,2650
Fehlend**	37							
<b>Blond</b>								
Cannabinoide	156	0,0000*	15,4790	0,5116	1,7909	0,0320	0,0320	0,2026
Fehlend**	125							
Opiate	221	0,0000*	53,3800	2,4036	8,2750	0,0000*	0,0000*	0,0000*

	<b>N</b>	<b>C<sub>min</sub></b>	<b>C<sub>max</sub></b>	<b>M</b>	<b>SD</b>	<b>Median</b>	<b>25. Perz.</b>	<b>75. Perz.</b>
Fehlend**	60							
Cocain	204	0,0000*	120,5400	2,5160	12,1578	0,0000*	0,0000*	0,2490
Fehlend**	77							
Amfetamine	248	0,0000*	189,10000	4,2124	18,7933	0,0000*	0,0000*	0,3575
Fehlend**	33							
<b>Sonstige</b>								
Cannabinoide	1	0,0210	0,0210	0,0210	-	0,2100	0,2100	0,2100
Fehlend**	4							
Opiate	5	0,0000*	0,0500	0,0100	0,02236	0,0000*	0,0000*	0,2500
Fehlend**	0							
Cocain	4	0,0000*	2,0400	0,7575	0,9741	0,4950	0,0000*	1,7776
Fehlend**	1							
Amfetamine	2	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*
Fehlend**	3							

Anmerkungen: Werte sind in ng/mg angegeben.

\*Rundungsbedingte Werte. Der wahre Wert ist > 0,0000, jedoch kann er an dieser Stelle nicht angezeigt werden.

\*\*Fehlende Werte. Die untersuchten Probandinnen und Probanden ohne positiven Substanznachweis.

Bei schwarzen Haaren konnte der höchste Mittelwert bei der Substanzklasse Cocain gefunden werden ( $M = 20,9238$  ng/mg). Den zweithöchsten Mittelwert wiesen bei schwarzen Haaren die Amfetamine auf mit  $M = 5,2468$  ng/mg. Der geringste Mittelwert konnte bei schwarzen Haaren in der Substanzklasse der Cannabinoide gefunden werden ( $M = 0,1929$  ng/mg). Der höchste Median mit  $M_{Med} = 0,0640$  ng/mg wurde bei schwarzen Haaren für Cocain ermittelt.

Bei braunen Haaren fand sich der höchste Mittelwert in der Substanzklasse des Cocains ( $M = 7,0244$  ng/mg), der zweithöchste Mittelwert fand sich mit  $M = 3,8392$  ng/mg bei den Opiaten. Bei der Substanzklasse der Amfetamine konnte ein Mittelwert von  $M = 3,5027$  ng/mg gefunden werden, den niedrigsten Mittelwert wiesen die Cannabinoide mit  $M = 0,4556$  ng/mg auf. Die Mediane bei braunen Haaren betragen  $M_{Med} = 0,0430$  ng/mg für Cannabinoide.

Blonde Haare wiesen den höchsten Mittelwert bei der Substanzklasse der Amfetamine auf ( $M = 4,2124$  ng/mg). Der zweithöchste Mittelwert konnte bei Cocain mit  $M = 2,5160$  ng/mg gefunden werden. Der niedrigste Mittelwert mit  $M = 0,5116$  ng/mg konnte bei den Cannabinoiden ermittelt werden. Die Mediane lagen bei  $M_{Med} = 0,0320$  ng/mg bei den Cannabinoiden.

In grauen Haaren konnte der höchste Mittelwert bei Cocain gefunden werden ( $M = 5,0351$  ng/mg), ebenso bei den „sonstigen“ Haarfarben wie z. B. rot ( $M = 0,7575$  ng/mg). Der Median bei grauen Haaren belief sich auf  $M_{Med} = 0,0065$  ng/mg für Cannabinoide.

Hierzu ist anzumerken, dass bei den sonstigen Haarfarben keine Amfetamine nachgewiesen werden konnten. Grund hierfür war die jeweils geringe Anzahl an verfügbaren Haarproben.

#### 4.2.4. Substanzklassen nach Haarfarben bei Verstorbenen

In der Kohorte der Verstorbenen wurden die gefundenen Substanzklassen ebenfalls in Abhängigkeit von der Haarfarbe untersucht. Die Ergebnisse sind in der unten stehenden Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Deskriptive Statistiken der vier untersuchten Substanzklassen bei den Leichen in Abhängigkeit von der Haarfarben unter Berücksichtigung der Mittelwert (M), der Standardabweichungen (SD), des Medians und der Perzentile in ng/mg.

Quelle: eigene Darstellung

	<b>N</b>	<b>C<sub>min</sub></b>	<b>C<sub>max</sub></b>	<b>M</b>	<b>SD</b>	<b>Med</b>	<b>25. Perz.</b>	<b>75. Perz.</b>
<b>Schwarz</b>								
Cannabinoide	7	0,0000*	0,3744	0,1376	0,1504	0,0762	0,0000*	0,2843
Fehlend**	3							
Opiate	9	0,0000*	31,6100	7,6418	10,7225	0,7380	0,0000*	13,0550
Fehlend**	1							
Cocain	7	0,0000*	288,7000	82,8270	111,6345	12,0900	0,0390	168,9000
Fehlend**	3							
Amfetamine	9	0,0000*	73,8800	14,5489	25,3916	1,7400	0,0000*	24,6050
Fehlend**	1							
<b>Grau</b>								
Cannabinoide	0	-	-	-	-	-	-	-
Fehlend**	2							
Opiate	1	0,2080	0,5900	0,3990	0,2701	0,0000*	0,0000*	0,1040
Fehlend**	1							
Cocain	1	39,7700	39,7700	39,7700	-	0,0000*	0,2300	2,5060
Fehlend**	1							
Amfetamine	0	-	-	-	-	-	-	-
Fehlend**	2							
<b>Braun</b>								
Cannabinoide	43	0,0000*	6,4945	0,5271	1,1697	0,0287	0,0600	0,4225
Fehlend**	26							
Opiate	52	0,0000*	96,4900	20,5968	27,6845	8,4400	0,0000*	34,1565
Fehlend**	7							
Cocain	41	0,0000*	229,1250	28,3984	58,2625	0,9200	0,0000*	17,3600
Fehlend**	18							
Amfetamine	50	0,0000*	177,0000	11,0159	33,7928	0,1500	0,0000*	4,8625
Fehlend**	9							
<b>Blond</b>								
Cannabinoide	54	0,0000*	15,4790	0,5574	2,2618	0,0490	0,0000*	0,2069
Fehlend**	10							
Opiate	59	0,0000*	53,3800	8,6115	14,0706	0,0000*	0,0000*	0,0000*
Fehlend**	5							

	<i>N</i>	<i>C<sub>min</sub></i>	<i>C<sub>max</sub></i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Med</i>	25. Perz.	75. Perz.
Cocain	52	0,0000*	120,5400	7,6640	21,5458	0,2300	0,0000*	14,6480
Fehlend**	12							
Amfetamine	58	0,0000*	60,3900	7,6171	15,9511	0,2865	0,0000*	3,4213
Fehlend**	6							
<b>Sonstige</b>								
Cannabinoide	1	0,0210	0,0210	0,0210	-	0,0210	0,0210	0,0210
Fehlend**	1							
Opiate	2	0,0000*	0,0500	0,0250	0,0354	0,0250	0,0000*	-
Fehlend**	0							
Cocain	1	0,0000*	0,0000*	0,0000*	-	0,0000*	0,0000*	0,0000*
Fehlend**	1							
Amfetamine	1	0,0000*	0,0000*	0,0000*	-	0,0000*	0,0000*	0,0000*
Fehlend**	1							

Anmerkungen: Werte sind in ng/mg angegeben.

\*Rundungsbedingte Werte. Der wahre Wert ist > 0,0000, jedoch kann er an dieser Stelle nicht angezeigt werden.

\*\*Fehlende Werte. Die untersuchten Probandinnen und Probanden ohne positiven Substanznachweis.

Bei den Verstorbenen fand sich in schwarzen Haaren der höchste Mittelwert von  $M = 82,8270$  ng/mg bei der Substanzklasse Cocain. Dies war ebenso in der Gesamtkohorte der Fall (siehe Kapitel 4.2.3). Auch bei den Verstorbenen mit schwarzen Haaren fand sich der zweithöchste Mittelwert bei der Substanzklasse der Amfetamine ( $M = 14,5489$  ng/mg). Der niedrigste Mittelwert war bei den Cannabinoiden feststellbar ( $M = 0,1376$  ng/mg). Der höchste Mittelwert bei Verstorbenen mit braunen Haaren mit einem Mittelwert von  $M = 28,3984$  ng/mg konnte bei der Substanzklasse des Cocains gefunden werden. Innerhalb der Gesamtkohorte war dies ebenfalls bei Cocain der Fall (siehe Kapitel 4.2.3). Der höchste Median bei schwarzhaarigen Verstorbenen wurde bei  $M_{Med} = 12,0900$  ng/mg für Cocain ermittelt. Bei braunhaarigen Verstorbenen konnte der zweihöchste Mittelwert von  $M = 20,5968$  ng/mg für die Opiate herausgefunden werden. Der höchste Median lag hier bei  $M_{Med} = 8,4400$  ng/mg. Bei den blonden Verstorbenen bestanden keine bedeutenden Unterschiede hinsichtlich der Mittelwerte bei den einzelnen Substanzklassen. Der höchste Mittelwert war bei den Verstorbenen bei blonden Haaren für Cocain zu finden ( $M = 7,6640$  ng/mg), während der höchste Median mit  $M_{Med} = 0,2865$  ng/mg für Amfetamine berechnet wurde. Innerhalb der Gesamtkohorte (Kapitel 4.2.3.) fand sich der höchste Mittelwert bei den Amfetaminen ( $M = 4,2124$  ng/mg).

In der Kohorte der Verstorbenen mit grauen Haaren konnten nur Mittelwerte für Cocain und Opiate ermittelt werden. Ebenso fanden sich bei den Verstorbenen mit sonstigen Haarfarben lediglich Mittelwerte für Cannabinoide und Opiate, was einen Vergleich mit anderen Gruppen oder mit der Gesamtkohorte stark erschwert. Die entsprechenden Mediane können der obigen Tabelle entnommen werden.

### 4.3. Mittlere Konzentrationen der Substanzen bei Verstorbenen

Bei den Verstorbenen wurden zudem die mittleren Konzentrationen der einzelnen Substanzen ermittelt. Die Einheit aller Substanzen ist ng/mg. Die Ergebnisse werden in der nachfolgenden Tabelle 13 gezeigt.

Tabelle 13: Mittlere Konzentrationen der Substanzen in den Haaren von Verstorbenen in ng/mg.

Quelle: eigene Darstellung

	<b>N</b>	<b>C<sub>min</sub></b>	<b>C<sub>max</sub></b>	<b>M</b>	<b>SD</b>	<b>Median</b>	<b>25. Perz.</b>	<b>75. Perz.</b>
THC	83	0,0000*	12,0000	0,4125	1,4034	0,0180	0,0000*	0,1800
THC-OH	51	0,0000*	0,0270	0,0012	0,0039	0,0000*	0,0000*	0,0005
THC-CS	50	0,0000*	0,1480	0,0054	0,0213	0,0000*	0,0000*	0,0022
CBN	48	0,0000*	0,8600	0,0588	0,1405	0,0000*	0,0000*	0,0268
CBD	75	0,0000*	2,9000	0,0776	0,3014	0,0100	0,0000*	0,0488
MAM	44	0,0000*	36,0000	4,1125	8,1095	0,0545	0,0000*	3,5750
Mor	46	0,0000*	48,0000	4,2372	9,0452	0,1400	0,0000*	4,2750
Cod	41	0,0000*	12,0000	0,8477	1,8471	0,0150	0,0000*	0,7400
DHC	3	0,0000*	0,2300	0,0047	0,0267	0,0000*	0,0000*	0,0000*
Methadon	37	0,0000*	79,0000	3,8655	10,2478	0,0000*	0,0000*	1,6800
EDDP	28	0,0000*	4,7000	0,3147	0,7943	0,0000*	0,0000*	0,1675
Coc	56	0,0000*	266,0000	16,0271	40,1227	0,4700	0,0000*	9,4500
BE	55	0,0000*	127,0000	5,3329	15,2902	0,1800	0,0000*	2,2000
Cocaethylen	36	0,0000*	27,0000	0,6406	2,9130	0,0000*	0,0000*	0,0918
Norcocain	33	0,0000*	9,0000	0,4822	1,4037	0,0000*	0,0000*	0,1600
EME	30	0,0000*	20,0000	0,7883	2,4280	0,0000*	0,0000*	0,3500
Amf	42	0,0000*	177,0000	7,3505	23,8682	0,0000*	0,0000*	3,1875
MDMA	32	0,0000*	36,0000	1,4733	4,9069	0,0000*	0,0000*	0,3700
MDA	8	0,0000*	1,9000	0,0685	0,2672	0,0000*	0,0000*	0,0000*
MDE	1	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*	0,0000*
Metamf	3	0,0000*	65,0000	0,7486	6,1073	0,0000*	0,0000*	0,0000*

Anmerkungen: Werte sind in ng/mg angegeben.

\*Rundungsbedingte Werte. Der wahre Wert ist > 0,0000, jedoch kann er an dieser Stelle nicht angezeigt werden.

Die Haare der Verstorbenen wurden auf unterschiedliche Substanzen untersucht. Die vorliegenden Untersuchungen ergaben, dass bei den meisten Verstorbenen die Substanz Cocain gefunden werden konnte. Amfetamin war ebenfalls eine häufige Substanz, die bei den Verstorbenen nachgewiesen werden konnte. Metamfetamin hingegen wurde bei keinem der Toten gefunden, ebenso konnten kein MDE und MDA nachgewiesen werden. CBN und CBD wurden ebenfalls nur sehr selten gefunden. Die häufigsten Substanzen bei Verstorbenen waren Cocain, Amf, BE, THC-CS und Methadon.

## 4.4. Gruppierte Boxplots nach Haarfarbe und Substanzgruppe

### 4.4.1. Cannabinoide

Um die vorliegenden Forschungsfragen zu beantworten, wurden gruppierte Boxplots nach Substanzgruppe und Haarfarbe erstellt. Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt einen einfachen Boxplot für Cannabinoide nach Haarfarbe.

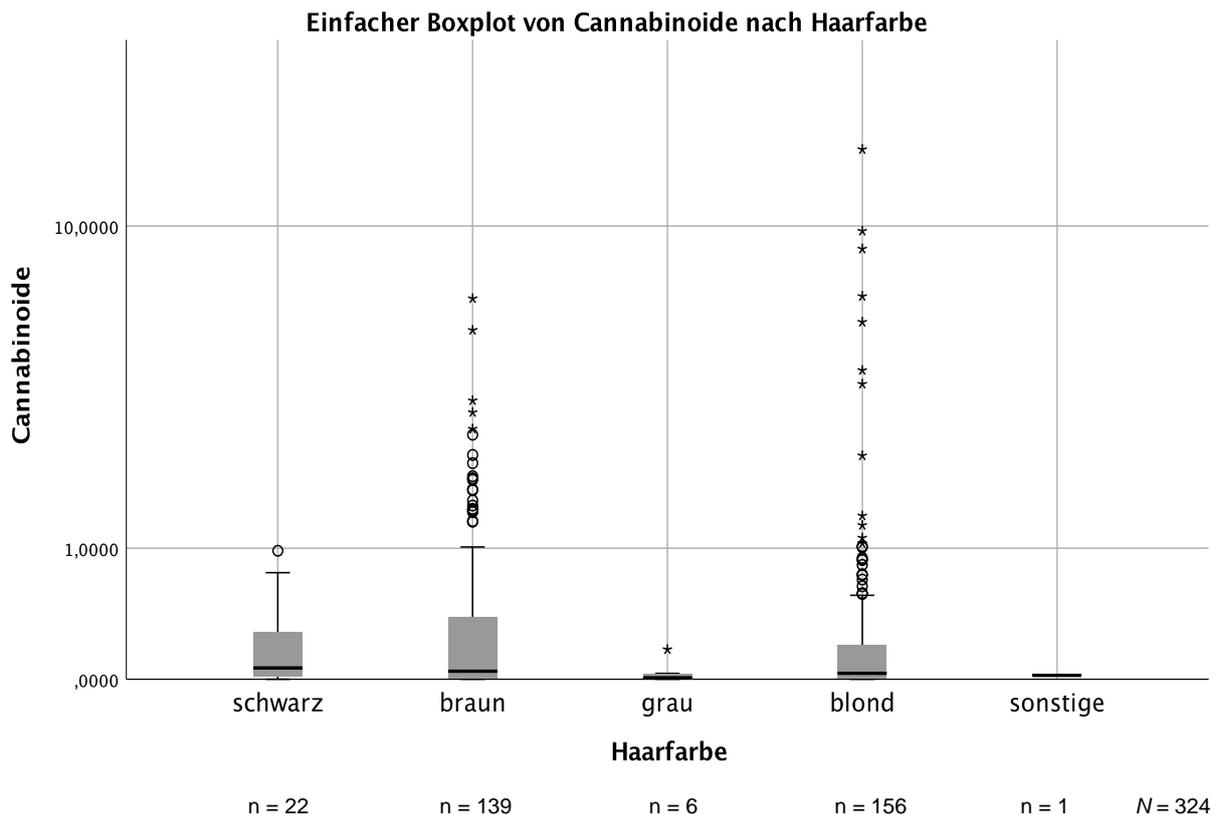


Abbildung 8: Einfacher Boxplot von Cannabinoid-Konzentrationen nach Haarfarbe sortiert

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkungen: Die y-Achse ist logarithmiert in ng/mg dargestellt.

Bei braunen und schwarzen Haaren wurde der höchste Median für Cannabinoide gefunden, gefolgt von blonden und grauen Haaren. Insbesondere bei blonden und braunen Haaren erschwert die große Anzahl an Ausreißern eine Interpretation der Ergebnisse.

### 4.4.2. Amfetamine

Die Boxplots für Amfetamine zeigten ebenfalls eine große Anzahl an Ausreißern, was einen Vergleich der Daten stark erschwert, wie in der nachfolgenden Abbildung 9 zu sehen ist.

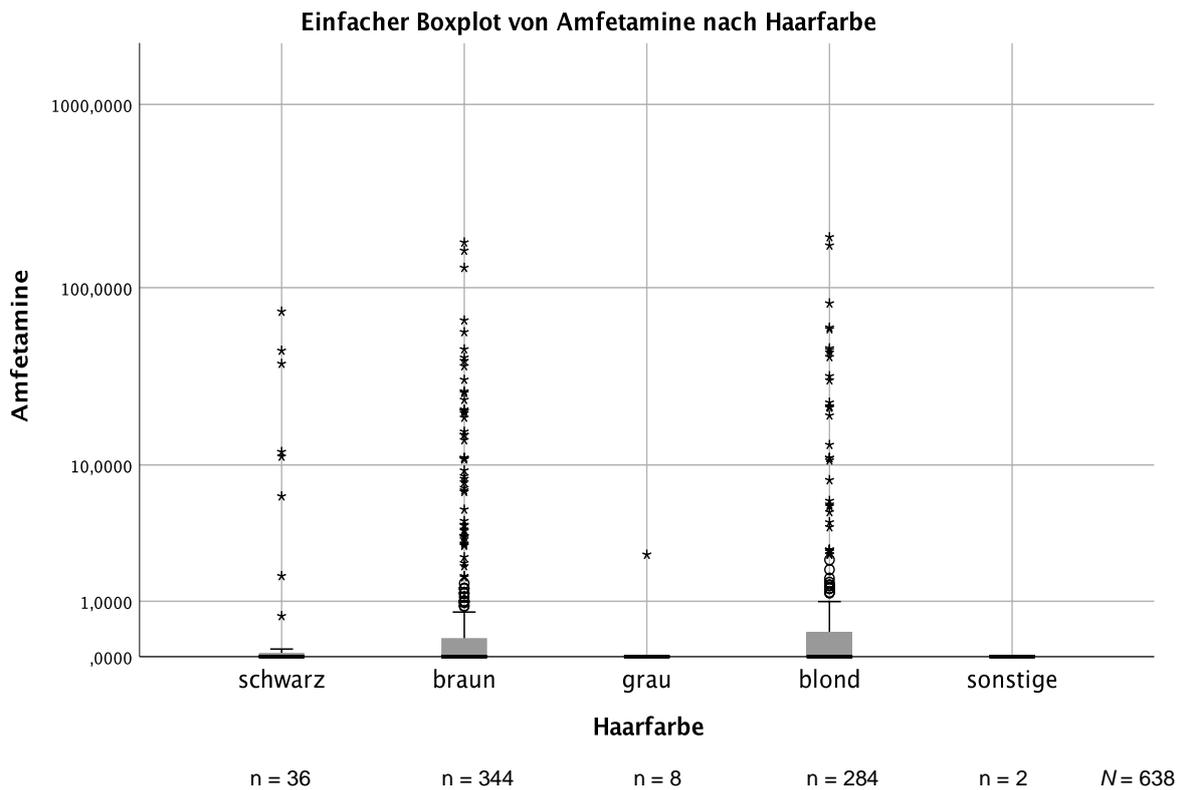


Abbildung 9: Einfacher Boxplot von Amfetamin-Konzentrationen nach Haarfarbe sortiert

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkungen: Die y-Achse ist logarithmiert in ng/mg dargestellt.

Die starke Streuung in den Boxplots lässt keine klare Aussage zu.

#### 4.4.3. Cocain

Ferner wurden einfache Boxplots für die Substanzklasse Cocain berechnet, die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung 10 dargestellt.

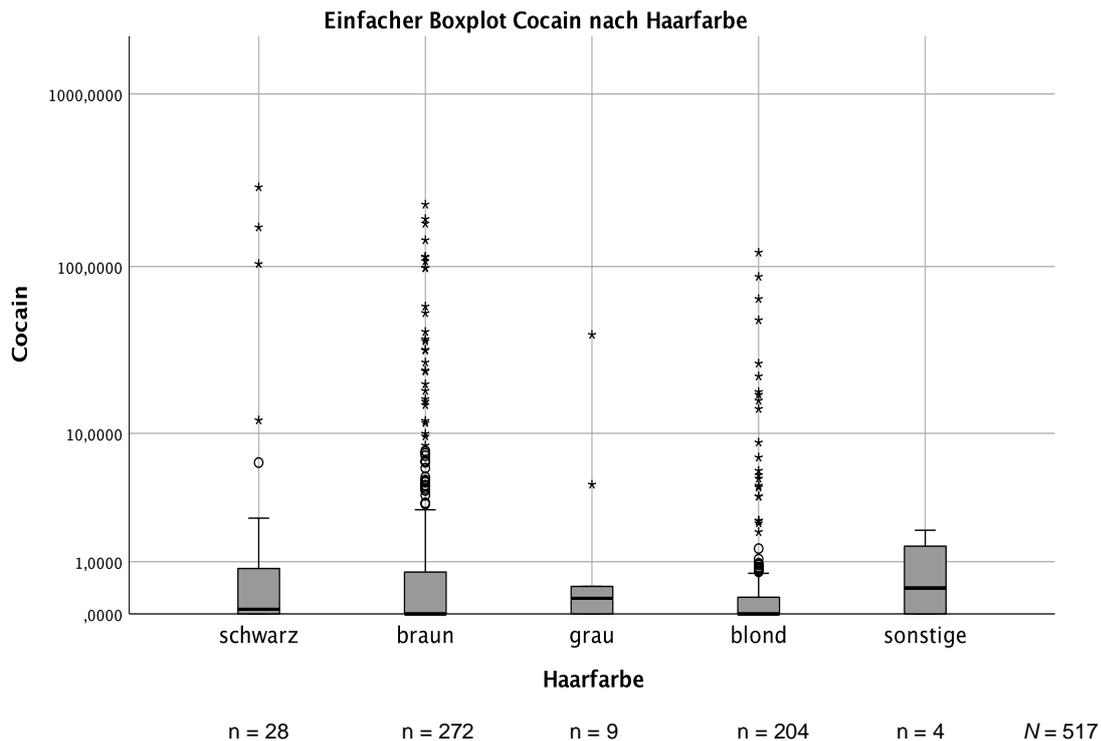


Abbildung 10: Einfacher Boxplot von Cocain-Konzentrationen nach Haarfarbe sortiert

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkungen: Die y-Achse ist logarithmiert in ng/mg dargestellt.

Auch in der obigen Abbildung ist eine hohe Anzahl an Ausreißern zu erkennen. Allerdings fällt auf, dass Cocain besonders häufig bei den „sonstigen“ Haarfarben wie z. B. rot gefunden werden konnte, während Cannabinoide und Amfetamine bei diesen Haarfarben weniger detektiert wurden. Allerdings konnten bei den „sonstigen“ Haarfarben nur vier gültige Werte gefunden werden.

#### 4.4.4. Opiate

Aus den einfachen Boxplots für Opiate lassen sich keine klaren Schlussfolgerungen ziehen, da die Anzahl der Ausreißer zu hoch ist, wie die nachfolgende Abbildung 11 zeigt.

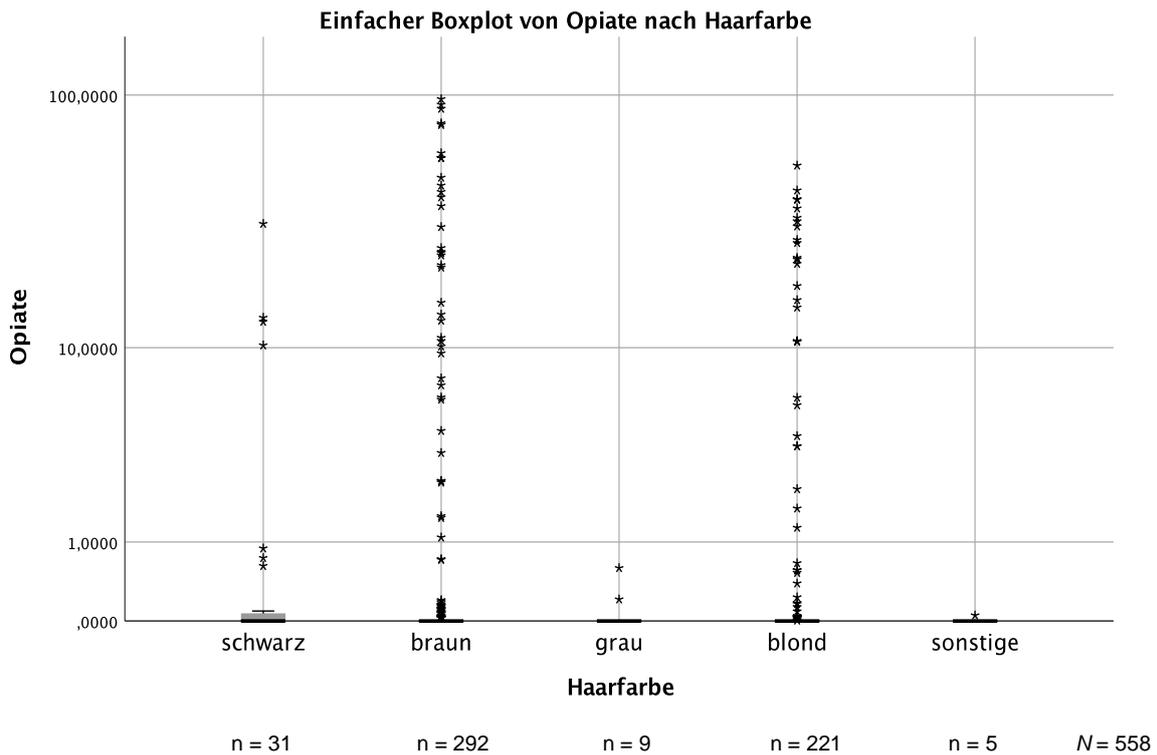


Abbildung 11: Einfacher Boxplot von Opiat-Konzentrationen nach Haarfarbe sortiert

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkungen: Die y-Achse ist logarithmiert in ng/mg dargestellt.

## 4.5. Gruppierte Boxplots nach Substanzklasse und Anlass

### 4.5.1. Cannabinoide

Die Befunde der Haarproben wurden zudem nach Anlass analysiert. Der nachfolgende Boxplot in Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse nach Anlass bei der Substanzgruppe der Cannabinoide.

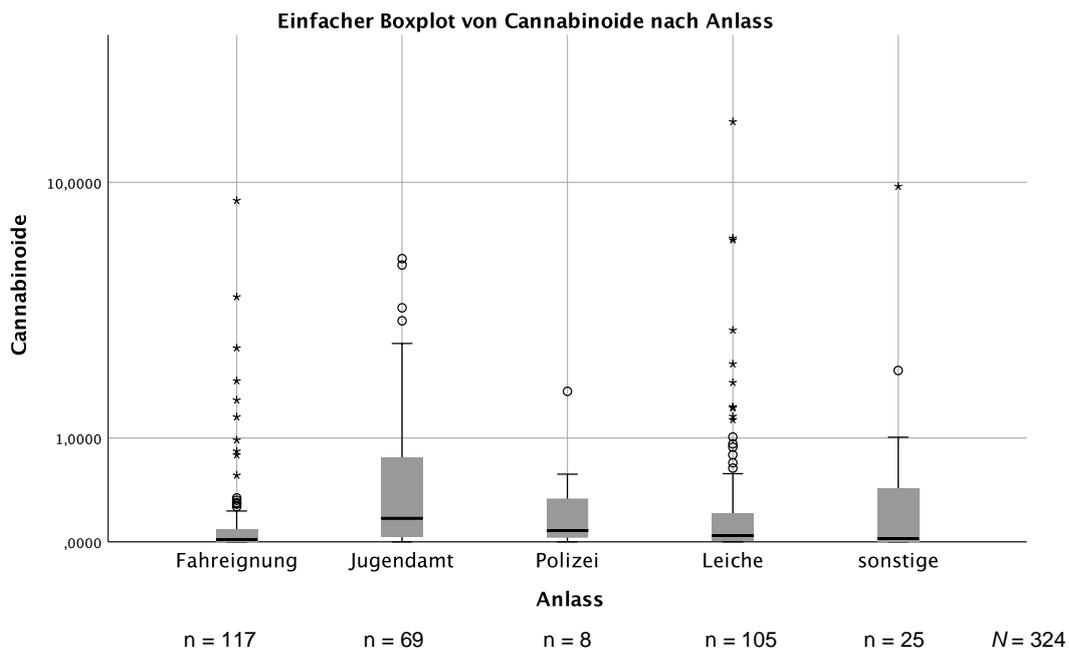


Abbildung 12: Gruppiertes Boxplot von Cannabinoid-Konzentrationen nach Anlass sortiert

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkungen: Die y-Achse ist logarithmiert in ng/mg dargestellt.

Die obige Abbildung zeigt, dass bei Anlass des Jugendamtes in der Gesamtschau die höchsten Konzentrationen bei Testung auf Cannabinoide gefunden wurden. Auch die Konzentrationen von Cannabinoiden beim Anlass Polizei und Anlass Leichen waren hoch. Beim Punkt Fahreignung gab es zahlreiche Ausreißer und eine breite Streuung ist zu erkennen. Der Median liegt bei dem Anlass Jugendamt am höchsten, während der Anlass Polizei hinsichtlich der Konzentration an Cannabinoiden sich an den Anlass Jugendamt anschließt.

#### 4.5.2. Amfetamine

Die Untersuchungen auf Amfetamine wurden ebenfalls nach Anlass in Form von Boxplots gruppiert. Die nachfolgende Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse für Amfetamine.

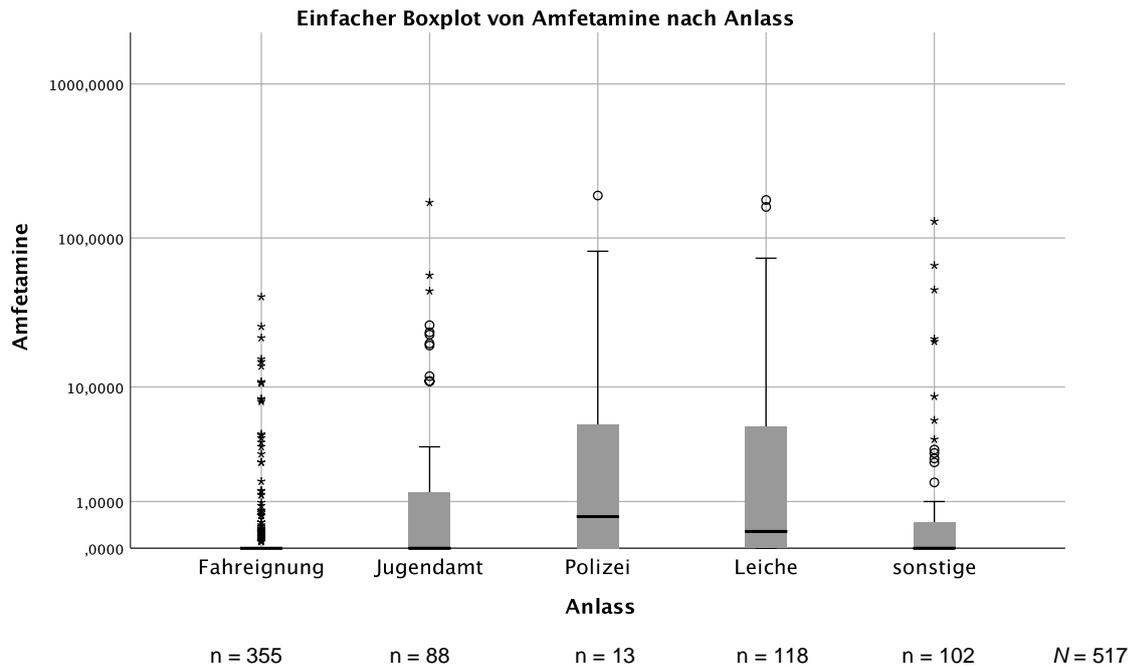


Abbildung 13: Gruppiertes Boxplot von Amfetamin-Konzentrationen nach Anlass sortiert

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkungen: Die y-Achse ist logarithmiert in ng/mg dargestellt.

Die obige Grafik zeigt viele Ausreißer beim Punkt Fahreignung, daher lassen sich nur sehr schwer Schlüsse aus dieser Berechnung ziehen. Die höchsten Konzentrationen in Haarproben auf Amfetamine wurden bei polizeilichen Ermittlungen und Verstorbenen gefunden. Wie in der Grafik oben ersichtlich ist, zeigen sich bei den vorliegenden Daten eine sehr breite Streuung und viele Ausreißer, weshalb die Aussagekraft der Daten limitiert ist. Der Median liegt bei dem Anlass Polizei am höchsten und wird in seiner Konzentration von Amfetaminen vom Anlass der Verstorbenen gefolgt.

### 4.5.3. Cocain

Die Haarproben, die positiv auf Cocain getestet wurden, wurden ebenfalls nach Anlass gruppiert. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung 14 dargestellt.

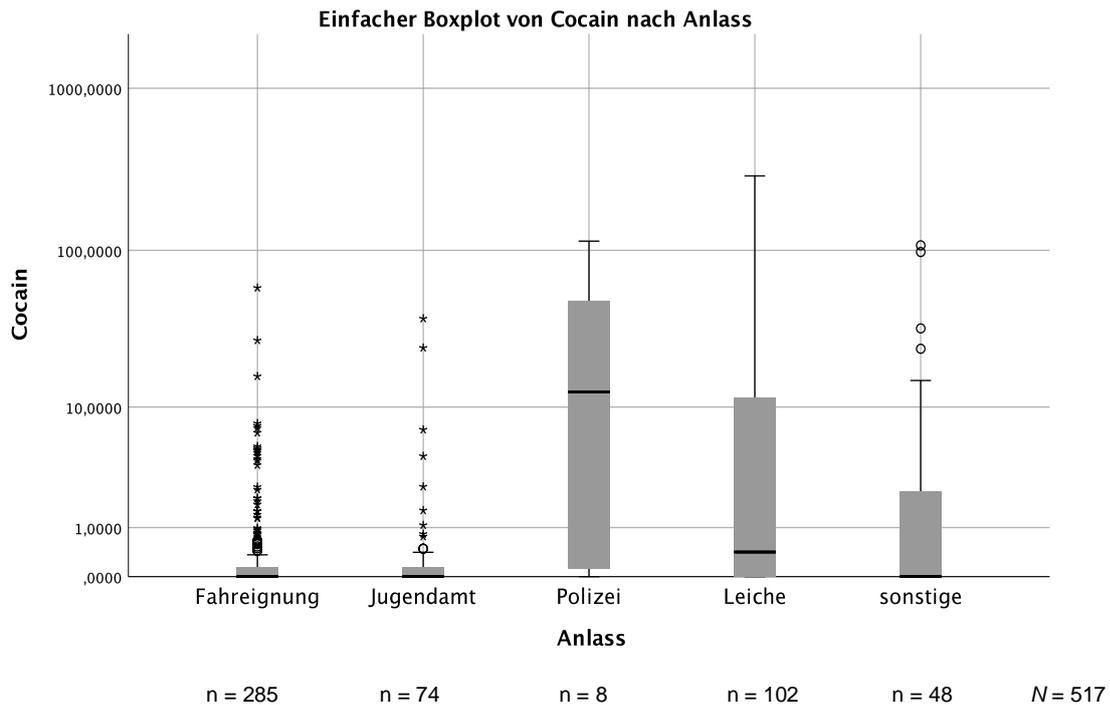


Abbildung 14: Gruppiertes Boxplot von Cocain-Konzentrationen nach Anlass sortiert

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkungen: Die y-Achse ist logarithmiert in ng/mg dargestellt.

Der obige Boxplot zeigt, dass die höchste Konzentration von Cocain bei dem Anlass Polizei festgestellt wurde. Auch der Median war bei dem Anlass Polizei am höchsten. Die Konzentration von Cocain liegt bei den Leichen niedriger, jedoch höher als bei den Anlässen Fahreignung, Jugendamt und Sonstige.

#### 4.5.4. Opiate

Innerhalb der Substanzklasse der Opiate wurde ebenfalls nach Anlass gruppiert. Entsprechende Boxplots wurden angefertigt, die in der nachfolgenden Abbildung 15 dargestellt sind.

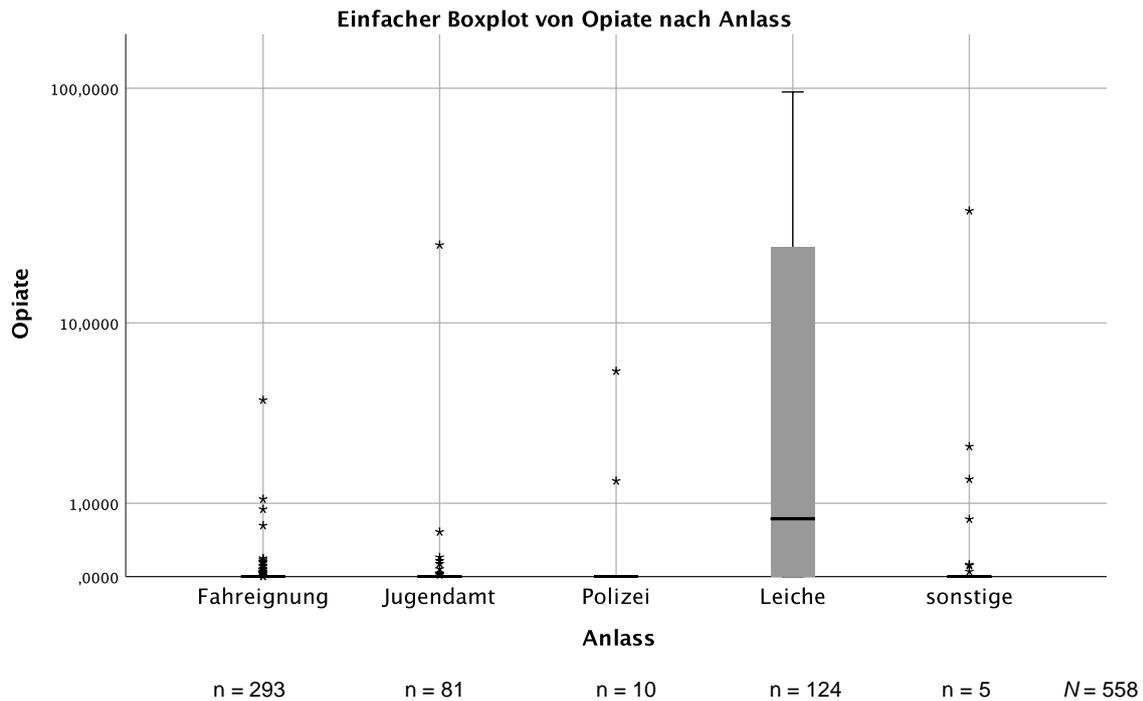


Abbildung 15: Gruppiertes Boxplot von Opiat-Konzentrationen nach Anlass sortiert

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkungen: Die y-Achse ist logarithmiert in ng/mg dargestellt.

Bei der Substanzklasse der Opiate ließ sich nur für Verstorbene ein aussagekräftiger Boxplot berechnen. Die Zahl der Ausreißer war zu hoch bei den Punkten Fahreignung, Jugendamt, Polizei und „sonstige“. Der obige Boxplot liefert einen Hinweis darauf, dass vor allem bei den Verstorbenen hohe Konzentrationen an Opiaten gefunden wurden. Auch der Median lag bei den Verstorbenen am höchsten.

## 4.6. Kreuztabellen Substanzklassen nach Anlass

### 4.6.1. Cannabinoide und Anlass

Die nachfolgende Tabelle 14 bietet eine Übersicht über die auf Cannabinoide positiv getesteten Fälle im Zusammenhang mit dem Anlass.

Tabelle 14: Kreuztabelle Cannabinoide nach Anlass

Quelle: eigene Darstellung

		Anlass					Gesamt
		Fahreignung	Jugendamt	Polizei	Leiche	Sonstige	
Kein Konsum	Anzahl	32	6	1	22	7	68
	% von Anlass	27,4	8,7	12,5	21,0	28,0	21,0
Konsum	Anzahl	85	63	7	83	18	256
	% von Anlass	72,6	91,3	87,5	79,0	72,0	79,0
Gesamt	Anzahl	117	69	8	105	25	324
	% von Anlass	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Es stellte sich heraus, dass am häufigsten beim Anlass Jugendamt positiv auf Cannabinoide getestet wurde. Am geringsten wurde beim Anlass „sonstige“ positiv auf Cannabinoide getestet. Die gesamte Anzahl der Haarproben lag bei  $N = 324$ .

Diese Ergebnisse waren laut Exaktem Test nach Fisher statistisch nicht signifikant ( $p = 0,023$ ).

Die Ergebnisse der Kreuztabelle sind in der nachfolgenden Abbildung 16 übersichtlich dargestellt.

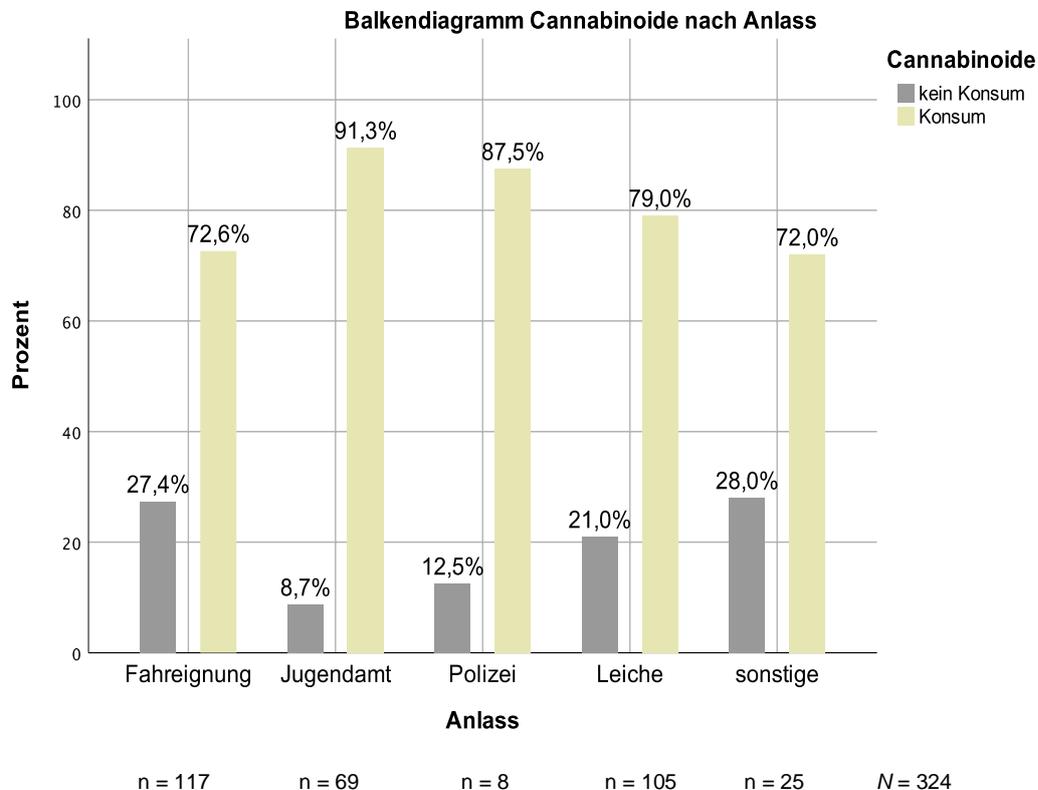


Abbildung 16: Prozentuale Anzahl der Cannabinoid-Analysen sortiert nach Anlass

Quelle: eigene Darstellung

Das obige Balkendiagramm zeigt, dass am häufigsten negativ bei dem Anlass „sonstige“ auf Cannabinoide getestet wurde. Am geringsten waren negative Testungen auf Cannabinoide beim Anlass Jugendamt.

#### 4.6.2. Amfetamine und Anlass

Auch für Amfetamine wurde nach Anlass eine Kreuztabelle erstellt, die nachfolgend gezeigt wird (siehe Tabelle 15).

Tabelle 15: Kreuztabelle Amfetamine nach Anlass

Quelle: eigene Darstellung

		Anlass					Gesamt
		Fahreignung	Jugendamt	Polizei	Leiche	Sonstige	
Kein Konsum	Anzahl	291	46	5	52	45	439
	% von Anlass	82,0	52,3	38,5	44,1	70,3	68,8
Konsum	Anzahl	64	42	8	66	19	199
	% von Anlass	18,0	47,7	61,5	55,9	29,7	31,2
Gesamt	Anzahl	355	88	13	118	64	638
	% von Anlass	55,6	13,8	2,0	18,5	10,0	100,0

Am häufigsten wurde in der Substanzklasse der Amfetamine beim Anlass Polizei positiv getestet. Am geringsten waren positive Testungen auf Amfetamine beim Anlass Fahreignung. Insgesamt wurden  $N = 638$  Proben untersucht.

Diese Ergebnisse waren laut Exaktem Test nach Fisher statistisch signifikant ( $p < 0,001$ ).

Die prozentualen Anteile an positiven Tests nach Anlass zeigt die nachfolgende Abbildung 17.

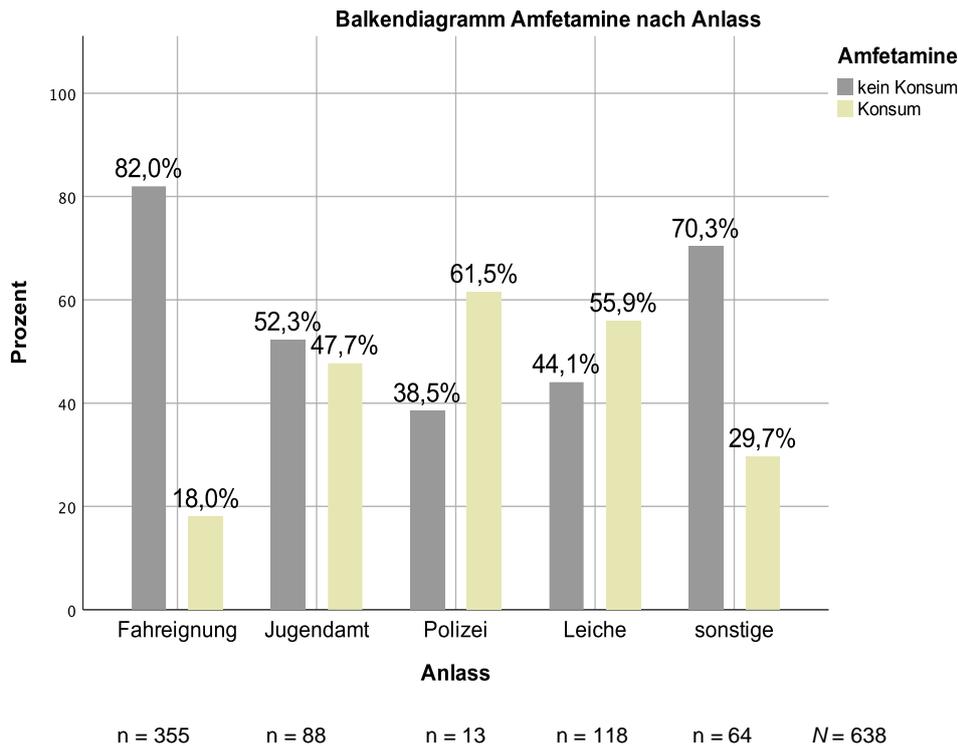


Abbildung 17: Prozentuale Anzahl der Amfetamin-Analysen, sortiert nach Anlass

Quelle: eigene Darstellung

Die obige Grafik zeigt, dass vorwiegend beim Anlass Fahreignung die meisten Haarproben negativ auf Amfetamine getestet wurden. Am geringsten waren negative Testergebnisse auf Amfetamine beim Anlass Polizei.

#### 4.6.3. Cocain und Anlass

Die nachfolgende Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse für Cocain nach Anlass der Testung.

Tabelle 16: Kreuztabelle Cocain nach Anlass

Quelle: eigene Darstellung

		Anlass					Gesamt
		Fahreignung	Jugendamt	Polizei	Leiche	Sonstige	
Kein Konsum	Anzahl	177	46	2	33	26	284
	% von Anlass	62,1	62,2	25,0	32,4	54,2	54,9
Konsum	Anzahl	108	28	6	69	22	233
	% von Anlass	37,9	37,8	75,0	67,6	45,8	45,1
Gesamt	Anzahl	285	74	8	102	48	517
	% von Anlass	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Untersucht wurden  $N = 517$  Proben. Die meisten positiven Proben konnten beim Anlass Polizei gefunden werden. Am geringsten waren die positiven Testergebnisse bei Cocain beim Anlass Jugendamt.

Diese Ergebnisse waren laut Exaktem Test nach Fisher statistisch signifikant ( $p < 0,001$ ).

Die nachfolgende Abbildung 18 stellt die Anzahl der positiven und negativen Proben pro Anlass und in Prozent dar.

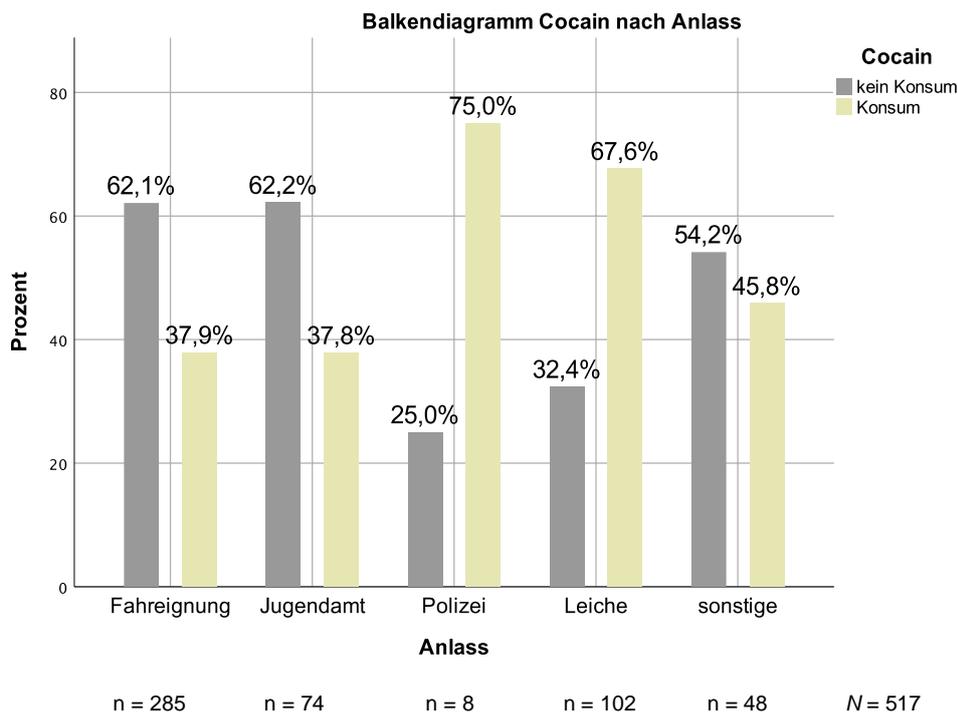


Abbildung 18: Prozentuale Anzahl der Cocain-Analysen, sortiert nach Anlass

Quelle: eigene Darstellung

Die obige Grafik zeigt, dass am häufigsten beim Anlass Jugendamt negativ auf Cocain getestet wurde. Am geringsten waren negative Testergebnisse auf Cocain beim Anlass Polizei.

#### 4.6.4. Opiate nach Anlass

Die Ergebnisse der Haaranalysen auf Opiate wurden ebenfalls nach Anlass gegliedert und eine entsprechende Kreuztabelle wurde angefertigt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 17 ersichtlich.

Tabelle 17: Kreuztabelle Opiate nach Anlass

Quelle: eigene Darstellung

		Anlass					
		Fahreignung	Jugendamt	Polizei	Leiche	Sonstige	Gesamt
Kein Konsum	Anzahl	268	71	8	44	43	434
	% von Anlass	91,5	87,7	80,0	35,5	86,0	77,8
Konsum	Anzahl	25	10	2	80	7	124
	% von Anlass	8,5	12,3	20,0	64,5	14,0	22,2
Gesamt	Anzahl	293	81	10	124	50	558
	% von Anlass	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Aus der obigen Tabelle wird ersichtlich, dass in der vorliegenden Studie vorwiegend bei Leichen positive Haarproben auf Opiate gefunden wurden. Am geringsten waren positive Testergebnisse auf Opiate bei dem Anlass Fahreignung. Die gesamte Anzahl der Proben war  $N = 558$ .

Diese Ergebnisse waren laut Exaktem Test nach Fisher statistisch signifikant ( $p < 0,001$ ).

Die nachfolgende Abbildung 19 zeigt die prozentuale Anzahl an positiven und negativen Haarproben auf Opiate nach Anlass.

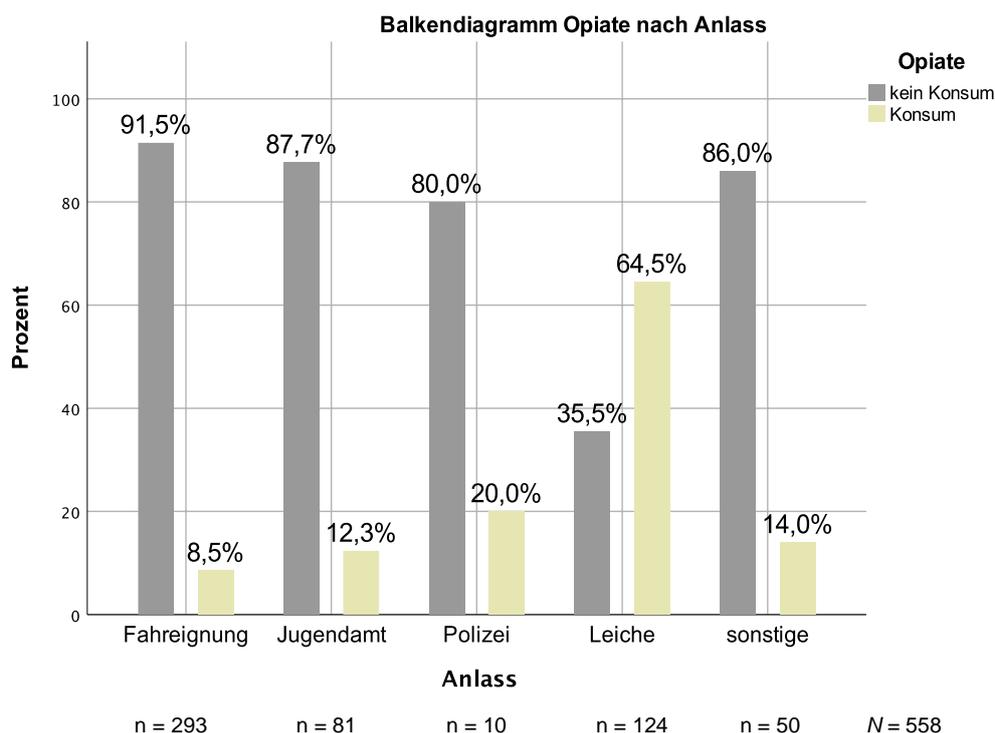


Abbildung 19: Prozentuale Anzahl der Opiat-Analysen sortiert nach Anlass

Quelle: eigene Darstellung

Die obige Grafik zeigt, dass am häufigsten negativ auf Opiate beim Anlass Fahreignung getestet wurde. Am geringsten waren negative Testproben auf Opiate hingegen beim Anlass der Verstorbenen.

## 4.7. Kreuztabellen Substanzklassen nach Haarfarbe

### 4.7.1. Cannabinoide nach Haarfarbe

Die Nachweise auf Cannabinoide wurden in Zusammenhang mit der Haarfarbe untersucht. Hierfür wurde eine Kreuztabelle erstellt, welche nachfolgend dargestellt wird (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Kreuztabelle Cannabinoide nach Haarfarbe

Quelle: eigene Darstellung

		Haarfarbe					Gesamt
		Schwarz	Braun	Grau	Blond	Sonstige	
Kein Konsum	Anzahl	4	26	8	35	0	68
	% von Anlass	18,2	18,7	50,0	22,4	0,0	21,0
Konsum	Anzahl	18	113	3	121	1	256
	% von Anlass	81,8	81,3	50,0	77,6	100,0	79,0
Gesamt	Anzahl	22	139	6	156	1	324
	% von Anlass	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Die Gesamtzahl der Haarproben betrug  $N = 324$ . Die obige Tabelle zeigt, dass am häufigsten positive Proben bei schwarzen Haaren gefunden wurden (81,8 %). 81,3 % der auf Cannabinoide getesteten braunen Haarproben waren positiv, bei grauen Haaren waren 50 % positiv und 50 % der Haarproben negativ. Ferner konnten 77,6 % der blonden Haare positiv auf Cannabinoide getestet werden. Bei den sonstigen Haarfarben stand nur eine Haarprobe zur Verfügung, die positiv getestet wurde.

Die prozentualen Anteile der positiven und negativen Proben auf Cannabinoide nach Haarfarbe sind in der folgenden Abbildung 20 ersichtlich.

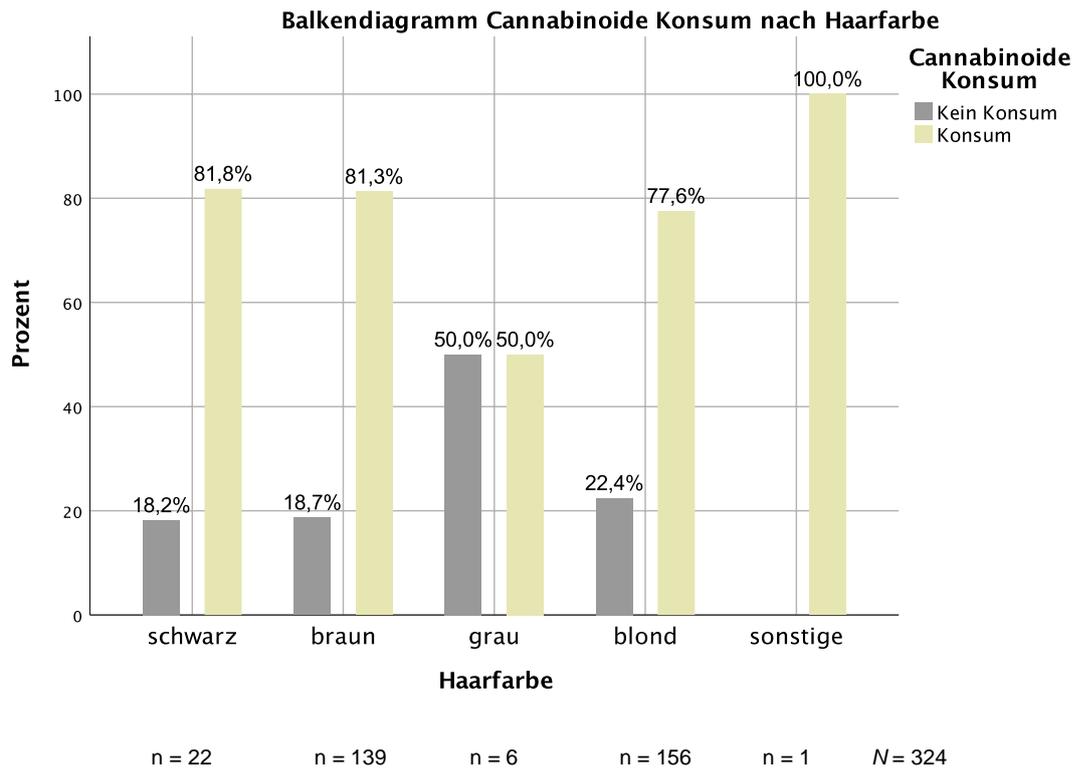


Abbildung 20: Prozentuale Anzahl der Cannabinoid-Analysen sortiert nach Haarfarbe

Quelle: eigene Darstellung

Diese Unterschiede waren nach Exaktem Test nach Fisher statistisch nicht signifikant ( $p = 0,398$ ).

Wie auch in der Tabelle 18 ist auch aus der Abbildung 20 sichtbar, dass es bei den sonstigen Haarfarben in 100 % der geprüften Fälle zu einem positiven Testergebnis kam, wobei nur eine einzige Haarprobe zur Verfügung stand. Auch schwarze Haarproben und braune Haarproben wurden häufig positiv auf Cannabinoide getestet.

#### 4.7.2. Amfetamine nach Haarfarbe

Daraufhin erfolgte die Erstellung einer Kreuztabelle für Amfetamine nach Haarfarben. Die Ergebnisse können der nachfolgenden Tabelle 19 entnommen werden.

Tabelle 19: Kreuztabelle Amfetamine nach Haarfarbe

Quelle: eigene Darstellung

		Haarfarbe					Gesamt
		Schwarz	Braun	Grau	Blond	Sonstige	
Kein Konsum	Anzahl	27	240	7	163	2	439
	% von Anlass	75,0	69,8	87,5	65,7	100,0	68,8
Konsum	Anzahl	9	104	1	85	0	199
	% von Anlass	25,0	30,2	12,5	34,3	0,0	31,2
Gesamt	Anzahl	36	344	8	248	2	638
	% von Anlass	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Die Gesamtzahl der Haarproben betrug  $N = 638$ . Am häufigsten wurden Amfetamine bei blonden Haaren gefunden: 34,3 % der blonden Haarproben wurden positiv auf Amfetamine getestet, gefolgt von braunen Haaren mit 30,2 % positiven Proben. Allgemein wurde nur circa ein Drittel aller Haarproben (31,2 %) positiv auf Amfetamine getestet.

Die prozentualen Anteile der positiven und negativen Proben auf Amfetamine pro Haarfarbe werden in der nachfolgenden Abbildung 21 übersichtlich dargestellt.

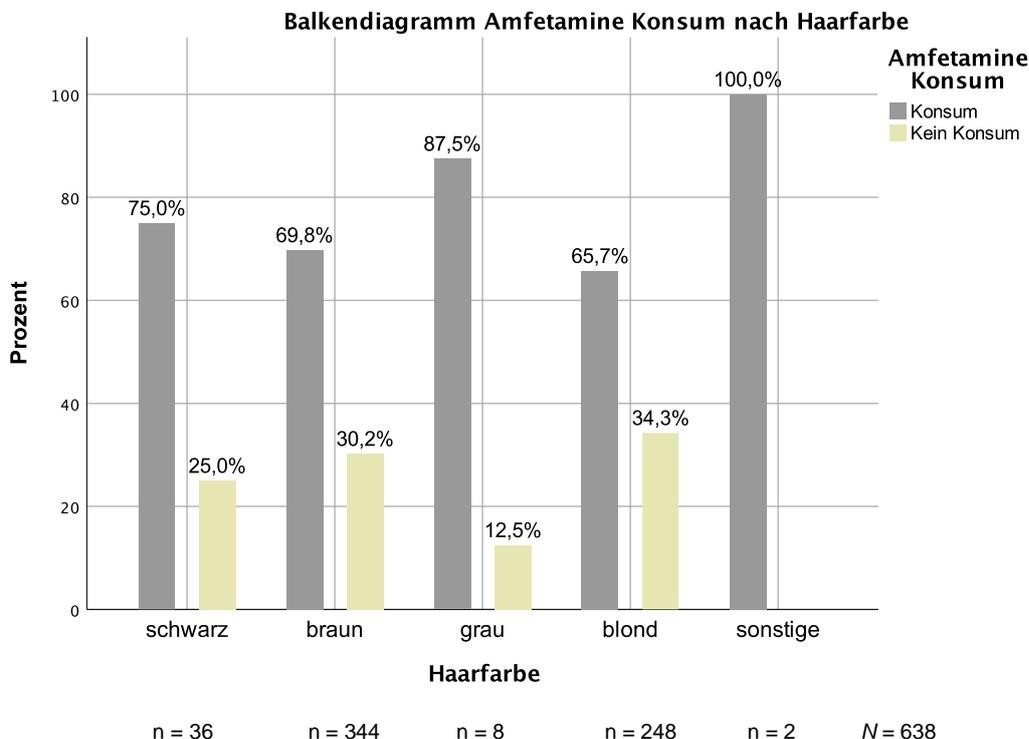


Abbildung 21: Prozentuale Anzahl der Amfetamin-Analysen sortiert nach Haarfarbe

Quelle: eigene Darstellung

Die jeweiligen Unterschiede der prozentualen Anteile zwischen den Haarfarben waren laut Exaktem Test nach Fisher statistisch nicht signifikant ( $p = 0,485$ ).

### 4.7.3. Cocain nach Haarfarbe

Für die Haarproben auf Cocain wurde ebenfalls eine Kreuztabelle nach Haarfarbe erstellt, die unten die Ergebnisse darstellt (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20: Kreuztabelle Cocain nach Haarfarbe

Quelle: eigene Darstellung

		Haarfarbe					Gesamt
		Schwarz	Braun	Grau	Blond	Sonstige	
Kein Konsum	Anzahl	13	149	3	117	2	284
	% von Anlass	46,4	54,8	33,3	57,4	50,0	54,9
Konsum	Anzahl	15	123	6	87	2	233
	% von Anlass	53,6	45,2	66,7	42,6	50,0	45,1
Gesamt	Anzahl	28	272	9	204	4	517
	% von Anlass	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Die obige Kreuztabelle zeigt, dass der höchste prozentuale Anteil an positiven Proben auf Cocain bei den grauen Haaren (66,7 %) festgestellt werden konnte, wobei jedoch lediglich neun Haarproben zur Verfügung standen. Der zweithöchste Anteil konnte bei den „sonstigen“ Haarfarben (50 %) gefunden werden. Allerdings standen hierfür nur zwei Haarproben zur Verfügung, von denen eine positiv auf Cocain getestet wurde. Bei schwarzen Haaren waren 53,6 % der Proben positiv, bei braunen Haaren 45,2 % und bei blonden Haaren 42,6 %. Die Gesamtzahl an Proben belief sich auf  $N = 517$ .

Die untere Abbildung 22 stellt die prozentualen Anteile pro Haarfarbe grafisch dar.

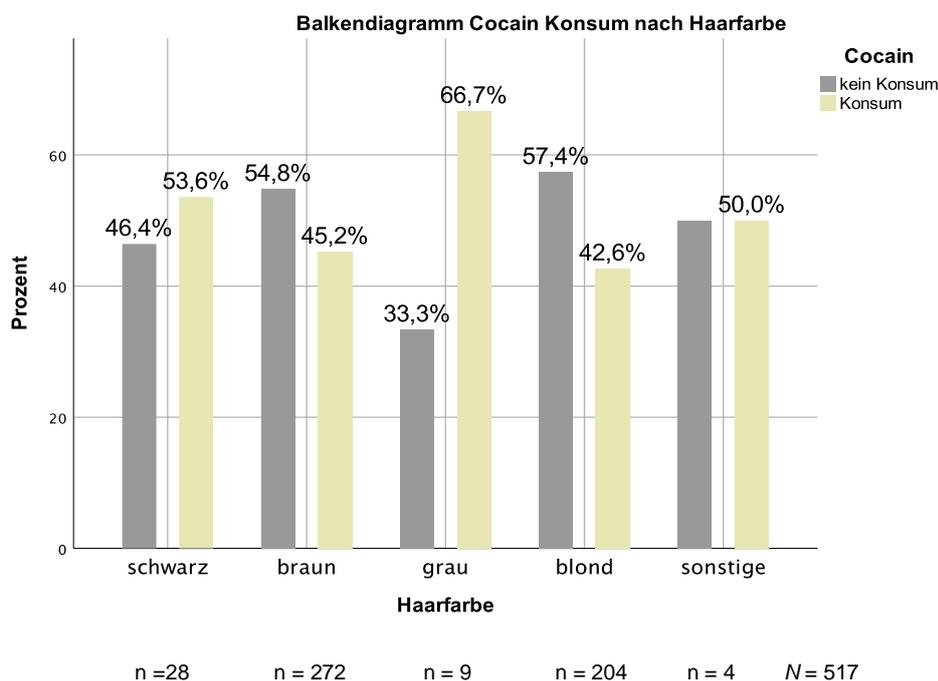


Abbildung 22: Prozentuale Anzahl der Cocain-Analysen sortiert nach Haarfarbe

Quelle: eigene Darstellung

Ein Exakter Test nach Fisher wurde ebenfalls durchgeführt, der ergab, dass die Unterschiede statistisch nicht signifikant waren ( $p = 0,544$ ).

#### 4.7.4. Opiate nach Haarfarbe

Für die Substanzklasse der Opiate wurde ebenfalls eine Kreuztabelle nach Haarfarbe erstellt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 21.

Tabelle 21: Kreuztabelle Opiate nach Haarfarbe

Quelle: eigene Darstellung

		Haarfarbe					Gesamt
		Schwarz	Braun	Grau	Blond	Sonstige	
Kein Konsum	Anzahl	21	225	7	177	4	434
	% von Anlass	67,7	77,1	77,8	81,1	80,0	77,8
Konsum	Anzahl	10	67	2	44	1	124
	% von Anlass	32,2	22,9	22,2	19,9	20,0	22,2
Gesamt	Anzahl	31	292	9	221	5	558
	% von Anlass	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Die Gesamtzahl der Haarproben belief sich auf  $N = 558$ . Insgesamt waren 22,2 % der Haarproben positiv. Der höchste prozentuale Anteil an positiven Proben wurde bei schwarzen Haaren gefunden, jedoch bewegten sich die prozentualen Anteile der positiven Proben bei den anderen Haarfarben in einem ähnlichen Bereich.

Die prozentualen Anteile der positiven Proben nach Haarfarbe zeigt die nachfolgende Abbildung 23.

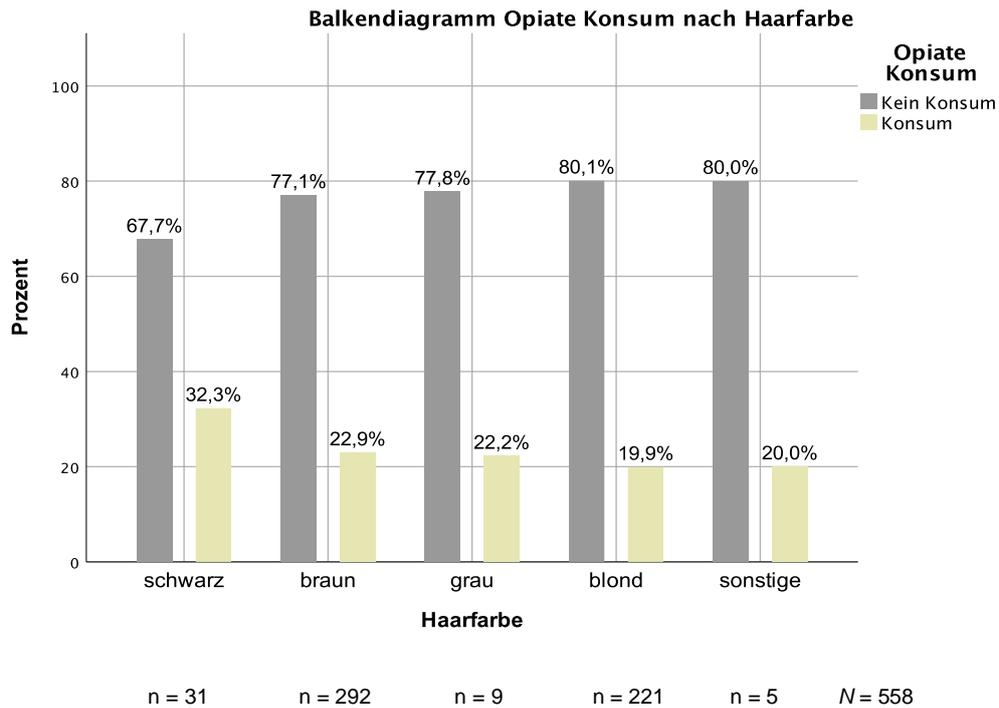


Abbildung 23: Prozentuale Anzahl der Opiat-Analysen sortiert nach Haarfarbe

Quelle: eigene Darstellung

Die Unterschiede zwischen den Haarfarben waren gering und bei einem Exakten Test nach Fisher erwiesen sie sich als statistisch nicht signifikant ( $p = 0,573$ ).

## 5. Diskussion

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden Daten bereits durchgeführter Haaranalysen der letzten 10 Jahre retrospektiv ausgewertet. Hierbei stellte sich die Frage nach der Einschätzung über eine mögliche Korrelation zwischen Haarfarbe und den nachgewiesenen Substanzen. Die Proben stammen vom Institut für Rechtsmedizin der Uniklinik Köln. Dafür wurden Daten von 720 lebenden sowie verstorbenen Personen gesammelt und ausgewertet.

In der vorliegenden Studie wurden in den 720 untersuchten Haarproben unterschiedliche Substanzklassen nachgewiesen. Diese wurden in Cannabinoide, Cocain, Amfetamine und Opiate eingeteilt. Bei diesen handelt es sich um die am häufigsten konsumierten illegalen Substanzklassen. Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei Verstorbenen vergleichsweise hohe Konzentrationen von Cannabinoiden, Opiaten, Cocain und Amfetaminen gefunden werden konnten.

In der vorliegenden Arbeit stellte sich die Forschungsfrage, inwiefern die Haarfarbe ein möglicher limitierender Faktor zur Einlagerung von Substanzen in den Haaren sein könnte. Diese Forschungsfrage wurde basierend auf der Hypothese von Henderson et al. (1998) sowie Gygi et al. (1996) gestellt. Frühere Studien ergaben, dass ein Zusammenhang zwischen der Haarfarbe und der Bindung von Substanzen im Haar bestehen könnte (Henderson et al. 1998; Henderson 1993; Gygi et al. 1996).

Diese Hypothese untersuchten Rollins et al. (2003). Die in der Studie verwendete Substanz war Codein. Rollins et al. (2003) untersuchten die Inkorporation von Codein bei Menschen unterschiedlicher Haarfarben und Ethnien. Dabei fanden sich sechs Personen mit schwarzen Haaren, zwölf Personen mit braunen und acht Personen mit blonden Haaren. Ferner konnten sechs Personen mit roten Haaren in die Studie eingeschlossen werden. Weitere zwölf Personen mit schwarzen Haaren und nicht kaukasischer Ethnie wurden ebenfalls eingeschlossen. Die Versuchspersonen waren zwischen 21 und 40 Jahren alt. Alle Studienteilnehmenden erhielt oral einen Codein-Phosphat-Sirup mit 30 mg Codein, drei Mal täglich über einen Zeitraum von fünf Tagen. 24 Stunden nach Beendigung der Behandlung erhielten die Teilnehmenden erneut eine Dosis Codein. Sowohl die Konzentration von Codein als auch diejenige des Melanins in den Haaren der Studienteilnehmenden wurden ermittelt und ausgewertet.

Rollins et al. (2003) kamen in ihrer Studie zu dem Ergebnis, dass es einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Haarfarbe und der Inkorporation von Codein in die Haare gibt. Es konnte eine starke Korrelation ( $R^2 = 0,73$ ) zwischen der Haarfarbe und der im Haar eingeschlossenen Substanz berechnet werden.

Die vorliegende Arbeit ging dieser Hypothese näher nach und analysierte retrospektiv 720 Haarproben unterschiedlicher Haarfarben. Dafür wurden vier Substanzklassen untersucht: Cannabinoide, Amfetamine, Cocain und Opiate. Als deskriptive Maße galten die Mittelwerte und Mediane sowie die Standardabweichungen. Ferner wurden die 25%- und 75%-Perzentile ermittelt. Die Einheit, in der gemessen wurde, war ng/mg. Hierbei wurde der höchste Median bei den Cannabinoiden gefunden. Die meisten Proben ergaben einen positiven Nachweis auf Cannabinoide (n = 256).

Der häufigste Anlass für eine Haaranalyse war die Prüfung auf eine Fahreignung, gefolgt von einer Anfrage des Jugendamtes. Fast jede fünfte Haarprobe stammte dabei von Verstorbenen. Die geringste Häufigkeit lag beim Anlass Polizei. Lediglich 2,2 % der Haarproben wurden aufgrund polizeilicher Ermittlungen untersucht. Am häufigsten wurden Haare mit brauner Haarfarbe analysiert, gefolgt von blonden Haaren. Am wenigsten häufig waren sonstige Haarfarben, beispielsweise rot.

Bei Verstorbenen (n = 137) war der häufigste Nachweis Cannabinoide, gefolgt von Opiaten. Bei 66 Verstorbenen konnten Amfetamine nachgewiesen werden und bei 69 Verstorbenen waren die Nachweise auf Cocain positiv. Der höchste Mittelwert wurde bei den Verstorbenen bei Cocain gefunden, gefolgt von den Opiaten. Der höchste Median wurde bei der Substanzklasse der Opiate gefunden. Der geringste Median wurde bei den Cannabinoiden berechnet. Die geringe Anzahl an schwarzen, grauen und sonstigen Haarproben erschwerte einen Vergleich erheblich, weitere Forschungen mit einer höheren Anzahl an Haarproben der obig erwähnten Haarfarben wären nötig.

Auch bei den Substanzklassen Cocain und Opiate stellte sich das gleiche Problem der geringen Anzahl an Haarproben von schwarzen, grauen und sonstigen Haaren. Innerhalb der jeweiligen Substanzklassen konnten deshalb keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Haarfarben gefunden werden. Die Hypothese von Rollins et al. (2003) konnte in diesem Fall weder bestätigt noch widerlegt werden. Diese Forschungsfrage konnte aufgrund der vorliegenden Daten demnach nicht beantwortet werden. Die geringe Anzahl an schwarzen, grauen und sonstigen Haarproben stellt dementsprechend eine Limitation der vorliegenden Studie dar.

Eine weitere Limitation zeigten die gruppierten Boxplots (Kapitel 4.5) auf. Die Boxplots zeigen eine massive Streuung der ermittelten Daten mit einer hohen Anzahl an Ausreißern. Ein Vergleich ist daher nicht möglich. Die extrem hohe Streuung lässt keinerlei klare Aussagen über den Einfluss der Haarfarbe auf die Einlagerung der Substanzen im Haar zu. Möglicherweise spielt die Haarfarbe auch keine wesentliche Rolle, dies konnte in der vorliegenden Studie jedoch weder bestätigt, noch widerlegt werden. Weitere Forschungen zu diesem Thema sind nötig, um die Rolle der Haarfarbe bei der Einlagerung von Substanzen zu

genauer zu evaluieren. Die vorliegende Forschungsfrage konnte daher aufgrund geringer Anzahl an Proben bestimmter Haarfarben sowie hoher Streuung der Daten nicht beantwortet werden.

Eine frühere Studie (Kronstrand et al. 1999) weist jedoch ebenfalls auf einen möglichen Zusammenhang zwischen Substanzinkorporation und Haarfarbe hin. Hintergrund dieser Studie war, dass Unterschiede in der Akkumulation von Substanzen in den Haaren unterschiedlicher Farbe und somit ein unterschiedlicher Melanin Gehalt festgestellt wurden. Kronstrand et al. (1999) stellten sich die Frage, ob die Melaninkonzentration im Haar mit der Menge an eingeschlossenen Substanzen korreliert. Hierzu fanden die Autorinnen und Autoren der Studie neun Versuchspersonen, denen sie einmalig Codein verabreichten. 24 Stunden später wurden einige Haare der Teilnehmenden mittels Gaschromatografie auf Codein analysiert.

Kronstrand et al. (1999) kamen in ihrer Studie zu dem Schluss, dass es einen Zusammenhang zwischen der Konzentration an Eumelanin und Codein im Haar gab. Dementsprechend wurde auch für Melanin ein wesentlicher Einfluss auf die Konzentration an inkorporiertem Codein im Haar beschrieben (Kronstrand et al. 1999).

Sowohl bei der Studie von Rollins et al. (2003) als auch bei derjenigen von Kronstrand et al. (1999) ist jedoch kritisch anzumerken, dass lediglich die Substanz Codein getestet wurde. Außerdem war die Anzahl der Versuchspersonen in beiden Studien zu gering ( $n = 44$ , resp.  $n = 9$ ), um repräsentative Aussagen treffen zu können.

Eine weitere Studie (Lee et al. 2010) untersuchte die Menge an inkorporiertem Heroin, Morphin und Codein im Zusammenhang mit dem Melanin Gehalt der Haare. Dabei handelt es sich jedoch um eine Tierversuchsstudie an Ratten. Jedoch konnten Lee et al. (2010) einen Zusammenhang zwischen Melanin Gehalt und der Konzentration an Heroin, Morphin und Codein in den Haaranalysen erkennen. Ebenso fand eine neuere Studie (Yu et al. 2017) einen Zusammenhang zwischen dem Melanin Gehalt der Haare und der Konzentration an inkorporierten Abbauprodukten von Tramadol. Hierbei soll allerdings ebenfalls angemerkt werden, dass es sich um eine Tierversuchsstudie an Ratten handelte. Dennoch stellt sich die Frage, ob dieser Zusammenhang bei menschlichen Haaren ebenfalls besteht.

Ferner wurden, um mögliche Aussagen über das Konsummuster treffen zu können, die Ergebnisse der Haaranalyse zwischen Lebenden und Verstorbenen verglichen. Bei den Verstorbenen zeigten sich höhere Mittelwerte und Mediane für Cocain und Opiate. Daraus könnte unter Umständen geschlossen werden, dass die Verstorbenen einen höheren Opiatkonsum praktizierten als die Gesamtkohorte. Sowohl bei den Opiaten als auch bei Cocain zeigte sich ein deutlich höherer Mittelwert bei den Verstorbenen als in der Gesamtkohorte. Dies könnte tatsächlich ein Hinweis auf das Konsummuster und den

Lebensstil der untersuchten Verstorbenen im Zusammenhang mit deren Todesursache sein. Die Verstorbenen konsumierten demnach deutlich häufiger Cocain und Opiate als die Gesamtkohorte.

Ein weiterer Faktor, der möglicherweise auf Konsummuster und Lebensführung schließen lassen könnte, wäre unter Umständen der Anlass, weshalb Haarproben entnommen und auf Substanzen untersucht wurden. Hierbei zeigten sich in der vorliegenden Arbeit signifikante Unterschiede. Innerhalb der Substanzklasse der Cannabinoide war zu erkennen, dass beim Anlass „Jugendamt“ am häufigsten positiv auf Cannabinoide getestet wurde. Die Einleitung durch das Jugendamt und die Polizei könnte jeweils Hinweise auf regelmäßigen Substanzmissbrauch liefern. Möglicherweise waren die betroffenen Personen den Behörden bereits negativ aufgefallen, weshalb es zu einer Veranlassung der Probeentnahme kam. In diesem Zusammenhang würden die Kriminalakten der betroffenen Personen weiteren Aufschluss über das Konsummuster und die Lebensführung liefern. Die prozentuale Anzahl der positiven Proben unterschieden sich je nach Anlass signifikant, was einen Hinweis darauf liefern kann, dass je nach Grund der Untersuchung ein regelmäßiger Missbrauch vorliegen könnte, insbesondere wenn das Jugendamt eingeschaltet wird.

In der Substanzklasse der Amfetamine wurde von allen Anlässen bei polizeilichen Ermittlungen am häufigsten getestet. Mehr als die Hälfte der positiven Tests wurde auch bei Verstorbenen gefunden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen auch, dass die Testungen auf Amfetamine häufiger bei Verstorbenen positiv ausfielen als innerhalb der Gesamtkohorte. Dass vor allem im Rahmen polizeilicher Ermittlungen Amfetamine in den Haarproben gefunden wurden, könnte darauf hindeuten, dass die Konsumentinnen und Konsumenten bereits straffällig geworden waren und es sich unter Umständen um eine Substanzabhängigkeit handeln könnte.

Ebenso fiel beim Anlass „Jugendamt“ fast die Hälfte der Proben auf Amfetamine positiv aus. Dass das Jugendamt in diesen Fällen eingeschaltet wurde, deutet auf regelmäßigen Konsum und somit eine Gefährdung des Kindeswohls hin. Die Betroffenen waren dem Jugendamt vermutlich schon vorher aufgefallen. Allgemein deuten die Anlässe, bei welchen die meisten positiven Tests gefunden wurden, auf regelmäßige Konsummuster bzw. Substanzmissbrauch hin. Die wenigsten positiven Tests wurden beim Anlass „Fahreignung“ gefunden. Die Unterschiede zwischen den Anlässen waren signifikant.

Bei Cocain fand sich die höchste Rate an positiven Tests beim Anlass „Polizei“. Bei den Verstorbenen fiel mehr als die Hälfte der Proben auf Cocain positiv aus. Auch dies könnte ein Hinweis auf regelmäßigen Substanzabusus sein und unter Umständen sogar auf eine Überdosis als Todesursache hinweisen. Die wenigsten positiven Tests wurden bei den

Anlässen „Fahreignung“ und „Jugendamt“ gefunden. Fast die Hälfte der Tests waren bei „sonstigen“ Anlässen positiv. Die Unterschiede zwischen den Anlässen waren signifikant.

Innerhalb der Substanzklasse der Opiate gab es nur bei den Verstorbenen mehr positive als negative Tests. Mehr als die Hälfte der Testungen auf Opiate fiel beim Anlass „Leiche“ positiv aus. Der hohe Anteil der positiven Tests bei den Verstorbenen deutet nicht nur auf regelmäßigen Konsum, sondern auch auf eine mögliche Überdosis als Todesursache hin. Bei allen anderen Anlässen, außer bei den Verstorbenen, wurden mehr negative als positive Tests auf Opiate gefunden. Beim Anlass „Polizei“ wurden 20 % positive Proben gefunden. Auch dies könnte auf eine bereits delinquente Vergangenheit mit regelmäßigem Substanzkonsum hindeuten. Die Kriminalakte der Betroffenen würde darüber weiteren Aufschluss geben. Auch innerhalb der Substanzklasse der Opiate waren die Unterschiede zwischen den Anlässen signifikant.

Forensische Haaranalysen dienen aktuell vorwiegend zur Bestätigung oder zum Ausschluss des Konsums einer bestimmten Substanz oder mehrerer bestimmter Substanzen (Wilkinson & Gwinnett 2020; Ferreira et al. 2019). Hierbei stellt sich die Frage, ob vom Ergebnis der Haarproben auf das Konsummuster geschlossen werden kann. Drogen und Arzneimittel können unter Umständen nach einmaligem Konsum in den Haaren nachgewiesen werden, dies hängt jedoch von der eingenommenen Dosis und davon ab, welche Substanz konsumiert wurde (Cuypers & Flanagan 2018).

Im Rahmen einer forensischen Haaranalyse gilt es, mehrere Aspekte zu berücksichtigen, wie die Studie von Wilkinson und Gwinnett (2020) sowie von Ferreira et al. (2019) ergaben. So kann das Untersuchungsmaterial inhomogene Eigenschaften aufweisen, denn die Wachstumsphasen eines Haares sind bei jedem Menschen unterschiedlich. Auch die Konzentration und die Verteilung der Substanz im Haar können sich von Mensch zu Mensch unterscheiden, was Rückschlüsse auf das Konsummuster der Betroffenen stark erschwert. Ebenso stellt die chemische Behandlung der Haare einen wichtigen Einflussfaktor dar. Da zahlreiche Faktoren bei der forensischen Haaranalyse wichtige Rollen spielen, lässt sich von der Konzentration der Substanz im Haar im Rahmen der vorliegenden Studie nicht auf das Konsummuster schließen. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch die Studie von Ferreira et al. (2019) wobei die Autorinnen und Autoren betonen, dass es sich um komplexe Zusammenhänge unterschiedlicher Faktoren handelt, die bis heute noch nicht im Detail erforscht sind. Jedoch kann dies mithilfe einer Strafakte, sofern vorhanden, oder im Rahmen polizeilicher Ermittlungen geschehen.

Die vorliegenden Ergebnisse spiegeln die zahlreichen Einflussfaktoren auf die Ergebnisse der Haaranalyse wider. In den vorliegenden Boxplots wurde eine sehr breite Streuung der Daten mit zahlreichen Ausreißern gefunden. Die Ausreißer könnten unter Umständen durch die

individuellen Unterschiede in der Haarbeschaffenheit zustande gekommen sein. Auch war die Anzahl an Proben bestimmter Haarfarben zu gering, um repräsentative Aussagen treffen zu können, was eine Limitation der vorliegenden Studie darstellt. Rückschlüsse auf Konsummuster konnten in der vorliegenden Arbeit nicht gezogen werden. Basierend auf den jeweiligen Anlässen der Untersuchungen konnten Hypothesen zu den Konsummustern aufgestellt werden, die sich jedoch nur durch zusätzliche Informationen wie Grund der polizeilichen Ermittlungen bestätigen oder widerlegen lassen.

Aktuelle Studien deuten darauf hin, dass die forensische Haaranalyse auch Aussagen darüber zulässt, wie häufig die Substanzen konsumiert wurden (Haedener et al. 2021; Salomone et al. 2019; Bolcato et al. 2021; Wilkinson & Gwinnett 2020), allerdings gelang dies in der vorliegenden Arbeit – aufgrund der breiten Streuung der Daten – nicht. Jedoch liefert die Haaranalyse Gewissheit darüber, ob und welche Substanzen konsumiert wurden (Haedener et al. 2021; Salomone et al. 2019; Madea & Musshoff 2004; Bolcato et al. 2021; Wilkinson & Gwinnett 2020). Chronischer Substanzabusus kann jedoch – laut aktuellen Studien – mithilfe der forensischen Haaranalyse nachgewiesen werden (Cuypers & Flanagan 2018; Funes & Bridge 2021; Wilkinson & Gwinnett 2020; Haedener et al. 2021; Salomone et al. 2019).

Cuypers und Flanagan (2021) weisen jedoch darauf hin, dass bei forensischen Haaranalysen eine Vielzahl an Faktoren zu berücksichtigen ist, wenn es darum geht, Rückschlüsse auf das Konsummuster und eventuell chronischen Substanzabusus zu ziehen. Die beiden Autoren betonen, dass neben der forensischen Haaranalyse auch die aktuellen Hintergründe, Lebensumstände, Beweise und Anamnese berücksichtigt werden müssen, wenn es darum geht, Rückschlüsse auf das Konsummuster der Betroffenen zu ziehen. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie deuten ebenfalls darauf hin.

Auch eine mögliche Kontamination kann eine entscheidende Rolle spielen und die Ergebnisse der forensischen Haaranalyse beeinflussen (Salomone et al. 2019; Madea & Musshoff 2004; Bolcato et al. 2021; Cuypers & Flanagan 2021). Die Interpretation der Ergebnisse aus forensischen Haaranalysen stellt bis heute eine große Herausforderung dar (Cuypers & Flanagan 2021; Funes & Bridge 2021; Haedener et al. 2021).

Hierzu beschreibt Kintz (2017) zahlreiche Pitfalls, wenn es darum geht, die Ergebnisse forensischer Haaranalysen zu interpretieren: das individuelle Haarwachstum, der individuelle Stoffwechsel und somit die Menge an in den Haaren eingelagerte Substanzen, der metabolische Abbau der Substanzen, die individuelle Haarstruktur und mögliche Kontaminationen. Alleine von der forensischen Haaranalyse Rückschlüsse auf Konsummuster zu ziehen, stellt bis heute eine große Herausforderung dar (Cuypers & Flanagan 2021; Kintz 2017).

Als weiterer limitierender Faktor in der vorliegenden Studie kam noch hinzu, dass nicht von jeder Probandin oder jedem Probanden Haare von 6 cm Länge entnommen werden konnten. Die Längen der Haarproben variierten zwischen 0,5 und 6 cm, was eine weitere Limitation der vorliegenden Studie darstellt.

So konnten in der vorliegenden Studie keine klaren Rückschlüsse auf die Konsummuster der Betroffenen gezogen werden, allerdings lassen sich aufgrund der Anlässe der Untersuchungen Hinweise finden und Hypothesen aufstellen, die in Zusammenhang mit weiteren Informationen wie Todesursache oder Straftakte ein klares Bild ergeben können. Ferner ergab die Studie von Davies et al. (2020), dass bis heute immer noch eine bedeutende Anzahl an falsch positiven oder falsch negativen Tests im Rahmen der forensischen Haaranalyse auftritt. Bei der Interpretation der Ergebnisse einer forensischen Haaranalyse gilt es daher, zahlreiche unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen (Davies et al. 2020; Cuypers & Flanagan 2021; Kintz 2017).

Infolgedessen sind die Ergebnisse der Haaranalysen als ein Indiz in einem größeren Zusammenhang zu betrachten (Davies et al. 2020; Cuypers & Flanagan 2021). Die forensische Haaranalyse kann dabei helfen, Fälle von Kindesgefährdung, Kriminalfälle oder Todesursachen aufzuklären, sollte jedoch nicht als alleiniges Indiz genommen werden. Erst im Zusammenhang mit weiteren Informationen zu der Person, der Straftakte, der Anamnese, den Zeugen, der möglichen Autopsie bei Verstorbenen usw. ergibt sich ggf. ein klares Bild (Cuypers & Flanagan 2021).

Welche Zusammenhänge jedoch zwischen Haartextur, Haarfarbe und den Ergebnissen der forensischen Haaranalyse bestehen, ist bis heute noch nicht im Detail bekannt (Funes & Bridge 2021). Die vorliegenden Ergebnisse konnten keine Evidenz dafür liefern, dass die Haarfarbe eine Rolle spielen könnte. Jedoch konnte in der vorliegenden Studie nur eine geringe Anzahl an Haarproben bestimmter Haarfarben (schwarz, grau, sonstige) gesammelt werden. Die möglichen Zusammenhänge zwischen Haarfarbe und Inkorporation der Substanzen im Haar sowie Ergebnissen der Haaranalysen könnten in weiteren Studien mit einer ausreichenden Anzahl an Haarproben aller Haarfarben erforscht werden.

## **5.1. Ausblick**

In der vorliegenden Studie konnte keine Evidenz für eine höhere Substanzinkorporation bei dunkleren Haarfarben und somit höherem Melaniningehalt der Haare gefunden werden. Allerdings ist zu erwähnen, dass die geringe Anzahl der Haarproben eine Limitation der Studie darstellt. Auch konnten in der vorliegenden Studie anhand der Konzentrationen keine klaren Rückschlüsse auf bestimmte Konsummuster gezogen werden. Auch diese Fragestellung bedarf noch näherer Forschungen.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass es hinsichtlich der Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit noch weiterer Untersuchungen bedarf.

## 6. Literaturverzeichnis

1. Airlie M, Robertson J, Brooks E. (2021). Forensic hair analysis – Worldwide survey results. *Forensic Sci Int.* 327:110966.
2. Amirav A, Gordin A, Poliak M, Fialkov AB. (2008). Gas chromatography-mass spectrometry with supersonic molecular beams. *J Mass Spectrom.* 43(2):141–63.
3. Andresen-Streichert H, (2018). Haaranalysen-Fortbildung, Uniklinik Köln, Institut für Rechtsmedizin.
4. Baumgartner AM, Jones PF, Baumgartner WA, Black CT. (1979). Radioimmunoassay of hair for determining opiate-abuse histories. *J Nucl Med.* 20(7):748–52.
5. Beauftragter der Bundesregierung für Sucht- und Drogenfragen (2023). Jahresbericht zur Situation illegaler Drogen. Online verfügbar unter: <https://www.bundesdrogenbeauftragter.de/presse/detail/jahresbericht-zur-situation-illegaler-drogen-erschienen/> (abgerufen am 22.06.2023)
6. Bolcato V, Carelli C, Radogna A, Freni F, Moretti M, Morini L. (2021). New Synthetic Cathinones and Phenylethylamine Derivatives Analysis in Hair: A Review. *Molecules.* 26(20):6143.
7. Bundesamt für Justiz online (o. J.). [https://www.gesetze-im-internet.de/gg/art\\_2.html](https://www.gesetze-im-internet.de/gg/art_2.html) (Zuletzt abgerufen am 05.05.2022).
8. Casper, J. L. (1858). *Praktisches Handbuch der Gerichtlichen Medizin*. Edited, Berlin, A. Hirschwald, 1857–1858
9. Cuypers E, Flanagan RJ. (2018). The interpretation of hair analysis for drugs and drug metabolites. *Clin Toxicol (Phila).* 56(2):90–100.
10. Davies C, Gautam L, Grela A, Morrissey J. (2020). Variability associated with interpreting drugs within forensic hair analysis: A three-stage interpretation. *J Appl Toxicol.* 40(7):868–888.
11. Elsässer, S. (2013). *Körperpflege und Kosmetik*. Springer-Verlag.
12. Ferreira C, Paulino C, Quintas A. (2019). Extraction Procedures for Hair Forensic Toxicological Analysis: A Mini-Review. *Chem Res Toxicol.* 32(12):2367–2381.
13. Funes DSH, Bridge C. (2021). Analysis of hair color and texture for forensic examinations. *J Forensic Sci.* 66(2):520–533.
14. Gygi, S. P.; Joseph, R. E., Jr.; Cone, E. J.; Wilkins, D. G., Rollins, D. E. (1996). Incorporation of codeine and metabolites into hair. Role of pigmentation. *Drug Metab Dispos,* 24(4): 495–501.

15. Haedener M, Weinmann W, Eich D, Liebreuz M, Wuethrich T, Buadze A. (2021). Evaluating the reliability of hair analysis in monitoring the compliance of ADHD patients under treatment with LisdexAmfetamine. PLoS One. 16(3):e0248747.
16. Harkey, M. R. (1993). Anatomy and physiology of hair. Forensic Sci. Int. 63:9–18.
17. Henderson, G. L. (1993). Mechanisms of drug incorporation into hair. Forensic Sci Int, 63(1-3): 19–29.
18. Henderson, G. L.; Harkey, M. R.; Zhou, C.; Jones, R. T., Jacob, P. (1998). Incorporation of isotopically labeled cocaine into human hair: race as a factor. J Anal Toxicol, 22(2): 156–65.
19. Herrmann, K., Trinkkeller, U. (2015). Dermatologie und medizinische Kosmetik. Springer-Verlag.
20. Institut für Rechtsmedizin, Allgemeine Arbeitsanweisung, Bestimmung von Amfetamin und Amfetaminderivaten in den Haaren, AM-FT 202, 11.01.2019
21. Institut für Rechtsmedizin, Allgemeine Arbeitsanweisung, Bestimmung von Cannabinoiden in den Haaren, AM-FT 206, 10.05.2016
22. Institut für Rechtsmedizin, Allgemeine Arbeitsanweisung: Probenaufbereitung Haare, AA-FT-104, Uniklinik Köln, Oktober 2018.
23. Institut für Rechtsmedizin, Bestimmung von Opiaten und Cocain in Haaren, Uniklinik Köln, Mai 2020.
24. Institut für Rechtsmedizin, Grenzwerte Analyte GC-MS Amfetamine, Uniklinik Köln, März 2012
25. Institut für Rechtsmedizin, Grenzwerte Analyte GC-MSMS: Methadon, Cocain, Opiate, Cannabinoide, 2017
26. Ito S, Wakamatsu K. (2011). Diversity of human hair pigmentation as studied by chemical analysis of eumelanin and pheomelanin. J Eur Acad Dermatol Venereol. 25(12):1369–80.
27. Kieliba T, Lerch O, Andresen-Streichert H, Rothschild MA, Beike J. Simultaneous quantification of THC-COOH, OH-THC, and further cannabinoids in human hair by gas chromatography-tandem mass spectrometry with electron ionization applying automated sample preparation. Drug Test Anal. 2019 Feb;11(2):267–278.
28. Kilmer B, Pardo B, Pujol TA, Caulkins JP. (2022). Rapid changes in illegally manufactured fentanyl products and prices in the United States. Addiction. 117(10):2745–2749.

29. Kintz P. (2017). Hair Analysis in Forensic Toxicology: An Updated Review with a Special Focus on Pitfalls. *Curr Pharm Des.* 23(36):5480–5486.
30. Koch SL, Tridico SR, Bernard BA, Shriver MD, Jablonski NG. (2020). The biology of human hair: A multidisciplinary review. *Am J Hum Biol.* 32(2):e23316.
31. Kreek MJ, Levran O, Reed B, Schlussman SD, Zhou Y, Butelman ER. (2012). Opiate addiction and cocaine addiction: underlying molecular neurobiology and genetics. *J Clin Invest.* 122(10):3387–93.
32. Kronstrand R, Förstberg-Peterson S, Kågedal B, Ahlner J, Larson G. (1999). Codeine concentration in hair after oral administration is dependent on melanin content. *Clin Chem.* 45(9):1485–94.
33. Lee S, Han E, Kim E, Choi H, Chung H, Oh SM, Yun YM, Jwa SH, Chung KH. (2010). Simultaneous quantification of opiates and effect of pigmentation on its deposition in hair. *Arch Pharm Res.* 33(11):1805–11.
34. Madea, B., Musshoff, F. (2004). *Haaranalytik, Technik und Interpretation in Medizin und Recht*, Deutscher Ärzte-Verlag, 2004.
35. Mantiniaks D, Wright P, Di Rago M, Gerostamoulos D. (2019). A systematic investigation of forensic hair decontamination procedures and their limitations. *Drug Test Anal.* 11(10):1542–1555.
36. Pavan WJ, Sturm RA. (2019). The Genetics of Human Skin and Hair Pigmentation. *Annu Rev Genomics Hum Genet.* 20:41–72.
37. Pozebon D, Scheffler GL, Dressler VL. (2017). Elemental hair analysis: A review of procedures and applications. *Anal Chim Acta.* 992:1–23.
38. Quinn, D. I.; Wodak, A.; Day, R. O (1997). Pharmacokinetic and pharmacodynamic principle of illicit drug use and treatment of illicit drug users. *Clin Pharmacokinet*, 33(5): 344–400.
39. Roberts, N. B., Curtis, S. A., Milan, A. M., Ranganath, L. R. (2015). The Pigment in Alkaptonuria Relationship to Melanin and Other Coloured Substances: A Review of Metabolism, Composition and Chemical Analysis. In: Zschocke, J., Baumgartner, M., Morava, E., Patterson, M., Rahman, S., Peters, V. (eds) *JIMD Reports*, Volume 24. *JIMD Reports*, vol. 24. Springer.
40. Rollins DE, Wilkins DG, Krueger GG, Augsburg MP, Mizuno A, O'Neal C, Borges CR, Slawson MH. (2003). The effect of hair color on the incorporation of codeine into human hair. *J Anal Toxicol.* 27(8):545–51.

41. Rygaard K, Linnet K, Johansen SS. A (2021). Systematic Review of Metabolite-to-Drug Ratios of Pharmaceuticals in Hair for Forensic Investigations. *Metabolites* 11(10):686.
42. Sachs H. (2000). Introduction to Hair Analysis, Progress in Hair Analysis for illegal Drugs, Workshop Proceedings of the International Society of Hair Testing Kreischa.
43. Sachs, H.: (1997). History of hair analysis. *Forensic Sci Int*, 84(1–3): 7–16.
44. Salomone A, Gerace E, Di Corcia D, Alladio E, Vincenti M, Kintz P. (2019). Hair analysis can provide additional information in doping and forensic cases involving clostebol. *Drug Test Anal.* 11(1):95–101.
45. Shah, S.A., Babar, M.E., Irshad, M., Hussain, T. (2018). Oculocutaneous Albinism in Pakistan: A Review. *J. Cancer Sci. Ther.* 10(9):253–257.
46. Shakil M, Harlalka GV, Ali S, Lin S, D'Atri I, Hussain S, Nasir A, Shahzad MA, Ullah MI, Self JE, Baple EL, Crosby AH, Mahmood S. (2019). Tyrosinase (TYR) gene sequencing and literature review reveals recurrent mutations and multiple population founder gene mutations as causative of oculocutaneous albinism (OCA) in Pakistani families. *Eye (Lond)*.33(8):1339–1346.
47. Sturm RA. (2009). Molecular genetics of human pigmentation diversity. *Hum Mol Genet.*18(R1):R9–17.
48. Tully G. (2007). Genotype versus phenotype: human pigmentation. *Forensic Sci Int Genet.* 1(2):105–10.
49. Uhl M, (2000). Interpretation of Quantitative Findings and Data Evaluation in Hair Analyses, Progress in Hair Analysis for illegal Drugs, Workshop Proceedings of the International Society of Hair Testing, Kreischa. 64–65, P. 67.
50. Valente, D.; Cassini, M.; Pigliapochi, M., Vansetti, G. (1981). Hair as the sample in assessing morphine and cocaine addiction. *Clin Chem*, 27(11): 1952–3.
51. Villain, M.; Cirimele, V., Kintz, P. (2004). Hair analysis in toxicology. *Clin Chem Lab Med*, 42(11): 1265–72.
52. Wilkinson L, Gwinnett C. (2020). An international survey into the analysis and interpretation of microscopic hair evidence by forensic hair examiners. *Forensic Sci Int.* 308:110158.
53. Yu H, Jang WJ, Jang JH, Park B, Seo YH, Jeong CH, Lee S. (2017). Role of hair pigmentation in drug incorporation into hair. *Forensic Sci Int.* 281:171–175.

## 7. Anhang

### 7.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau des menschlichen Haares.....	12
Abbildung 2: Haarpapille .....	13
Abbildung 3: Die anatomischen Schichten des menschlichen Haares .....	14
Abbildung 4: Strukturformeln von Eumelanin und Phäomelanin.....	17
Abbildung 5: Synthese-Pathway des Eumelanins und des Phäomelanins im Haarfollikel.....	19
Abbildung 6: Anlass der Haaruntersuchungen in Prozent .....	43
Abbildung 7: Haarfarben der untersuchten Personen in Prozent .....	43
Abbildung 8: Einfacher Boxplot von Cannabinoid-Konzentrationen nach Haarfarbe sortiert.	51
Abbildung 9: Einfacher Boxplot von Amfetamin-Konzentrationen nach Haarfarbe sortiert....	52
Abbildung 10: Einfacher Boxplot von Cocain-Konzentrationen nach Haarfarbe sortiert .....	53
Abbildung 11: Einfacher Boxplot von Opiat-Konzentrationen nach Haarfarbe sortiert.....	54
Abbildung 12: Gruppiertes Boxplot von Cannabinoid-Konzentrationen nach Anlass sortiert.	55
Abbildung 13: Gruppiertes Boxplot von Amfetamin-Konzentrationen nach Anlass sortiert....	56
Abbildung 14: Gruppiertes Boxplot von Cocain-Konzentrationen nach Anlass sortiert .....	57
Abbildung 15: Gruppiertes Boxplot von Opiat-Konzentrationen nach Anlass sortiert.....	58
Abbildung 16: Prozentuale Anzahl der Cannabinoid-Analysen sortiert nach Anlass .....	59
Abbildung 17: Prozentuale Anzahl der Amfetamin-Analysen, sortiert nach Anlass .....	61
Abbildung 18: Prozentuale Anzahl der Cocain-Analysen, sortiert nach Anlass .....	62
Abbildung 19: Prozentuale Anzahl der Opiat-Analysen sortiert nach Anlass .....	63
Abbildung 20: Prozentuale Anzahl der Cannabinoid-Analysen sortiert nach Haarfarbe .....	65
Abbildung 21: Prozentuale Anzahl der Amfetamin-Analysen sortiert nach Haarfarbe .....	66
Abbildung 22: Prozentuale Anzahl der Cocain-Analysen sortiert nach Haarfarbe .....	68
Abbildung 23: Prozentuale Anzahl der Opiat-Analysen sortiert nach Haarfarbe .....	69

## 7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verdünnungslösungen zur Kalibration zum Nachweis von Amfetaminen .....	33
Tabelle 2: Verdünnungstabelle für die Kalibration zum Nachweis von Cannabinoiden .....	34
Tabelle 3: Grenzwerte Amfetamine .....	39
Tabelle 4: Grenzwerte für Cannabinoide .....	39
Tabelle 5: Grenzwerte für Cannabinoide nach AM-FT-206 .....	40
Tabelle 6: Grenzwerte für Cocain und Opiate .....	40
Tabelle 7: Anlass der Haaruntersuchung .....	42
Tabelle 8: Haarfarbe; Verteilung .....	42
Tabelle 9: Deskriptive Statistiken der vier untersuchten Substanzklassen unter Berücksichtigung der Mittelwerte (M), der Standardabweichungen (SD), des Medians und der Perzentile in ng/mg.....	44
Tabelle 10: Deskriptive Statistiken der vier untersuchten Substanzklassen bei Verstorbenen unter Berücksichtigung der Mittelwerte (M), der Standardabweichungen (SD), des Medians und der Perzentile in ng/mg. ....	45
Tabelle 11: Deskriptive Statistiken der vier untersuchten Substanzklassen in Abhängigkeit von der Haarfarbe unter Berücksichtigung der Mittelwerte (M), der Standardabweichungen (SD), des Medians und der Perzentile in ng/mg. ....	46
Tabelle 12: Deskriptive Statistiken der vier untersuchten Substanzklassen bei den Leichen in Abhängigkeit von der Haarfarben unter Berücksichtigung der Mittelwert (M), der Standardabweichungen (SD), des Medians und der Perzentile in ng/mg. ....	48
Tabelle 13: Mittlere Konzentrationen der Substanzen in den Haaren von Verstorbenen in ng/mg.....	50
Tabelle 14: Kreuztabelle Cannabinoide nach Anlass.....	59
Tabelle 15: Kreuztabelle Amfetamine nach Anlass.....	60
Tabelle 16: Kreuztabelle Cocain nach Anlass .....	61
Tabelle 17: Kreuztabelle Opiate nach Anlass.....	62
Tabelle 18: Kreuztabelle Cannabinoide nach Haarfarbe .....	64
Tabelle 19: Kreuztabelle Amfetamine nach Haarfarbe.....	65
Tabelle 20: Kreuztabelle Cocain nach Haarfarbe.....	67
Tabelle 21: Kreuztabelle Opiate nach Haarfarbe .....	68