

**Zuverlässigkeit chemischer Nachweisreaktionen  
in der Verbrechensaufklärung:**

**Die katalytische Wirkung des Eisenkomplexes  
im Hämoglobin im Vergleich zu einfachen Eisen-  
Ionen auf die Chemolumineszenzreaktion von  
Luminol**

Kurs: Chemie LK

Fachlehrerin: Frau Kreutzer

Eingereicht von: Nele Geißler

Datum der Abgabe: 01.04.2022

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	3
1. Einleitung.....	4
2. Grundlagen des menschlichen Blutes.....	5
2.1 Allgemeiner Aufbau von Komplexen.....	5
2.2 Porphyrine – der Ligand des Häms .....	6
2.3 Spezifischer Aufbau des Hämoglobins .....	7
3. Farbigkeit.....	8
3.1 Lichtabsorption konjugierter Systeme.....	8
3.2 Emission .....	9
4. UV/VIS-Spektroskopie .....	10
5. Luminol.....	11
5.1 Geschichte, Anwendung und Synthese.....	11
5.2 Lumineszenz und Chemolumineszenz .....	12
6. Versuch – Blutnachweis durch Luminol im Vergleich zu anderen eisenhaltigen Flüssigkeiten .....	14
6.1 Material .....	14
6.2 Aufbau und Durchführung .....	14
6.3 Beobachtung.....	15
6.4 Auswertung.....	16
6.5 Analyse mittels UV/VIS-Spektrometer .....	19
7. Fazit.....	20
8. Anhang .....	22
9. Literaturverzeichnis.....	26
9.1 Primärliteratur.....	26
9.2 Sekundärliteratur .....	27
9.3 Abbildungsquellen .....	28
10. Selbstständigkeitserklärung .....	29

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Strukturformel eines Häms.....	7
Abb. 2: Mechanismus der Farbigkeit.....	9
Abb. 3: Allgemeiner Aufbau eines UV/VIS-Spektrometers.....	11
Abb. 4: Synthese von Luminol.....	12
Abb. 5: Elektronenübertragung in verschiedene Energieniveaus .....	13
Abb. 6: Vergleich der Intensität des Leuchtens der Proben.....	15
Abb. 7: Abspaltung der Protonen.....	16
Abb. 8: Oxidation der Stickstoffatome.....	16
Abb. 9: Nucleophiler Angriff und Dreiringbildung unter Abspaltung von Stickstoff.....	17
Abb. 10: Umklappen der Bindungen und Bildung eines angeregten Dianions.....	18
Abb. 11: Graphen der analysierten Proben.....	20

# 1. Einleitung

Im Jahr 2020 konnten in Deutschland 93,5% der Mordfälle durch die Polizei aufgeklärt werden.<sup>1</sup> Dieser hohe Wert lässt sich unter anderem durch die Anwendung chemischer Analyseverfahren an Fund- und Tatorten erzielen. Die gängigste Methode zur Feststellung von Blutspuren ist der chemische Blutnachweis durch Luminol, welcher durch zahlreiche Serien wie „CSI und Tatort“ auch in der breiten Bevölkerung populär wurde. Nachdem die Ermittler den zunächst mutmaßlichen Tatort mit einer farblosen Flüssigkeit einsprühen, beginnen zuvor unsichtbare Blutspuren in blauem Licht zu leuchten: man hat ein Indiz, eine Spur.

In der Forensik wird die katalytische Wirkung des Eisenkomplexes Häm im Hämoglobin des menschlichen Blutes genutzt, um Blutspuren nachzuweisen. Kurz vor der Anwendung wird in Natronlauge gelöstes Luminol (3-Aminophthalsäurehydrazid), eine 1,4-Dicarbonylverbindung, mit dem Oxidationsmittel Wasserstoffperoxid vermischt. Anschließend wird die Lösung auf den abgedunkelten Tatort gesprüht. Falls alte oder weggewischte Blutspuren vorhanden sind, beginnen diese zu leuchten. Der Eisenkomplex Häm des Blutes katalysiert die Reaktion der zusammengegebenen Stoffe unter Emission von blauem Licht, sogenannter Chemolumineszenz. Die Blutspuren leuchten für wenige Sekunden, sodass sie für das menschliche Auge sichtbar werden. Nachdem die Blutspuren durch Luminol nachgewiesen wurden, können schließlich weitere Ermittlungen in die Wege geleitet werden.

Der Blutnachweis durch Luminol zeigt eine hohe Sensitivität. Wenn Blut vorhanden ist, ist der Test mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit positiv, was durch das Leuchten der Blutspuren zu erkennen ist. Hierzu reichen bereits geringe Mengen an Blut, wie zum Beispiel in Urin oder anderen Körperflüssigkeiten. Allerdings gilt die Reaktion als nicht sehr spezifisch, da neben Blut auch andere Stoffe zu einer Chemolumineszenzreaktion mit Luminol führen können.<sup>2</sup>

Mein Interesse an dem Thema des forensischen Blutnachweises mithilfe der Luminol-Reaktion war geweckt, als ich mir als True-Crime Fan Gedanken darüber machte, ob man einen Tatort mit Stoffen verunreinigen kann, die die Reaktion ebenfalls katalysieren. Demzufolge würde es zu einem ganzheitlichen Leuchten des Tatortes kommen. Daraus

---

<sup>1</sup> Rudnicka. „Polizeiliche Aufklärungsquote bei Mord in Deutschland“. Statista. 03.01.2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152525/umfrage/entwicklung-der-polizeilichen-aufklaerungsquote-bei-mord-seit-1995/>

<sup>2</sup> Hehner, Klaus. *Visualisierung optisch nicht erfaßbarer Blutkontaminationen mit Hilfe der Chemolumineszenz*. Bonn: Promotionsarbeit. 1992, S. 27-29 (im Folgenden zitiert als: Hehner, *Visualisierung nicht erfaßbarer Blutkontaminationen*)

habe ich die Leitfrage entwickelt, ob ausschließlich komplexgebundene Eisen-Ionen die Reaktion katalysieren, oder ob einfache Eisen-Ionen, wie sie zum Beispiel in eisenhaltigem (Trink-) Wasser enthalten sind, ähnliche Eigenschaften aufweisen.

In dieser Facharbeit wird die Zuverlässigkeit der benannten chemischen Nachweisreaktion in der Verbrechensaufklärung überprüft und erforscht. Heutzutage ist der Reaktionsmechanismus der Luminol-Reaktion noch nicht vollständig untersucht. Es werden zwei weitgehend eruierte Mechanismen diskutiert<sup>3</sup>, von welchen der Populärste im Folgenden behandelt und erklärt wird.

## 2. Grundlagen des menschlichen Blutes

Blut macht etwa 8% des Körpergewichtes eines Menschen aus.<sup>4</sup> Es spielt bei dem Transport von Sauerstoff und anderen lebenswichtigen Stoffen im menschlichen Körper eine zentrale Rolle.

Seine Farbe erhält das Blut durch den Proteinkomplex Hämoglobin, welcher sich aus dem Naturfarbstoff Häm und dem Protein Globin zusammensetzt. Das Protein ist in den Erythrozyten, den roten Blutkörperchen zu finden. Die Aufgabe des Eiweißkomplexes ist es, den eingeatmeten Sauerstoff mit Hilfe von Eisen-Ionen zu binden und von der Lunge in weitere Teile des Körpers zu transportieren. Ein Kubikmillimeter Blut enthält 250 Millionen Hämoglobin-Moleküle.<sup>5</sup>

Da viele Verbrechen mit einem Blutverlust einhergehen, überführt das Blut häufig Täter nach Mordtaten oder anderen schwerwiegenden Verbrechen.

### 2.1 Allgemeiner Aufbau von Komplexen

Der Naturfarbstoff Häm ist ein Eisenkomplex. In Komplexverbindungen, kurz Komplexen, ist ein Zentralatom von Liganden komplexiert. Das Zentralatom, welches sich in der Mitte befindet, ist meist ein Metall-Ion. An dieses sind die Liganden koordiniert, welche Ionen oder Moleküle sind, die ein freies Elektronenpaar für die koordinative Bindung an

---

<sup>3</sup> Hans-Dieter Gross. *Experimentalvortrag 2: Exoten der Chemie –Chemolumineszenzreaktionen*. 1985, S. 13

<sup>4</sup> Förster. „Blutmenge“. *Grossesblutbild*. 22.01.2022. [https://www.grossesblutbild.de/wie-viel-blut-hat-ein-mensch.html#Erwachsene\\_besitzen\\_im\\_Durchschnitt\\_5\\_bis\\_8\\_Liter\\_Blut](https://www.grossesblutbild.de/wie-viel-blut-hat-ein-mensch.html#Erwachsene_besitzen_im_Durchschnitt_5_bis_8_Liter_Blut)

<sup>5</sup> Binnewies, Michael et al. *Allgemeine und Anorganische Chemie*. Heidelberg: Springer Spektrum. 2. Aufl. 2011, S. 697 f. (im Folgenden zitiert als: Binnewies, *Allg. u. Anorg. Chemie*)

das Zentralatom bereitstellen. Aufgrund dessen sind diese Verbindungen unter dem Namen Koordinationsverbindungen bekannt.<sup>6, 7</sup>

Eine Komplexverbindung, mit einem mehrzähligen Liganden wird als Chelatkomplex bezeichnet. Dieser besetzt zwei oder mehr Koordinationsstellen des Zentralatoms. Durch diese mehrfache Bindung sind Chelatkomplexe besonders stabil.<sup>8</sup>

## 2.2 Porphyrine – der Ligand des Häm

Porphyryne sind organisch-chemische Verbindungen, die für ihre Beständigkeit bekannt sind. Sie bestehen aus vier über Methin-Brücken (-CH=) verbundene Pyrrol-Ringen. In dem Ringsystem liegen abwechselnd Doppel- und Einfachbindungen vor, sogenannte konjugierte Doppelbindungen. Porphyrine besitzen 26  $\pi$ -Elektronen dieser Doppelbindungen, von denen 18  $\pi$ -Elektronen ein vollständig konjugiertes  $\pi$ -System bilden. Generell sind die Moleküle bis auf die NH-Bindungen planar. Diese liegen nicht auf der Ringebene, sondern sind in entgegengesetzte (trans) Richtungen gebogen.<sup>9</sup>

Unter einem planaren Molekül versteht man ein Molekül, in dem alle Atomkerne der Atome auf einer Ebene liegen. Umgangssprachlich ist es auch als „flach“ zu bezeichnen.

Die Anzahl der  $\pi$ -Elektronen entsprechen für  $n=4$  und  $n=6$  jeweils der Hückel-Regel. Entspricht die Anzahl der  $\pi$ -Elektronen eines planaren Ringsystems der Formel „ $4n+2$ “, dann gilt dieses Molekül aufgrund seiner Konstruktion als besonders stabil.<sup>10</sup>

Die Delokalisierung der  $\pi$ -Elektronen führt zu einer Veränderung des Energieniveaus. Die Energiedifferenzen der Energieniveaus liegen im Wellenlängenbereich von bläulichem Licht. Aufgrund dessen kann bläuliches Licht durch Anregung von Elektronen absorbiert werden, sodass die Komplementärfarbe rot für das Auge sichtbar wird und das Blut seine rote Farbe erhält. Somit ist der Porphyrin-Ligand der entscheidende Faktor für die Farbe des Blutes (siehe 3. Farbigkeit).

---

<sup>6</sup> Binnewies, *Allg. u. Anorg. Chemie*, S. 279 f.

<sup>7</sup> Latscha, Hans Peter und Helmut Alfons Klein. *Organische Chemie. Chemie – Basiswissen II*. Heidelberg: Springer-Lehrbuch. 2. Aufl. 1990, S. 118

<sup>8</sup> Schunk, Axel, et al. „Metallkomplexe“. Chemgapedia. 23.03.2022. <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/4/cm/komplexe.vlu/Page/vsc/de/ch/4/cm/komplexe/chelateffekt.vscml.html>

<sup>9</sup> Weiß, Dieter, Eric Täuscher und Herbert Brandl. „Die bunte Welt der Porphyrine.“ *Chemie in unserer Zeit* 52, 19.04.2018: S. 12-21, S. 12 f.

<sup>10</sup> Latscha, Hans Peter und Helmut Alfons Klein. *Anorganische Chemie. Chemie – Basiswissen I*. Heidelberg: Springer-Lehrbuch. 4. Aufl. 1990, S. 93

## 2.3 Spezifischer Aufbau des Hämoglobins

Das Grundgerüst des Häms bildet ein Porphyrin-Ring als Ligand, in dessen Mitte ein Eisen(II)-Ion als Zentralatom über vier Stickstoffatome komplexiert ist. Somit ist es ein stabiler Chelatkomplex, wobei das Porphyrin-Molekül der mehrzählige Ligand (Chelat-Ligand) ist. Hinsichtlich der räumlichen Anordnung spricht man beim Häm von einem quadratisch-planaren Komplex.

Die eisenfreie Form des Häms ist das Protoporphyrin IX. In den Protoporphyrin-Ring, den Liganden, wird durch das Enzym Ferrochelatase die Einführung des zweiwertigen Eisen-Ions katalysiert.

Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, besitzt das Eisen-Ion sechs mögliche Koordinationsstellen, von denen vier durch die Stickstoffatome abgesättigt sind. Die fünfte Bindungsstelle dieses Eisen-Ions wird von dem Protein Globin besetzt, sodass die sechste Bindungsstelle für den zu transportierenden Sauerstoff zur Verfügung steht. Durch die Bindung an das Globin ergibt sich das Hämoglobin des Blutes.<sup>11</sup>

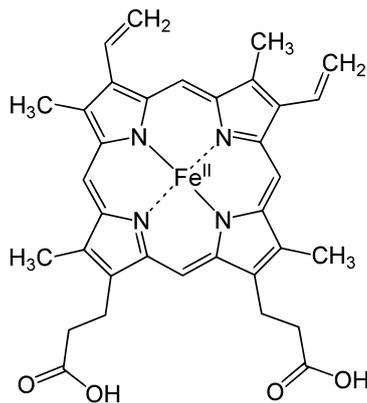


Abb. 1: Strukturformel eines Häms<sup>12</sup>

Durch die Oxidation des zweifach positiv geladenen Eisen(II)-Ions zu einem Eisen(III)-Ion, entsteht Methämoglobin. Diese Reaktion erfolgt bei Vergiftungen, zum Beispiel durch Wasserstoffperoxid. Das Derivat des Hämoglobins kann Sauerstoff zwar aufnehmen, jedoch vermag die Abgabe nicht zu erfolgen. Der Körper kann letztendlich nicht mehr ausreichend mit Sauerstoff versorgt werden.<sup>13</sup>

<sup>11</sup> Horn, Florian et al. *Biochemie des Menschen. Das Lehrbuch für das Medizinstudium*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag. 2. Auflage. 2003, S. 587 f., S. 657 f.

<sup>12</sup> Yikrazuul. „Häm b“. chemie-schule. 12.02.2022. [https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Da-tei:Heme\\_b.svg](https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Da-tei:Heme_b.svg)

<sup>13</sup> Müller-Esterl, Werner et al. *Biochemie. Eine Einführung für Mediziner und Naturwissenschaftler*. Heidelberg: Springer Spektrum. 2. Aufl. 2011, S. 485

## 3. Farbigkeit

### 3.1 Lichtabsorption konjugierter Systeme

Das im Hämoglobin enthaltene Häm ist ein Naturfarbstoff. Farbstoffe können elektromagnetische Strahlung, also Licht, im sichtbaren Bereich absorbieren und die restlichen Wellenlängen reflektieren, sodass die Farbe für den Menschen sichtbar wird. Ursache für die Lichtabsorption im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums sind konjugierte Doppelbindungen, die ein konjugiertes System bilden.<sup>14</sup>

Farbstoffmoleküle sind organische Verbindungen, welche  $\pi$ -Elektronen besitzen. Diese Elektronen liegen delokalisiert im Molekül vor, sie sind also frei beweglich und nicht einem bestimmten Atom zugeordnet. Zusammen bilden sie ein System aus konjugierten Doppelbindungen. Konjugierte Doppelbindungen entstehen durch eine alternierende Anordnung von Einfach- und C=C Doppelbindungen. Diese Doppelbindungen können in einer „Kettenreaktion“ umklappen. Sobald eine Doppelbindung sich umlegt, verrücken sich auf Grund der Bindigkeit von Kohlenstoff die anderen Doppelbindungen. Einige funktionelle Gruppen mit Mehrfachbindungen werden als *Chromophore* bezeichnet und sind dementsprechend für die Farbigkeit eines Moleküls verantwortlich.<sup>15</sup> Eine Visualisierung des beschriebenen Phänomens erfolgt für gewöhnlich durch mesomere Grenzformeln, durch welche die Darstellung der verschobenen Bindungen gewährleistet wird.<sup>16</sup>

Weißes Licht, worunter auch Tageslicht fällt, umfasst Licht im sichtbaren Bereich mit verschiedensten Wellenlängen von 380 bis 780 nm. Dies entspricht dem Lichtspektrum von violett bis rot. Das Licht regt die  $\pi$ -Elektronen in konjugierten Systemen an und wird von diesen absorbiert, umgangssprachlich „verschluckt“. Die Wellenlängen des Lichts, die nicht absorbiert werden, werden reflektiert, also „zurückgestrahlt“ und ergeben die sichtbare Komplementärfarbe der absorbierten Wellenlänge (vgl. Abb. 2).

Die Größe des delokalisierten  $\pi$ -System bestimmt somit, welche Wellenlängen absorbiert werden. Allgemein gilt: je mehr  $\pi$ -Elektronen in einem Molekül ein konjugiertes System bilden, desto weniger Energie wird benötigt, um diese anzuregen. Folglich wird zur Anregung weniger  $\pi$ -Elektronen energiereichere Strahlung in Form von kurzwelligem

---

<sup>14</sup> Latscha, Hans Peter und Helmut Alfons Klein. *Organische Chemie. Chemie – Basiswissen II*. Heidelberg: Springer-Lehrbuch. 2. Aufl. 1990, S. 559 f.

<sup>15</sup> Kraft, Oliver. „Konjugierte Doppelbindungen“. about medication. 29.01.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=7XTCi5wMkxI>

<sup>16</sup> Lautenschläger, Karl-Heinz et al. *Chemie. Nachschlagewörter für Grundlagenwissen*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag. 2. Aufl. 1965, S. 426

Licht vorausgesetzt. Wenn viele  $\pi$ -Elektronen in einem Molekül vorhanden sind, reicht langwellige, energiearme Strahlung, um die delokalisierten Elektronen anzuregen. Ein Teil der Wellenlängen wird von den  $\pi$ -Elektronen ihrer Anzahl entsprechend absorbiert und verbleibende Wellenlängen werden reflektiert.<sup>17</sup>

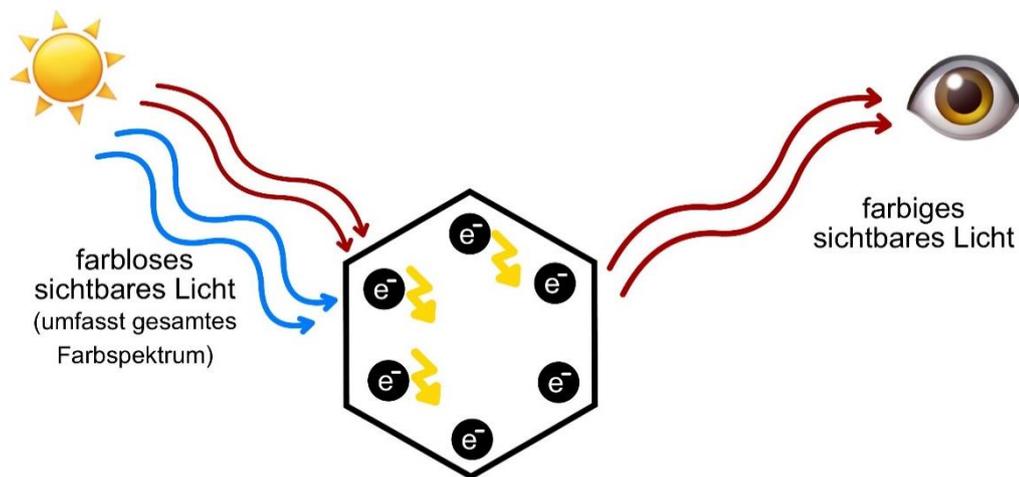


Abb. 2: Mechanismus der Farbigkeit<sup>18</sup>

In der Abbildung ist vereinfacht das weiße Licht, welches dem Menschen als farblos erscheint, dargestellt. Es umfasst Anteile von allen Wellenlängen des gesamten Spektrums. Zum Zweck der Visualisierung wurden nur das blaue Licht, welches absorbiert wird und das rote Licht dargestellt.

### 3.2 Emission

Bei der Absorption von Licht werden Elektronen durch die Aufnahme von Energie in einen höheren energetischen Zustand versetzt. Wenn diese angeregten Teilchen wieder in ihren Grundzustand zurückkehren, geben sie Energie in Form von Licht ab. Man spricht von der Emission von Licht. Bei der Chemolumineszenzreaktion von Luminol beträgt die Wellenlänge des Lichts, welches emittiert wird, ca. 420 nm.<sup>19</sup>

<sup>17</sup> Dücker, Simon. „Farbstoffe und Farbigkeit“. abiweb. 31.01.2022. <https://www.abiweb.de/chemie-forschung-aromaten-farbstoffe-nordrhein-westfalen-nrw/farbstoffe-und-farbigkeit.html>

<sup>18</sup> verändert nach: Schork, Nicolai. „Wie funktioniert das mit der Farbigkeit“. 23.02.2022. Chemie-Simpleclub. <https://www.youtube.com/watch?v=k-Uggf3RkY>

<sup>19</sup> Henkel, Sarah. *Wissenschaftliche Hausarbeit im Fach Chemie: Ein Experimentierkasten zum Thema Lumineszenz*. 2011, S. 29 f. (im Folgenden zitiert als: Henkel, *Experimentalkasten Lumineszenz*)

## 4. UV/VIS-Spektroskopie

Um optische Übergänge von Elektronen in verschiedene Energieniveaus zu visualisieren, werden diese Vorgänge in der Wissenschaft mit Hilfe von Spektrometern aufgezeichnet. Zur Analyse einer Probe wird die zu analysierende Lösung in eine Küvette, welche im Spektrometer platziert wird, gefüllt. Mit Hilfe von Licht werden die organischen Moleküle je nach Energie unterschiedlich angeregt. Das Spektrometer stellt infolgedessen die Intensität der Absorption in den verschiedenen Spektralbereichen dar. Somit dient die Spektroskopie der quantitativen Analyse von Chemikalien.<sup>20</sup>

Diese Wechselwirkungen und Zusammenhänge von elektromagnetischer Strahlung und anregungsfähigen Elektronensystemen in Molekülen können mit Hilfe eines UV/VIS-Spektrometers aufgezeichnet und analysiert werden. Die Stärke der Absorption des Lichts (Absorbance (OD); y-Achse), welche die optische Dichte einer Chemikalie beschreibt, wird in Abhängigkeit zu der Wellenlänge (Wavelength (nm); x-Achse) dargestellt. Strahlungen im ultravioletten Bereich (UV) von 200-400 nm werden anhand der UV-Spektroskopie erfasst, wohingegen die VIS-Spektroskopie bei Wellenlängen von 400-800 nm des sichtbaren Bereichs (VIS) eingesetzt wird.<sup>21</sup>

Wie in der Abbildung gezeigt, ist das UV/VIS-Spektrometer wie folgendermaßen aufgebaut: Eine UV/VIS-Lichtquelle sendet einen Lichtstrahl zu einem drehbaren Monochromator. In diesem wird das einfallende Licht hinsichtlich seiner Wellenlänge isoliert und geordnet, bevor es zu einem Spalt weitergeleitet wird. Durch diesen gelangt es durch die Küvette, in welcher sich die Probe befindet, zur empfangenden Fozelle. Dort werden die Wellenlängen, die nicht absorbiert wurden, analysiert und man erhält den ausgewerteten Graphen auf einem Computerbildschirm.

---

<sup>20</sup> Wörfel, et al. „UV/VIS-Spektroskopie“. Springer Link. 20.02.2022. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-6162-5\\_13](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-6162-5_13)

<sup>21</sup> Arnold, Karin et al. *Chemie Oberstufe Gesamtband*. Berlin: Cornelsen Verlag. 1. Aufl. 2019, S. 294 f.

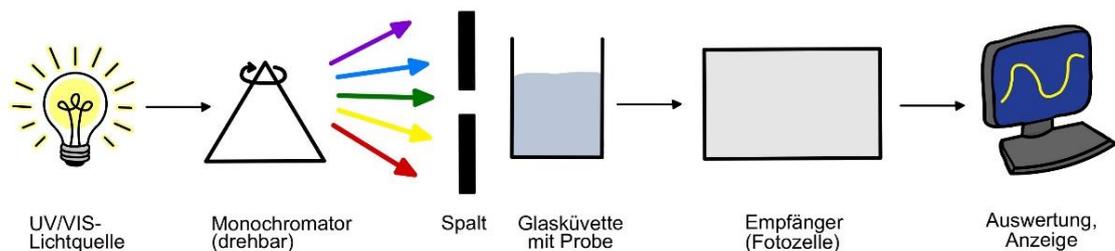


Abb. 3: Allgemeiner Aufbau eines UV/VIS-Spektrometers<sup>22</sup>

Je nach analysierter Verbindung und seiner Konzentration, ergibt sich ein mehr oder weniger charakteristischer Graph in einem Koordinatensystem, welches sich aus den beschriebenen Achsen zusammensetzt. In den häufigsten Fällen muss jedoch vor der Hauptanalyse zunächst eine Küvette inklusive des Lösemittels, in dem die zu analysierende Verbindung gelöst ist, aufgezeichnet werden. Dadurch erfolgt die Berücksichtigung der wellenlängenabhängigen Absorption des Lösemittels. Nach der Kalibrierung kann die eigentliche Analyse erfolgen.<sup>23</sup>

## 5. Luminol

### 5.1 Geschichte, Anwendung und Synthese

Die Chemolumineszenzreaktion des Stoffes Luminol ( $C_8H_7N_3O_2$ ), auch geläufig als 3-Aminophtalhydrazid, wurde 1928 durch H. H. Albrecht publiziert. Seit 1937 findet diese Nachweisreaktion in der gerichtlichen Medizin Anwendung.

Der gelbliche Feststoff wird vor seiner Verwendung in einem alkalischen Milieu, meist Natronlauge, gelöst.<sup>24</sup> Kurz vor dem Gebrauch wird Wasserstoffperoxid zu der Lösung hinzugegeben und anschließend auf den durch Blut verunreinigten Tatort gesprüht. Das Luminol wird durch das Wasserstoffperoxid unter Emission von blauem Licht (Chemolumineszenz) oxidiert, sobald es mit einem Katalysator in Kontakt kommt. Bei dem

<sup>22</sup> verändert nach: „Spektroskopische Analysemethoden“. lernhelfer.de. 22.02.2022. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie-abitur/artikel/spektroskopische-analysemethoden-uv-vis-spektroskopie-und>

<sup>23</sup> „Spektroskopische Analysemethoden“. lernhelfer.de. 22.02.2022. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie-abitur/artikel/spektroskopische-analysemethoden-uv-vis-spektroskopie-und#>

<sup>24</sup> Hehner, *Visualisierung nicht erfaßbarer Blutkontaminationen*, S. 42 f.

forensischen Blutnachweis katalysiert der Eisenkomplex Häm in den Blutspuren die Reaktion, sodass diese zu leuchten beginnen.<sup>25</sup>

Um Luminol zu synthetisieren wird Phthalsäure mit Nitriersäure, einem Gemisch aus konzentrierter Salpetersäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) und konzentrierter Schwefelsäure (HNO<sub>3</sub>), zu 3-Nitrophthalsäure überführt. Durch die Reaktion mit Hydrazinhydrat (H<sub>2</sub>NNH<sub>2</sub>) erfolgt der Ringschluss und das cyclische Hydrazid III wird gebildet. Im letzten Schritt findet die Reduktion durch Natriumdithionit (H<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) statt, sodass Luminol entsteht.<sup>26</sup>

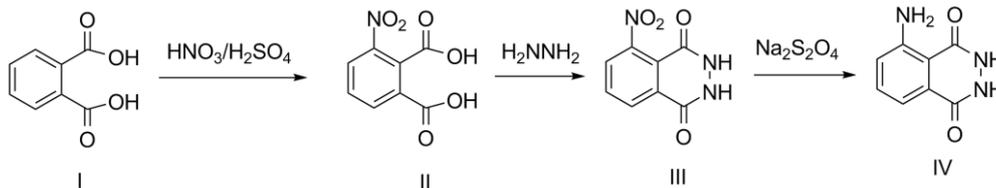


Abb. 4: Synthese von Luminol<sup>27</sup>

## 5.2 Lumineszenz und Chemolumineszenz

Geht ein physikalisches System von einem elektronisch angeregten Zustand in seinen Grundzustand über, wird elektromagnetische Strahlung (Emission) in Form von Licht abgegeben. Als Grundzustand wird der energieärmste Zustand eines Moleküls bezeichnet, wohingegen der erste angeregte Zustand eine höhere Energie als der Grundzustand aufweist. Zuvor aufgenommene Energie wird beim Wechsel in einen energieärmeren Zustand in Form von Licht abgegeben. Diese Energieaufnahme der Elektronen in den Molekülen erfolgt bei der Chemolumineszenz (CL) durch eine chemische Reaktionen.<sup>28</sup>

Im Fall der Luminol-Reaktion handelt es sich um Singulett-Zustände. Der Grundzustand wird als S<sub>0</sub> und der angeregte Zustand als S<sub>1</sub> bezeichnet.

<sup>25</sup> Hehner, Visualisierung nicht erfaßbarer Blutkontaminationen, S. 27-29

<sup>26</sup> Weiss, Dieter. „Chemielumineszenz mit Luminol“. Uni-Jena. 22.01.2022. <http://www.chemie.uni-jena.de/institute/oc/weiss/Luminol.htm>

<sup>27</sup> Weiss, Dieter. „Chemielumineszenz mit Luminol“. Uni-Jena. 22.01.2022. <http://www.chemie.uni-jena.de/institute/oc/weiss/bilderN/Luminolsynthese.png>

<sup>28</sup> Binnewies, *Allg. u. Anorg. Chemie*, S. 820, S. 822, S. 824

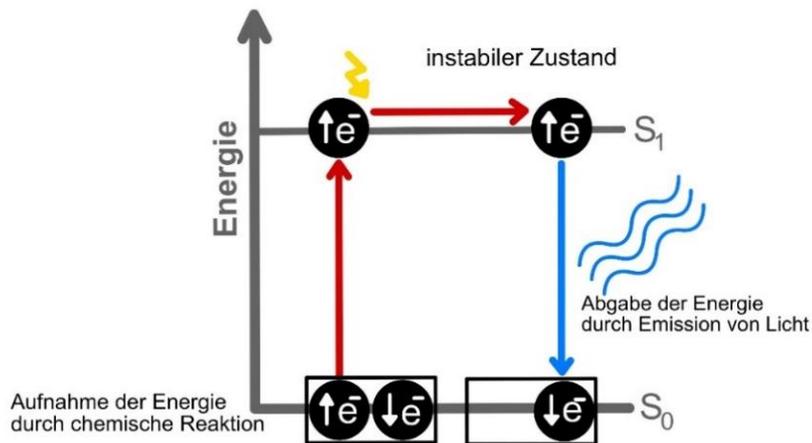


Abb. 5: Elektronenübergang in verschiedene Energieniveaus<sup>29</sup>

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, nehmen die Elektronen in den Molekülen die Energie, die durch eine chemische Reaktion herbeigeführt wurde, auf, wodurch sie von ihrem Grundzustand ( $S_0$ ) in einen energetisch höheren Zustand ( $S_1$ ) angeregt werden. Das Elektron, welches die Energie aufgenommen hat, befindet sich somit in einem anderen Energieniveau. Aufgrund der Instabilität dieses Zustandes, erfolgt erneut ein Übergang der Elektronen zurück in ihren  $S_0$ -Zustand. Dabei wird die restliche Energie in Form von Lichtemission abgegeben.<sup>30, 31</sup>

Für das Auftreten der Chemolumineszenz gibt es gewisse Voraussetzungen, die eingehalten werden müssen, um das chemische Leuchten zu erzielen. Damit ein Molekül Licht im sichtbaren Bereich emittieren kann, ist eine Anregungsenergie von 168-294 kJ/mol erforderlich. Zudem müssen Moleküle vorliegen, die sich leicht in einen angeregten Zustand überführen lassen, wie beispielsweise die oxidierte Form des Luminols. Des Weiteren ist die Grundlage für besagte Reaktion eine möglichst hohe Chemolumineszenz-Quantenausbeute. Es wird folglich eine hohe Anzahl der emittierten Lichtquanten (Photonen) pro reagierendem Molekül vorausgesetzt.<sup>32, 33</sup>

<sup>29</sup> verändert nach: Steindorf, Lisa, et al. „Die Kraft des Leuchtens“. DGZfP. 16.01.2022. <https://www.dgzfp.de/Portals/24/IZ/PDF/Jugend%20forscht/RW%20Nordhausen%202018.pdf?ver=2018-04-09-153303-900>

<sup>30</sup> Dörfler, Andreas. „Chemolumineszenz“. Uni Bayreuth. 04.03.2022. <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/chemolumineszenz/Chemolumineszenz.pdf>

<sup>31</sup> Rieger, Katharina. „Blutspuren“. Investikativ. 04.03.2022. <https://www.investikat-iv.de/von-wegen-wisch-und-weg-blutspuren/>

<sup>32</sup> Hans-Dieter Gross. *Experimentalvortrag 2: Exoten der Chemie – Chemolumineszenzreaktionen*. 1985, S. 4 f.

<sup>33</sup> Albrecht, Steffen, Herbert Brandl und Waldemar Adam. „Chemilumineszenz-Reaktionen. Anwendungen in der klinischen Chemie, Biochemie und Medizin.“ *Chemie in unserer Zeit* 24. Jargh. 1990: S. 228-237, S. 228-230

Bei der Oxidation von Luminol durch Wasserstoffperoxid wird Licht mit einer Wellenlänge von 420 nm emittiert.

Des Weiteren findet die Chemolumineszenz in Cyalume-Leuchtstäben, sogenannten Knicklichtern, Verwendung.<sup>34</sup>

## 6. Versuch – Blutnachweis durch Luminol im Vergleich zu anderen eisenhaltigen Flüssigkeiten

### 6.1 Material

10 ml Pipetten, Schutzbrille, destilliertes Wasser, Luminol, 3% Wasserstoffperoxid-Lösung, Natriumcarbonat, Schweineblut, Kaliumhexacyanoferrat (III), eisenhaltiges Brunnenwasser, Eisen(III)-chlorid, UV/VIS-Spektrometer, Küvette, Computer.

### 6.2 Aufbau und Durchführung

Die Maß- und Mengenangaben orientieren sich an einem Vorschlag des X-Labs der Universität Göttingen. Durchführung und weiterführendes Experimentieren stammen aus eigener Hand.

Zuerst erfolgt die Herstellung der Basislösungen von Luminol, Kaliumhexacyanoferrat (III) und Wasserstoffperoxid. Dafür werden 50 mg Luminol in 2,5 ml Natronlauge ( $c = 2$  mol/L; selbstangesetzt) gelöst und mit destilliertem Wasser auf 250 ml ergänzt.

Zudem wird eine 10%ige Wasserstoffperoxid-Lösung angemischt, von welcher ca. 100 ml benötigt werden. In einem weiteren Becherglas werden 4 ml dieser Lösung mit 150 mg Kaliumhexacyanoferrat in 500 ml destilliertem Wasser gelöst.

In weitere Bechergläser werden jeweils separat 50 ml frisches Schweineblut, eine Eisen(III)-chlorid-Lösung und eisenhaltiges Brunnenwasser aus der Natur gefüllt.

Auf sechs Uhrgläser werden nun jeweils wenige Milliliter frisches Blut, getrocknetes Blut, die Kaliumhexacyanoferrat-Lösung mit Wasserstoffperoxid, die Eisen(III)-chlorid-Lösung und das eisenhaltige Brunnenwasser gegeben. Anschließend werden jeweils 4 ml Luminol zu jedem Präparat hinzu pipettiert. Nachdem der Raum vollständig abgedunkelt

---

<sup>34</sup> Henkel, *Experimentalkasten Lumineszenz*, S. 198

worden ist, erfolgt tropfenweise die Zugabe der Wasserstoffperoxid-Lösung zu den ersten und letzten beiden Reagenzien.

Ein Uhrglas bleibt als Referenzlösung, in welchem zu gleichen Teilen Luminol und Wasserstoffperoxid hinzugegeben werden.

### 6.3 Beobachtung

Die Flüssigkeiten auf den Uhrgläsern mit dem flüssigen und dem festen Blut beginnen bei der Zugabe von Wasserstoffperoxid blau zu leuchten. Das Volumen des flüssigen Blutes scheint sich zu vergrößern. Bei eingeschaltetem Licht ist jedoch zu erkennen, dass sich eine 1,5 cm hohe Schaumkuppel gebildet hat. Wie in Abbildung 6 gezeigt, leuchtet das Reagenz mit Kaliumhexacyanoferrat ähnlich hell. Das Leuchten klingt nach ca. 5 Sekunden langsam ab. Bei weiterer Zugabe von 3 ml Wasserstoffperoxid leuchtet das Gemisch wieder heller, bis auch dieses Leuchten abklingt.

Auf dem Uhrglas, auf welchem sich die Eisen(III)-chlorid-Lösung befindet, ist ein kaum sichtbares Leuchten wahrzunehmen, das mit der (Handy-) Kamera nicht erfasst werden konnte. Die Lösung mit dem eisenhaltigen Brunnenwasser und die Referenzlösung leuchten noch schwächer und sind ebenfalls mit der Kamera nicht erfassbar.

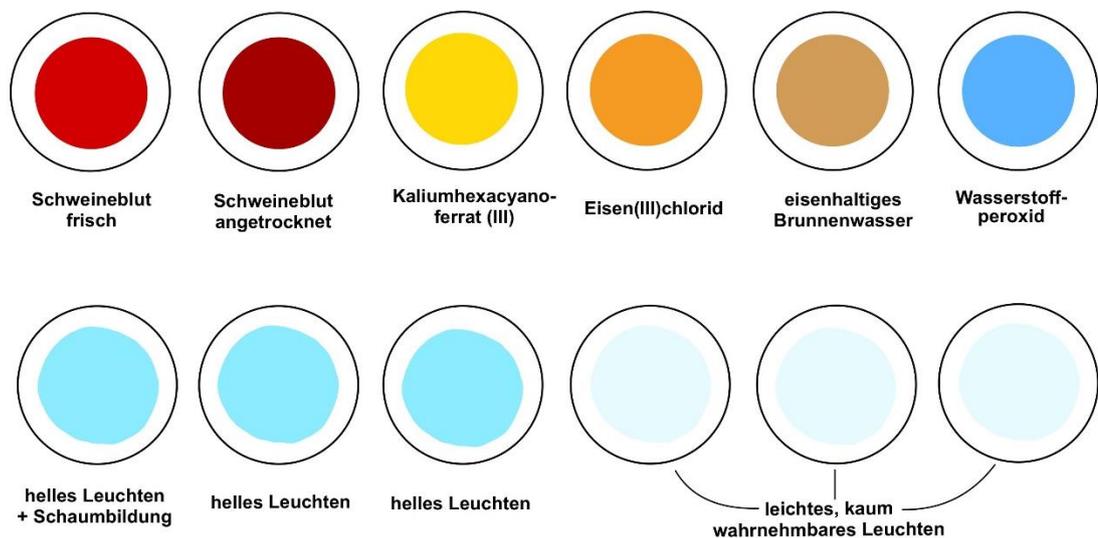


Abb. 6: Vergleich der Intensität des Leuchtens der Proben

## 6.4 Auswertung

Das Luminol wird durch Zugabe von Wasserstoffperoxid oxidiert. Da diese Reaktion sehr langsam abläuft, katalysiert das im Häm komplexierte Eisen(III)-kation die Reaktion, so dass die Reaktion durch das blaue Leuchten der Chemolumineszenz sichtbar wird.

Abbildung 7 zeigt, wie zunächst die Protonen der Aminogruppen (NH) des Luminol-Moleküls abgespalten werden. Diese reagieren mit den Hydroxid-Ionen der Natronlauge in einer Neutralisationsreaktion zu Wasser. Somit ergibt sich der Grund, weshalb Luminol zunächst im alkalischen Milieu gelöst wird. Es wird ein Dianion, ein zweifach negativ geladenes Molekül, gebildet.<sup>35</sup>

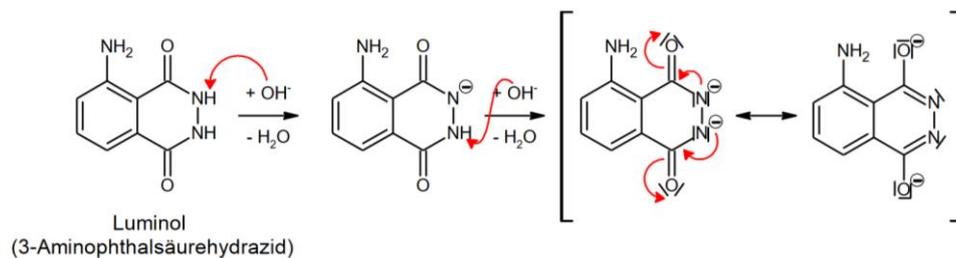


Abb. 7: Abspaltung der Protonen

Wie in Abbildung 8 gezeigt, werden in der folgenden Redoxreaktion beide Stickstoffatome durch das Wasserstoffperoxid oxidiert. Als Oxidationsmittel nimmt Wasserstoffperoxid zwei Elektronen auf und wird zu zwei Hydroxid-Ionen reduziert. Die oxidierten Stickstoffatome, welche jeweils ein Elektron abgegeben haben, verfügen über ein ungepaartes Elektron, sodass sich zwischen ihnen eine konjugierte Doppelbindung bildet. Entstanden ist ein sogenanntes Diazachinon.

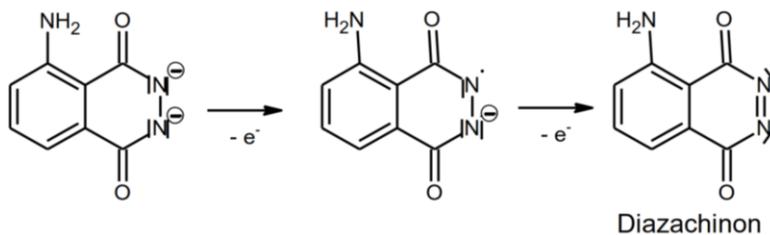


Abb. 8: Oxidation der Stickstoffatome<sup>36</sup>

<sup>35</sup> Gross, Hans-Dieter. *Experimentalvortrag 2: Exoten der Chemie – Chemolumineszenzreaktionen*. 1985, S. 13

<sup>36</sup> Henkel, *Experimentalkasten Lumineszenz*, S. 119

Darauf folgend wird ein konjugiertes System gebildet, welches durch mesomere Grenzstrukturen dargestellt werden kann. An das Kohlenstoffatom der Carbonylgruppe greifen nun zwei negativ geladene Sauerstoffatome nucleophil an. Die beiden übrigen Protonen des Wasserstoffperoxids reagieren mit Natronlauge zu Wasser.<sup>37</sup>

Als Nucleophile werden Moleküle bezeichnet, die über Atome mit mindestens einem freien Elektronenpaar verfügen. Folglich versteht man unter einem nukleophilen Angriff den Angriff mit diesem Elektronenpaar an ein Kohlenstoffatom und die damit verbundene Verdrängung eines Substituenten. Aufgrund dieses Charakteristikums wird die Eigenschaft nucleophil wörtlich als „kernsuchend“ beschrieben.<sup>38</sup>

Anschließend eröffnet sich die Signifikanz des Häms, oder um spezifischer zu sein, des komplex gebundenen Eisen(III)-kations. Dieses katalysiert den folgenden Schritt. In diesem werden zwei Atome elementaren Stickstoffs abgespalten und es erfolgt die damit verbundene instabile Dreiringbildung des Kohlenstoffatoms der einstigen Carbonylgruppe und der beiden negativ geladenen Sauerstoffatome ( $O_2^{2-}$ ) (vgl. Abb. 9).<sup>39</sup>

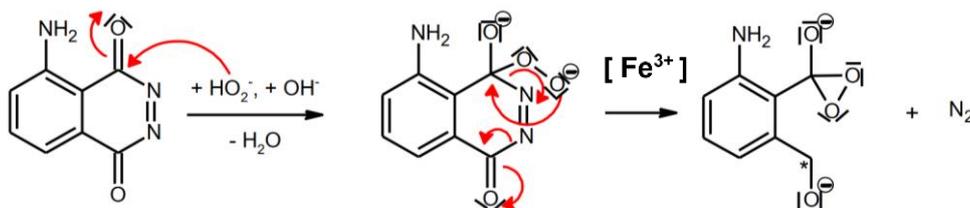


Abb. 9: Nucleophiler Angriff und Dreiringbildung unter Abspaltung von Stickstoff<sup>40</sup>

Die Bereitstellung der Sauerstoff-Anione (siehe oben) erfolgt durch die Zersetzung von Wasserstoffperoxid durch das im Blut enthaltene Enzym Hämkatalase.<sup>41</sup> Jedoch kann dieser Schritt auch anderweitig erfolgen, da die Kaliumhexacyanoferrat-Lösung dieses Enzym nicht beinhaltet.

Den vorletzten Schritt der Luminol-Reaktion bildet das Umklappen der kovalenten Bindungen der Sauerstoffatome des instabilen Moleküls, sodass es zu einem 3-Aminophthalat-Dianion reagiert. Dieses befindet sich in einem elektronisch angeregten Zustand.

<sup>37</sup> „Chemolumineszenz mit Luminol“. chem-page. 12.02.2022. <https://www.chem-page.de/experimente/chemolumineszenz-mit-luminol.html>

<sup>38</sup> „Nucleophile“. lernhelfer.de. 12.02.2022. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie-abitur/artikel/nucleophile#>

<sup>39</sup> Henkel, *Experimentalkasten Lumineszenz*, S. 118-120

<sup>40</sup> verändert nach: Henkel, *Experimentalkasten Lumineszenz*, S. 119

<sup>41</sup> Agnes-Pockels-Labor. „Dem Täter auf der Spur“. TU Braunschweig. 19.02.2022. <https://www.tu-braunschweig.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=40853&token=5bfd5774228c43882b366b4b0cf6c5fbb8c616dc>

Um in den stabileren Zustand zu gelangen, wird die übrige Energie in Form von Licht emittiert, wie es in Abbildung 10 dargestellt ist.

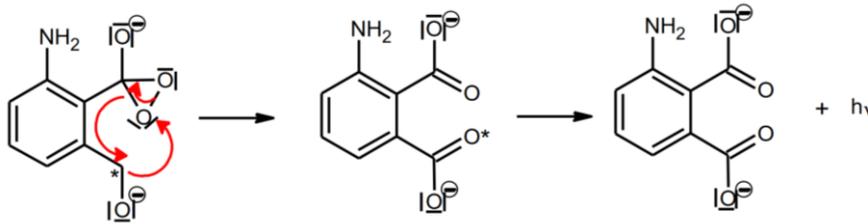
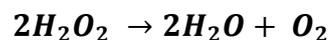


Abb. 10: Umklappen der Bindungen und Bildung eines angeregten Dianion <sup>42</sup>

Durch die Beschleunigung der Reaktion mittels des Eisenkomplexes gelangen genügend Elektronen in einen angeregten Zustand, sodass bei deren Rückkehr in ihren Grundzustand die Energie durch Lichtemission freigesetzt wird. Die Beschleunigung wird als Katalyse bezeichnet. Durch das Häm, welches eine katalytische Wirkung auf die Reaktion hat, wird die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht.

Dass die Reaktion unter Laborbedingungen auch ohne Katalysator abläuft, ist der Referenzlösung zu entnehmen. Die Oxidation von Luminol durch Wasserstoffperoxid erfolgt auch ohne Katalysator, jedoch geschieht die Reaktion ohne diesen sehr langsam. Es werden wenige Moleküle in einen angeregten Zustand versetzt und folglich geben weniger angeregte Moleküle bei ihrer Rückkehr in den Grundzustand Energie in Form von Licht ab.

Die Schaumbildung ist das Resultat der benannten Zersetzung von Wasserstoffperoxid durch das Enzym Hämkatalase (auch: Peroxidase) des Blutes. Als Produkte der Zersetzung entstehen zwei Wassermoleküle und Sauerstoff.<sup>43</sup>



Aus dem Versuch ist herzuleiten, dass die Eisen(III)-chlorid-Lösung nicht als Katalysator die Reaktion beschleunigt. Da zum heutigen Zeitpunkt noch keine vollständige Reflexion des Reaktionsmechanismus der Oxidation von Luminol vorliegt, ist die katalytische Wirkung des Eisenkomplexes auf besagte Reaktion nicht komplett nachvollziehbar.

Man kann aus dem Versuch letzten Endes die Erkenntnis gewinnen, dass der Blutnachweis durch Luminol nicht durch einfache Eisen-Ionen verunreinigt und beeinflusst wird.

<sup>42</sup> Henkel, *Experimentalkasten Lumineszenz*, S. 119

<sup>43</sup> Waite, Gabi N. et al. „Chemoluminescence detection of hydrogen peroxide“ *Principles of free biomedicine Volume I* 01.2012: S. 283-302, S. 283 f.

## 6.5 Analyse mittels UV/VIS-Spektrometer

Um die Helligkeit der verschiedenen Lösungen nicht nur mit Augenmaß, sondern in Zahlen angeben und bewerten zu können, werden die Lösungen nach Zusammengabe unverzüglich mit Hilfe eines UV/VIS-Spektrometers analysiert. Es werden die zuvor beschriebenen Lösungen in dem Verhältnis verwendet, wie es auch bei dem Hauptversuch der Fall ist. Hierbei werden drei Proben analysiert.

Zu der ersten Luminol-Wasserstoffperoxid Mischung wird Kaliumhexacyanoferrat hinzugegeben. Der Graph schlägt bei einer Wellenlänge von ca. 425 nm aus. Wie Abbildung 11 zu entnehmen ist, ist bei dieser Wellenlänge eine Lichtabsorption von 0,27 zu verzeichnen. Diese nimmt innerhalb von fünf Minuten auf 0,04 nm ab. Der Peak des Grafen stellt die Lichtemission von Luminol dar. Sobald die angeregten Moleküle in ihren Grundzustand zurückkehren, wird bei ihrer Rückkehr Licht mit einer Wellenlänge von 425 nm emittiert. Da viele Luminol-Moleküle durch den Katalysator, das Kaliumhexacyanoferrat, in kurzer Zeit umgesetzt werden und anschließend nicht mehr für die Reaktion zur Verfügung stehen, klingt die Reaktion schnell ab, sodass der Graf nach wenigen Sekunden beginnt abzufallen.

Der zweiten Probe wird Schweineblut zugesetzt, sodass es zu großer Schaumentwicklung kommt. Durch diesen Schaum ist die Aufzeichnung gestört und es ist keine signifikante Lichtabsorption im Grafen zu erkennen. Auch nach fünf Minuten ändert sich das Ergebnis nicht. Zudem findet man im Bereich der Wellenlängen von 510 bis 590 große Ausschläge des Grafen. Dies liegt an der roten Färbung Farbstoffes Häm im Blut, welches eine rote Färbung im entsprechenden Spektrum aufweist.

Zuletzt wird eine Referenzlösung aus Luminol und Wasserstoffperoxid in das Spektrometer gegeben. Bei einer Wellenlänge von 425 nm wird eine Lichtabsorption von 0,19 angezeigt, welche nach fünf Minuten um 0,02 Einheiten abgenommen hat. Dies ist deutlich geringer, als wenn zu den Lösungen ein Katalysator wie Kaliumhexacyanoferrat hinzugegeben wird. Nur wenige Luminol-Moleküle gelangen sehr langsam in einen angeregten Zustand, sodass das Leuchten nur minimal sichtbar ist und es lange Zeit dauert, bis viele Moleküle umgesetzt worden sind. Aus diesem Grund verändert sich der Wert der Lichtabsorption im Vergleich zur ersten Lösung kaum bis gar nicht.

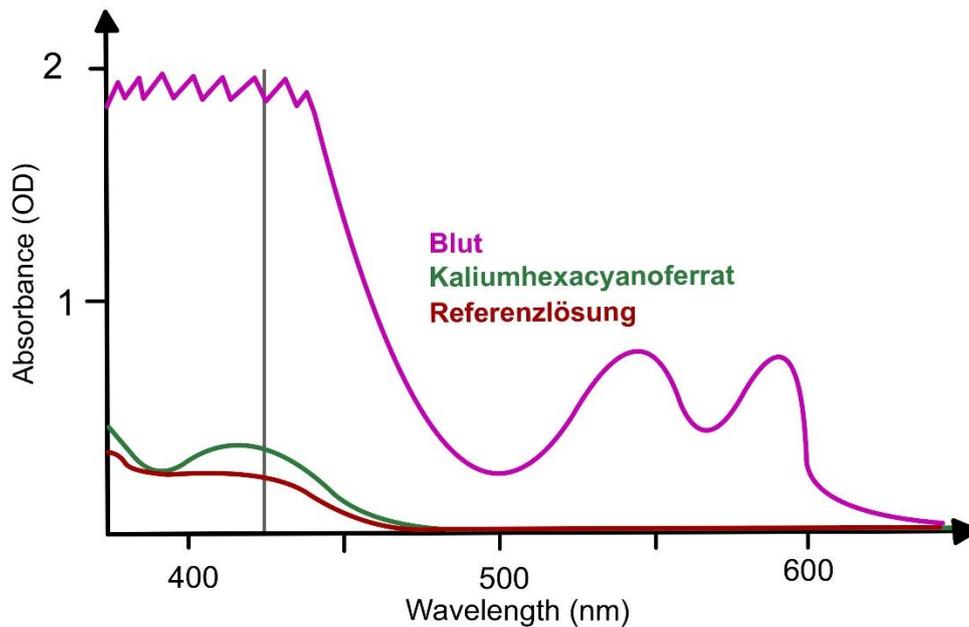


Abb. 11: Graphen der analysierten Proben

## 7. Fazit

Das chemische Leuchten von Luminol hilft seit Jahren bei der Aufklärung von Verbrechen und auch im Rahmen kleiner Schulexperimente hat es das Potential zu faszinieren.

Dieses Leuchten wird auch als Chemolumineszenz bezeichnet und ist das Resultat der Oxidation von Luminol durch Wasserstoffperoxid. Die Blutspuren an einem Tatort katalysieren diese Reaktion, sodass nur die Stellen, an welchen Blut vorhanden ist, lumineszieren. Als Folge der Katalyse klingt die Reaktion innerhalb weniger Sekunden bereits ab. Durch die Oxidation werden Elektronen im Luminol angeregt und in einen energetisch höheren Zustand versetzt. Bei deren Rückkehr in ihren Grundzustand geben sie die Energie in Form von Licht ab, sodass Licht im bläulichen Bereich emittiert wird.<sup>44</sup>

Im Rahmen des durchgeführten Versuches, in welchem jeweils zu gleichen Teilen Luminol und Wasserstoffperoxid unter der Zugabe verschiedener eisenhaltiger Lösungen reagiert haben, wurde überprüft, ob die Katalyse der Reaktion nur durch komplexgebundene Eisen-Ionen erfolgt oder ob einfache Eisen-Ionen einen ähnlichen Effekt aufweisen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Chemolumineszenz nur bei der Zugabe von echtem (Schweine-) Blut und Kaliumhexacyanoferrat, rotem Blutlagensalz, hell

<sup>44</sup> Hehner, *Visualisierung nicht erfaßbarer Blutkontaminationen*, S. 27-29

leuchtend sichtbar auftritt. Als Katalysator der Reaktion eignen sich somit nur komplexgebundene Eisen-Ionen.

Obwohl der Nachweis nicht spezifisch für Blut ist, da auch Kaliumhexacyanoferrat nachgewiesen werden kann, hat er sich als zuverlässig herausgestellt und ist nicht durch einfache Eisen-Ionen zu verfälschen. Die Befürchtung, der gesamte Tatort könnte nach der Verunreinigung mit eisenhaltigen Lösungen, ausgenommen Kaliumhexacyanoferrat, leuchten, ist infolgedessen unbegründet.

Jedoch konnten nicht alle meiner zu Anfang gestellten Fragen beantwortet werden und mein Fragenspektrum erweiterte sich mit fortschreitender Recherche. Im Bereich der Chemolumineszenz von Luminol ist weit noch nicht alles erforscht und erklärt worden, was mich weiter darin bestärkt, ein Studium im Fachbereich der (Bio-) Chemie zu absolvieren und später einmal in der Forschung tätig zu werden. Es wurde mir nahegelegt, dieses Thema im Rahmen einer Masterarbeit weiter zu erörtern, um mit mehr Zeit, tiefgründigerem Wissen und weiterreichenden Mitteln unbeantwortete Fragen eines Tages beantworten und erklären zu können.

## 8. Anhang



Luminol



Eisen(III)-chlorid-Lösung, 2x Brunnenwasser, frisches Schweineblut, altes Schweineblut, Luminol-Lösung, Kaliumhexacyanoferrat-Wasserstoffperoxid-Lösung



Eisen(III)-chlorid-Lösung, 2x Brunnenwasser, frisches Schweineblut, altes Schweineblut, Luminol-Lösung, Kaliumhexacyanoferrat-Wasserstoffperoxid-Lösung



*Versuchsaufbau: Schweineblut, Kaliumhexacyanoferrat-Lösung, Eisen(III)-chlorid-Lösung, Brunnenwasser, Wasserstoffperoxid*



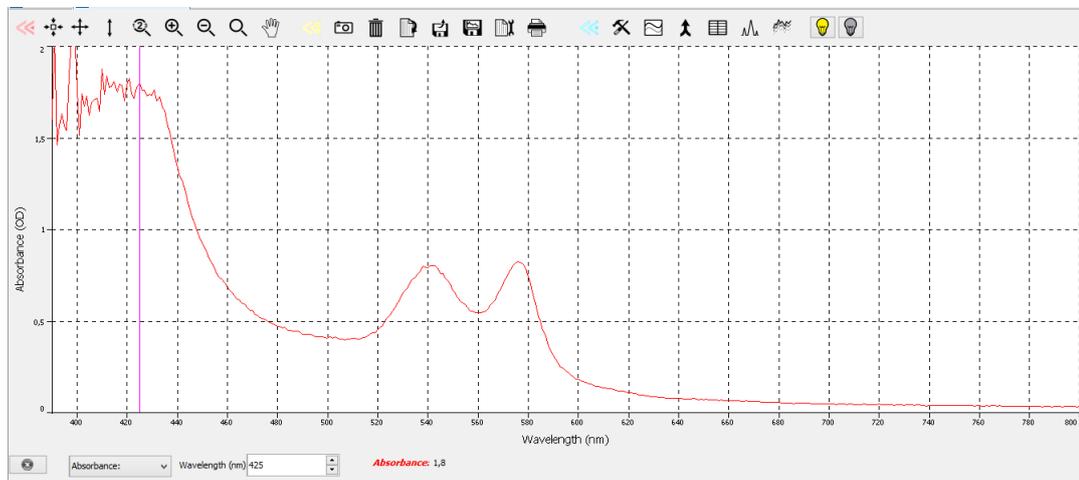
*Reaktion von frischem Schweineblut mit Schaumentwicklung (links) und Kaliumhexacyanoferrat (rechts)*



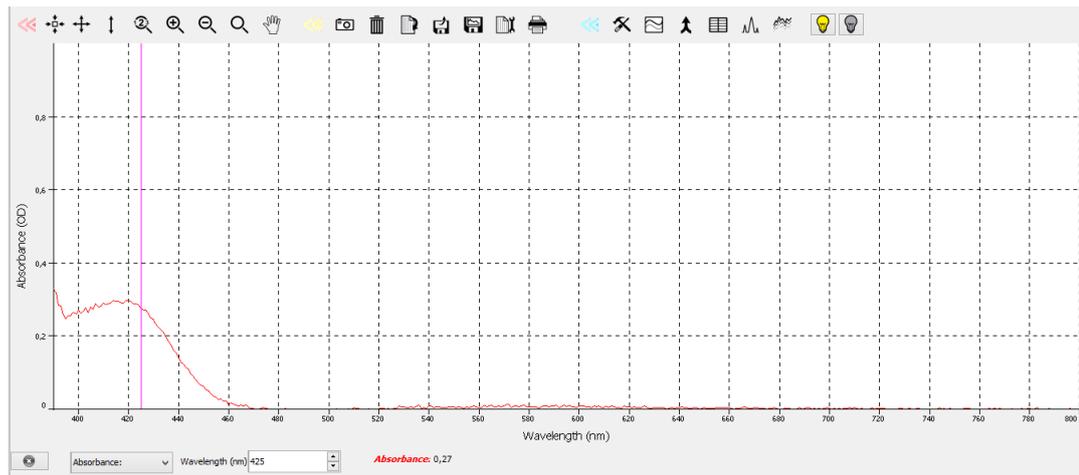
*Reaktion von Kaliumhexacyanoferrat (links) und der Referenzlösung (rechts)*



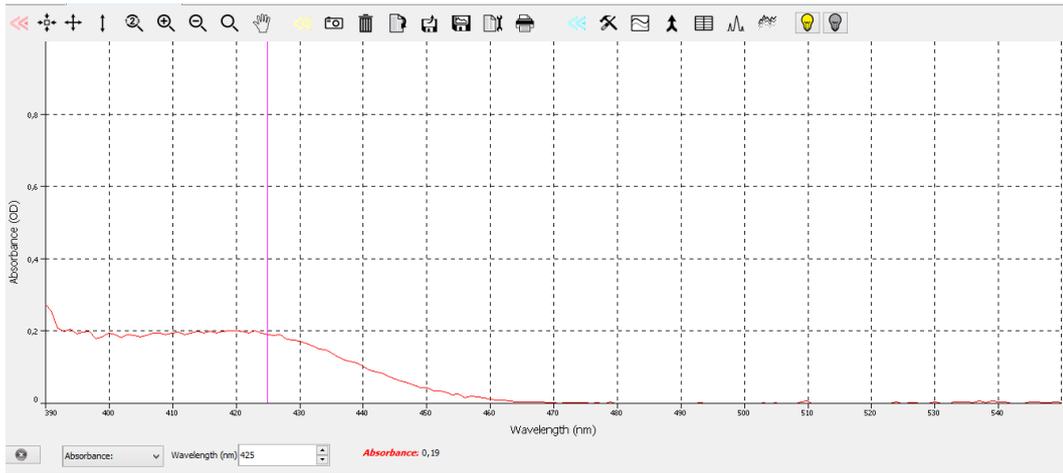
Schaumentwicklung bei frischem Schweineblut und leichte Schaumentwicklung bei altem Schweineblut



UV/VIS-Spektroskopie mit Blut als Katalysator



UV/VIS-Spektroskopie mit Kaliumhexacyanoferrat als Katalysator



UV/VIS-Spektroskopie der Referenzlösung

## 9. Literaturverzeichnis

### 9.1 Primärliteratur

- Albrecht, Steffen, Herbert Brandl und Waldemar Adam. „Chemilumineszenz-Reaktionen. Anwendungen in der klinischen Chemie, Biochemie und Medizin.“ *Chemie in unserer Zeit* 24. Jargh. 1990: S. 228-237
- Arnold, Karin et al. *Chemie Oberstufe Gesamtband*. Berlin: Cornelsen Verlag. 1. Aufl. 2019
- Binnewies, Michael et al. *Allgemeine und Anorganische Chemie*. Heidelberg: Springer Spektrum. 2. Aufl. 2011
- Gross, Hans-Dieter. *Experimentalvortrag 2: Exoten der Chemie – Chemolumineszenzreaktionen*. 1985
- Horn, Florian et al. *Biochemie des Menschen. Das Lehrbuch für das Medizinstudium*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag. 2. Auflage. 2003
- Hehner, Klaus. *Visualisierung optisch nicht erfaßbarer Blutkontaminationen mit Hilfe der Chemolumineszenz*. Bonn: Promotionsarbeit. 1992
- Henkel, Sarah. *Wissenschaftliche Hausarbeit im Fach Chemie: Ein Experimentierkasten zum Thema Lumineszenz*. 2011
- Latscha, Hans Peter und Helmut Alfons Klein. *Anorganische Chemie. Chemie – Basiswissen I*. Heidelberg: Springer-Lehrbuch. 4. Aufl. 1990
- Latscha, Hans Peter und Helmut Alfons Klein. *Organische Chemie. Chemie – Basiswissen II*. Heidelberg: Springer-Lehrbuch. 2. Aufl. 1990
- Lautenschläger, Karl-Heinz et al. *Chemie. Nachschlagewörter für Grundlagenwissen*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag. 2. Aufl. 1965
- Müller-Esterl, Werner et al. *Biochemie. Eine Einführung für Mediziner und Naturwissenschaftler*. Heidelberg: Springer Spektrum. 2. Aufl. 2011
- Waite, Gabi N. et al. „Chemoluminescence detection of hydrogen peroxide“ *Principles of free biomedicine Volume I* 01.2012: S. 283-302
- Weiß, Dieter, Eric Täuscher und Herbert Brandl. „Die bunte Welt der Porphyrine.“ *Chemie in unserer Zeit* 52 19.04.2018: S. 12-21

## 9.2 Sekundärliteratur

- Agnes-Pockels-Labor. „Dem Täter auf der Spur“. TU Braunschweig. 19.02.2022. <https://www.tu-braunschweig.de/index.php?eID=dump-File&t=f&f=40853&token=5bfd5774228c43882b366b4b0cf6c5fbb8c616dc>
- Dörfler, Andreas. „Chemolumineszenz“. Uni Bayreuth. 04.03.2022. <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/chemolumineszenz/Chemolumineszenz.pdf>
- Dücker, Simon. „Farbstoffe und Farbigkeit“. abiweb. 31.01.2022. <https://www.abiweb.de/chemie-forschung-aromaten-farbstoffe-nordrhein-westfalen-nrw/farbstoffe-und-farbigkeit.html>
- Förster. „Blutmenge“. Grossesblutbild. 22.01.2022. [https://www.grossesblutbild.de/wie-viel-blut-hat-ein-mensch.html#Erwachsene\\_besitzen\\_im\\_Durchschnitt\\_5\\_bis\\_8\\_Liter\\_Blut](https://www.grossesblutbild.de/wie-viel-blut-hat-ein-mensch.html#Erwachsene_besitzen_im_Durchschnitt_5_bis_8_Liter_Blut)
- Kraft, Oliver. „Konjugierte Doppelbindungen“. about medication. 29.01.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=7XTCi5wMkxI>
- Rieger, Katharina. „Blutspuren“. Investikativ. 04.03.2022. <https://www.investikativ.de/von-wegen-wisch-und-weg-blutspuren/>
- Rudnicka. „Polizeiliche Aufklärungsquote bei Mord in Deutschland“. Statista. 03.01.2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152525/umfrage/entwicklung-der-polizeilichen-aufklaerungsquote-bei-mord-seit-1995/>
- Schunk, Axel, et al. „Metallkomplexe“. Chemgapedia. 23.03.2022. <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/4/cm/komplexe.vlu/Page/vsc/de/ch/4/cm/komplexe/chelateffekt.vscml.html>
- Steindorf, Lisa, et al. „Die Kraft des Leuchtens“. DGZfP. 16.01.2022. <https://www.dgzfp.de/Portals/24/IZ/PDF/Jugend%20forscht/RW%20Nordhausen%202018.pdf?ver=2018-04-09-153303-900>
- Wörfel, et al. „UV/VIS-Spektroskopie“. Springer Link. 20.02.2022. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-6162-5\\_13](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-6162-5_13)
- Weiss, Dieter. „Chemielumineszenz mit Luminol“. Uni-Jena. 22.01.2022. <http://www.chemie.uni-jena.de/institute/oc/weiss/Luminol.htm>
- „Chemolumineszenz mit Luminol“. chem-page. 12.02.2022. <https://www.chem-page.de/experimente/chemolumineszenz-mit-luminol.html>
- „Nucleophile“. lernhelfer.de. 12.02.2022. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie-abitur/artikel/nucleophile#>

- „Spektroskopische Analysemethoden“. lernhelfer.de. 22.02.2022. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie-abitur/artikel/spektroskopische-analysemethoden-uv-vis-spektroskopie-und#>

### 9.3 Abbildungsquellen

- Abb. 1: Yikrazuul. „Häm b“. chemie-schule. 12.02.2022. [https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Heme\\_b.svg](https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Heme_b.svg)
- Abb. 2: verändert nach: Schork, Nicolai. „Wie funktioniert das mit der Farbigkeit“. 23.02.2022. Chemie-Simpleclub. <https://www.youtube.com/watch?v=k-Uggf3RkrY>
- Abb. 3: verändert nach: „Spektroskopische Analysemethoden“. lernhelfer.de. 22.02.2022. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie-abitur/artikel/spektroskopische-analysemethoden-uv-vis-spektroskopie-und>
- Abb. 4: Weiss, Dieter. „Chemielumineszenz mit Luminol“. Uni-Jena. 22.01.2022. <http://www.chemie.uni-jena.de/institute/oc/weiss/bilderN/Luminolsynthese.png>
- Abb. 5: verändert nach: Steindorf, Lisa, et al. „Die Kraft des Leuchtens“. DGZfP. 16.01.2022. <https://www.dgzfp.de/Portals/24/IZ/PDF/Jugend%20forscht/RW%20Nordhausen%202018.pdf?ver=2018-04-09-153303-900>
- Abb. 6: nach eigener Beobachtung
- Abb. 7: Henkel, Sarah. *Wissenschaftliche Hausarbeit im Fach Chemie: Ein Experimentierkasten zum Thema Lumineszenz*. 2011, S. 119
- Abb. 8: Henkel, Sarah. *Wissenschaftliche Hausarbeit im Fach Chemie: Ein Experimentierkasten zum Thema Lumineszenz*. 2011, S. 119
- Abb. 9: verändert nach: Henkel, Sarah. *Wissenschaftliche Hausarbeit im Fach Chemie: Ein Experimentierkasten zum Thema Lumineszenz*. 2011, S. 119
- Abb. 11: Henkel, Sarah. *Wissenschaftliche Hausarbeit im Fach Chemie: Ein Experimentierkasten zum Thema Lumineszenz*. 2011, S. 119

## 10. Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt und die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe. Das gleiche gilt auch für beigegebene Zeichnungen, Kartenskizzen und Darstellungen.

Nele Geißler, Recklinghausen, den 31.03.2022