

Bernburg  
Dessau  
Köthen



**Hochschule Anhalt**  
Anhalt University of Applied Sciences

**emw**

Fachbereich  
Elektrotechnik, Maschinenbau  
und Wirtschaftsingenieurwesen

**Sarah Hoffmann**

---

Vorname Nachname

Biomedizinische Technik, 2011, 4054109

---

Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer

## Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

### Thema:

Untersuchungen zum Einfluss von OLED Licht  
auf *in vitro*-Zellkulturen

Prof. Dr. Michael Zimmermann

---

Vorsitzende(r) der Bachelorprüfungskommission/1. Prüfer(in)

Prof. Dr. Mägert

---

2. Prüfer(in)

23. 07. 2015

---

Abgabe am

**Danksagung**

Vorab möchte ich mich herzlichst bei Frau Dr. Hauptmann und Frau Dr.-Ing. habil. Wetzel bedanken, die mich in meiner Bachelorzeit seitens des Fraunhofer-Instituts für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (kurz FEP) in Dresden betreut haben. Für die Betreuung seitens der Hochschule Anhalt im Fachbereich 6 Elektrotechnik, Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Zimmermann bedanken.

Dank gebührt auch der gesamten Arbeitsgruppe medizinische Applikationen am FEP, die mich herzlichst in die Gruppe aufgenommen haben und mir den Einstieg in ein fremdes Thema erleichtert haben. Ein besonderer Dank geht dahingehend an Frau Kenner, die mich in die Zellbiologie eingeführt hat.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken dafür, dass sie mich unterstützt haben und ich ohne finanzielle Sorgen mein Studium absolvieren konnte.

---

## Kurzzusammenfassung

Verfasserin: Sarah Hoffmann  
Thema der Bachelorarbeit: Untersuchungen zum Einfluss von OLED Licht auf *in vitro*-Zellkulturen

In der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen zum Einfluss von Licht auf humane *in vitro*-Zellkulturen beschrieben.

Zunächst wird das Licht technisch erläutert und das Farbspektrum des Lichts betrachtet. Das natürliche Farbspektrum der Sonne ändert sich über den Tag, Des Weiteren werden die Farben des Lichts in der Wissenschaft in verschiedenen Bereichen verwendet.

Der Mensch hat einen geregelten Tagesablauf, der mit dem Tagesverlauf der Sonne parallel abläuft. Durch verschiedene Einflüsse kann diese Parallelität gestört werden.

Für die Untersuchungen zum Einfluss des Lichts werden *in vitro* Modellsysteme verwendet, insbesondere Keratinozyten, die genauer beschrieben werden.

Außerdem werden für die Untersuchungen organische Leuchtdioden (kurz: OLED) verwendet. Es wird eine Auswahl an Versuchs-OLEDs getroffen, welche für erste Versuche verwendet werden.

In dieser Arbeit sollen erste Erkenntnisse über die Auswirkungen von Licht auf humane Zellen ermittelt werden, um aus der großen Auswahl von OLEDs Farbspektren zur genaueren Betrachtung herauszuziehen und später eine Anwendung in der Medizin zu ermöglichen.

Hierzu werden das Wachstum und der Stoffwechselumsatz der Zellen betrachtet. Die Zellen werden mit Hilfe eines Versuchsaufbaus aus einer vorangegangenen Praktikumsarbeit beleuchtet. Als Lichtspektrum wurden 5 Farben ausgewählt: blau, grün, orange, warmweiß und kaltweiß. Als weitere Parameter werden eine feste Beleuchtungszeit, sowie eine identische Leuchtdichte bei allen Farben festgelegt.

Aus den Versuchen können erste Erkenntnisse gezogen werden, jedoch müssen diese durch weitere Versuche bestätigt bzw. genauer betrachtet werden.

---

**Inhaltsverzeichnis**

Danksagung .....	II
Kurzzusammenfassung .....	III
Inhaltsverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis .....	VIII
1 Einleitung .....	1
2 Zielstellung .....	2
3 Theorie .....	3
3.1 Licht .....	3
3.1.1 Lichttechnische Begriffe .....	3
3.1.2 Lichtfarben .....	5
3.1.2.1 Farbmetriik .....	5
3.1.2.2 Tagesverlauf des Lichts .....	7
3.1.2.3 Bedeutung der Farben in der Wissenschaft .....	7
3.2 Tagesablauf des Menschen .....	8
3.2.1 Einwirkung des Lichts auf den Tagesablauf .....	9
3.2.2 Störungen des Tagesablaufs .....	10
3.2.2.1 Schichtarbeit .....	11
3.2.2.2 Reisen .....	11
3.2.2.3 Lichtverschmutzung .....	12
3.3 In vitro Modellsysteme .....	13
Keratinocyten .....	14
4 Material, Geräte und Methoden .....	15
4.1 OLED .....	15
4.1.1 Auswahl OLED .....	16
4.1.1.1 Blaue OLED .....	16
4.1.1.2 Grüne OLED .....	18
4.1.1.3 Orange OLED .....	19

---

4.1.1.4	Warmweiße OLED .....	20
4.1.1.5	Kaltweiße OLED.....	21
4.2	Zellkultivierung .....	23
4.3	Zellbiologische Methoden.....	24
4.3.1	Lichtmikroskopie .....	24
4.3.2	Zellzahl.....	24
4.3.3	Stoffwechselaktivität mit Resazurin .....	25
4.3.3.1	Stoffwechselumsatz pro Zelle.....	26
4.4	Versuchsaufbau .....	27
5	Experimentelles .....	30
5.1	Vorbereitung der Zellen zur Beleuchtung .....	30
5.1.1	Bestimmung der Wachstumskurve .....	30
5.1.2	Aussaat der Zellen und Aufzucht.....	32
5.2	Versuchskonzept zur Beleuchtung der Zellen mit OLEDs.....	32
5.3	Versuchsplanung zur Bestrahlung.....	33
6	Ergebnisse und Diskussion .....	34
6.1	Blaue OLED .....	34
6.2	Grüne OLED .....	36
6.3	Orange OLED .....	39
6.4	Warmweiße OLED .....	41
6.5	Kaltweiße OLED.....	43
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	45
	Literaturverzeichnis .....	IX
	Anhang.....	XI
	Selbstständigkeitserklärung.....	XXVII

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: spektrale Hellempfindlichkeitskurve des Auges (Quelle: M. Schreil, Erzeugung großflächiger Leucht-dioden in einem vertikalen In-Line-Bedampfungssystem, Dresden, 2004.).....	3
Abb. 2: Farbspektrum des sichtbaren Lichtbereichs (Quelle: PUCHNER, Ronny: Licht und Farbe < Physik < Grundlagen < Fotoschule;. URL <a href="http://www.puchner.org/Fotografie/technik/physik/licht.htm">http://www.puchner.org/Fotografie/technik/physik/licht.htm</a> . – Aktualisierungsdatum: 2012-12-18 – Überprüfungsdatum 2015-02-10).....	5
Abb. 3: CIE-Farbtafel nach Din 5033-3.....	6
Abb. 4: Vergleich Sonnenlichtspektrum morgens/abends gegenüber mittags (Quelle: Farbwirkungen im Tagesverlauf - Fotografieren in der Praxis - Prophoto Online. URL <a href="http://www.prophoto-online.de/fotopraxis/farbwirkungen-im-tagesverlauf-10000460">http://www.prophoto-online.de/fotopraxis/farbwirkungen-im-tagesverlauf-10000460</a> – Überprüfungsdatum 2015-02-17) .....	7
Abb. 5: Circadianer Rhythmus von Melatonin und Serotonin (Quelle: DIPL.-ING. RICHTER, HaJo: Gesundes Wohnklima : Lichtemotionen; Tageslichtnutzung; Beleuchtung. Stuttgart, 18.07.2006. URL <a href="http://www.bubw.de/PDF_Dateien/News/2006/07_Juli/Vortrag_Richter.pdf?lvl=">http://www.bubw.de/PDF_Dateien/News/2006/07_Juli/Vortrag_Richter.pdf?lvl=</a> – Überprüfungsdatum 2015-01-19.....	8
Abb. 6: Tagesrhythmus (Quelle: RIEGENS: Dynamische Beleuchtung. URL <a href="http://riegens.de/katalog/dynamische-beleuchtung">http://riegens.de/katalog/dynamische-beleuchtung</a> – Überprüfungsdatum 2015-02-17).....	9
Abb. 7: Kennwerte verschiedener Lichtverhältnisse (Quelle: DIPL.-ING. RICHTER, HaJo: Gesundes Wohnklima : Lichtemotionen; Tageslichtnutzung; Beleuchtung. Stuttgart, 18.07.2006. URL <a href="http://www.bubw.de/PDF_Dateien/News/2006/07_Juli/Vortrag_Richter.pdf?lvl=">http://www.bubw.de/PDF_Dateien/News/2006/07_Juli/Vortrag_Richter.pdf?lvl=</a> – Überprüfungsdatum 2015-01-19.....	10
Abb. 8: Vergleich nächtliche Beleuchtung (Quelle: POSCH, Thomas ; HÖLKER, Franz ; FREYHOFF, Anja ; UHLMANN, Thomas: Das Ende der Nacht : Lichtsmog: Gefahren-Perspektiven- L©æsungen. 2. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013).....	12
Abb. 9: Substratvarianten der OLED (Quelle: Fraunhofer FEP).....	15
Abb. 10: weiÙe opake Tabola OLED mit COMEDD Signatur .....	16
Abb. 11: Spektrum der blauen OLED .....	17
Abb. 12: Leuchtdichte in Abhängigkeit vom Strom.....	17
Abb. 13. Leuchtspektrum der grünen OLED .....	18
Abb. 14: Leuchtdichte in Abhängigkeit zum Strom der grünen OLED .....	18
Abb. 15: Lichtspektrum der orangen OLED .....	19

---

Abb. 16: Leuchtdichte in Abhängigkeit zum Strom der orangen OLED .....	19
Abb. 17: Lichtspektrum der warmweißen OLED .....	20
Abb. 18: Leuchtdichte in Abhängigkeit des Stroms der warmweißen OLED .....	21
Abb. 19: Leuchtspektrum der kaltweißen OLED .....	21
Abb. 20: Leuchtdichte in Abhängigkeit zum Strom der kaltweißen OLED .....	22
Abb. 21: Neubauer Zählkammer; links: Netzeinteilung der Zählkammer; rechts: Schema zum Auszählen (Quelle: LINDL, Toni: Zell- und Gewebekultur : Einführung in die Grundlagen sowie ausgewählte Methoden und Anwendungen. 5., überarb. und erw. Aufl. Heidelberg, Berlin : Spektrum, Akad. Verl., 2002).....	24
Abb. 22: Resazurin-Reduktion (Quelle: ANNA KARUTZ: Ermittlung des Einflusses der Nanophotonentechnologie auf in vitro-Zellkulturen. Zittau, Internationales Hochschulinstitut Zittau, Biotechnologie und Angewandte Ökologie. Masterarbeit. 2012) .....	25
Abb. 23: abgedunkelte Box; Kiste und Deckel jeweils mit schwarzer Folie ummantelt.....	27
Abb. 24: Befüllung der Well-Platte, grün darf befüllt werden .....	28
Abb. 25: OLED auf Platine .....	28
Abb. 26: Spannungsquelle, Anschluss der Laborkabel rechts im Bild.....	29
Abb. 27: Versuchsaufbau in Box .....	29
Abb. 28: Wachstumskurven von 3 verschiedenen Konzentrationen.....	31
Abb. 29: Konfluenz des Zellrasens .....	31
Abb. 30: Versuchskonzept.....	32
Abb. 31: charakterisierende Grafiken zur blauen OLED .....	XII
Abb. 32: charakterisierende Grafiken zur grünen OLED .....	XIII
Abb. 33: charakterisierende Grafiken zur orangen OLED .....	XIV
Abb. 34: charakterisierende Grafiken zur warmweißen OLED .....	XV
Abb. 35: charakterisierende Grafiken zur kaltweißen OLED .....	XVI

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: geschätzte Dauer des Jetlags (WATERHOUSE, James M. ; MINORS, David S. ; WATERHOUSE, Maureen E.: Die innere Uhr : Mit ihr leben - und nicht gegen sie. Bern, Göttingen, Toronto, Seattle : Huber, 1992) .....	11
Tab. 2: Versuchsplanung.....	33
Tab. 3: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (blaues Licht, 300 cd/m <sup>2</sup> ) .....	34
Tab. 4: 15 min Behandlung mit blauem Licht bei 300 cd/m <sup>2</sup> .....	35
Tab. 5: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (grüne OLED, 300 cd/m <sup>2</sup> ).....	36
Tab. 7: 15 min Behandlung mit grünem Licht bei 300 cd/m <sup>2</sup> .....	36
Tab. 8: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (grüne OLED, 1000 cd/m <sup>2</sup> ).....	37
Tab. 9: 15 min Behandlung mit grünem Licht bei 1000 cd/m <sup>2</sup> .....	37
Tab. 10: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (orange OLED, 300 cd/m <sup>2</sup> ).....	39
Tab. 11: 15 min Behandlung mit orangem Licht bei 300 cd/m <sup>2</sup> .....	39
Tab. 12: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (warmweiße OLED, 300 cd/m <sup>2</sup> ).....	41
Tab. 13: 15 min Behandlung mit warmweißem Licht bei 300 cd/m <sup>2</sup> .....	41
Tab. 14: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (warmweiße OLED, 1000 cd/m <sup>2</sup> ).....	42
Tab. 15: 15 min Behandlung mit warmweißem Licht bei 1000 cd/m <sup>2</sup> .....	42
Tab. 16: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (kaltweiße OLED, 300 cd/m <sup>2</sup> ).....	43
Tab. 17: 15 min Behandlung mit kaltweißem Licht bei 300 cd/m <sup>2</sup> .....	43
Tab. 18: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (kaltweiße OLED, 1000 cd/m <sup>2</sup> ).....	44
Tab. 19: 15 min Behandlung mit kaltweißem Licht bei 1000 cd/m <sup>2</sup> .....	44
Tab. 20: benötigte Volumina zu den entsprechenden Flaschengrößen .....	XVII
Tab. 21: Zusammensetzung der benötigten HaCaT-Lösungen.....	XVII

## 1 Einleitung

Das Licht spielt im täglichen Leben sowie in der Evolution eine große Rolle. Krankheiten wurden schon in der Antike mit Hilfe des Sonnenlichtes geheilt. Über die Jahrhunderte hinweg ist das Wissen darüber verloren gegangen. Heutzutage ist das Licht kein anerkanntes Medikament, wird aber zur Unterstützung anderer Heilmethoden eingesetzt. Das Einsatzgebiet des Lichtes reicht von psychischen Erkrankungen bis hin zu Hauterkrankungen sowie der Wundheilung. Allerdings sind bisher die Einflüsse der Bestrahlungen auf die menschliche Psyche und der zellbiologischen Vorgänge nicht vollständig geklärt.

Am Fraunhofer Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl und Plasmatechnik (FEP) in Dresden werden im Bereich Flexible Organische Elektronik (FOE) organische Leuchtdioden (OLED) hergestellt. Auf Grund ihrer besonderen Eigenschaften könnte ein Anwendungsgebiet in der Medizin liegen.

In der Abteilung für medizinische Applikationen am FEP soll die Wirkung des Lichtes, erzeugt durch organische Leuchtdioden auf zellbiologische Einflüsse untersucht werden. Hierzu werden humane Zellkulturen mit Hilfe eines Versuchsaufbaus beleuchtet.

Innerhalb dieser Arbeit werden humane Keratinozyten (Zelllinie aus der obersten Hautschicht) innerhalb einer Versuchsreihe mit Licht bestrahlt. Die Versuchsreihe soll einen ersten Einblick in die Wechselwirkung von Licht mit humanen Zellen geben. Zur Beleuchtung werden verschiedene organische Leuchtdioden des sichtbaren Bereiches ausgewählt. Das sichtbare Lichtspektrum wird mit diesen Lichtquellen z.T. beschrieben und repräsentiert.

## 2 Zielstellung

Der Mensch ist alltäglich nicht nur von natürlichen sondern auch von (umwelt) spezifischen elektromagnetischen Strahlen umgeben. Welche Einflüsse diese Bestrahlungen auf die menschliche Psyche und zellbiologischen Vorgänge im Körper hervorrufen, sind komplex und bisher nicht vollständig geklärt.

Im Fraunhofer FEP, Bereich Flexible Organische Elektronik werden organische Leuchtdioden (OLEDs) entwickelt. Ein Vorteil der OLEDs gegenüber bisherigen Leuchtquellen ist ihre homogene, großflächige Leuchtfläche und deren Leuchtspektren, die dem natürlichen Wellenlängenspektrum der Sonne sehr ähnlich sind. Im Fokus der Arbeit steht dabei, die Chancen der OLEDs für eine gezielte Lichttherapie zu erschließen.

Innerhalb der Bachelorarbeit sollen erste Untersuchungen an Zellkulturen unter definierten Bedingungen (definierter Wellenlängenbereich, Leuchtdichte und Bestrahlungszeit) untersucht werden. Für die zellbiologischen Untersuchungen wird die adhärent wachsende, epitheliale Zelllinie HaCaT (Human adult low Calcium high Temperature keratinocytes) verwendet. Die Keratinozyten sind Hautzellen in der obersten Schicht, die eine physikalische Barriere zwischen Organismus und Umwelt bilden und somit als Modell geeignet sind.

Der im vorausgegangen Praktikum entstandene Messplatz soll genutzt werden, um erste Bestrahlungsversuche durchzuführen.

In der Arbeit sind folgende Aufgaben zu realisieren:

1. Auswahl geeigneter OLEDs sowie deren optische und elektrische Charakterisierung
2. Zellbiologische Untersuchungen mit humanen Keratinozyten unter Nutzung folgender Nachweisverfahren:
  - Gesamt-Zellstoffwechselaktivität in der Zellkultur
  - Zellzahl über mikroskopische Auswertung
  - Bewertung der spezifischen Stoffwechselaktivität der Keratinozyten
3. Reflexion der Ergebnisse hinsichtlich Auswahlkriterien und Anwendungsszenarien

Betreut durch: Dr. Jacqueline Hauptmann  
Fraunhofer Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP)  
Einrichtung COMEDD

Dr.-Ing. habil. Christiane Wetzel  
Fraunhofer Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP)  
Gruppenleiterin Med. Applikationen

Prof. Dr.-Ing. M. Zimmermann  
Hochschule Anhalt, Fachbereich Elektrotechnik

### 3 Theorie

#### 3.1 Licht

Das für den Menschen sichtbare Licht ist ein Teil der elektromagnetischen Wellen und ist im Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm anzuordnen.

##### 3.1.1 Lichttechnische Begriffe

In der optischen Messtechnik wird zwischen radiometrischen und photometrischen Größen unterschieden. Die radiometrischen Größen geben die physikalischen Strahlungseigenschaften wieder und werden mit dem Index  $e$  gekennzeichnet. Die photometrischen Größen beziehen die Wirkung des Lichts auf das menschliche Auge mit ein, d.h. es wird Bezug genommen auf die Hellempfindlichkeit  $V(\lambda)$  des menschlichen Auges. In Abb. 1 befindet sich die  $V(\lambda)$ -Kurve des menschlichen Auges.

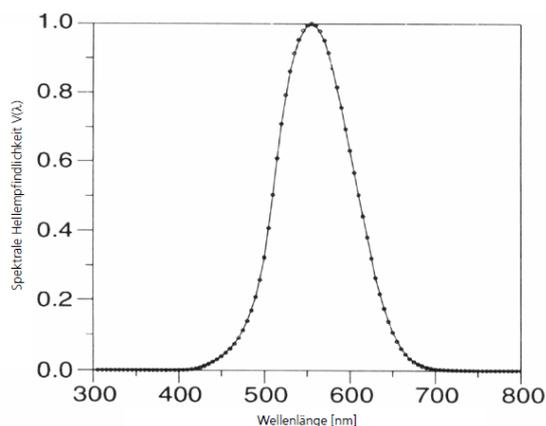


Abb. 1: spektrale Hellempfindlichkeitskurve des Auges (Quelle: M. Schreil, Erzeugung großflächiger Leuchtdioden in einem vertikalen In-Line-Bedampfungssystem, Dresden, 2004.)

Zu erkennen ist, dass die Empfindlichkeit des Auges bei der Wellenlänge  $\lambda=555$  nm maximal ist und dieses Licht für den Menschen am hellsten wirkt, obwohl die Strahlenintensität identisch ist. Daher wird die Empfindlichkeit bei 555 nm gleich 1 gesetzt [1]. Die Hellempfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$  ist auch in der DIN 5031 zu finden [2].

Die radiometrischen Strahlungsgrößen  $X_e$  können mit Hilfe der  $V(\lambda)$ -Kurve und das photometrische Strahlungsäquivalent  $K$  in photometrische Größen  $X_v$  umgerechnet werden. Der theoretische Maximalwert liegt bei  $K_m = 683$  lm/W bei monochromatischer Strahlung der Wellenlänge 555 nm [3].

Dieser theoretische Wert entsteht durch die Messung am Maximum der Augenempfindlichkeit (555 nm). Bei dieser Wellenlänge entspricht eine Strahlungsleistung von 1 W einem Lichtstrom von 683 lm [4].

Die Umrechnung der radiometrischen Größe in die entsprechende photometrische Größe erfolgt durch die Formel:

$$X_v = K_m \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} X_e(\lambda)V(\lambda)d(\lambda)$$

Die radiometrische Größe ist in Tab. 1 der entsprechenden photometrischen Größe gegenübergestellt.

Tab. 1: radiometrische und photometrische Grundgrößen

	Radiometrische Größe	Einheit		Photometrische Größe	Einheit
$\Theta_e$	Strahlungsleistung	W	$\Theta_v$	Lichtstrom	cd sr =lm (Lumen)
$Q_e$	Strahlungsenergie	Ws	$Q_v$	Lichtmenge	lm s
$I_e$	Strahlstärke	W/sr	$I_v$	Lichtstärke	cd (Candela)
$E_e$	Bestrahlungsstärke	W/m <sup>2</sup>	$E_v$	Beleuchtungsstärke	lm/m <sup>2</sup>
$L_e$	Strahldichte	W/(m <sup>2</sup> sr)	$L_v$	Leuchtdichte	cd/m <sup>2</sup>

In Tab. 2 sind wesentliche photometrische Größen und deren Definitionen aufgelistet.

Tab. 2: Definitionen von lichttechnischen Begriffen (Quelle: C. Waller, „Long Life for Art“ [Online], [http://www.cwaller.de/deutsch.htm?lichttechnische\\_begriffe.htm](http://www.cwaller.de/deutsch.htm?lichttechnische_begriffe.htm) [Zugriff am 16 September 2014])

Begriff	Einheit	Definition
Beleuchtungsstärke $E_v$	Lux (Lx)	Die Beleuchtungsstärke ist der Lichtstrom pro Flächeninhalt. Dabei gilt: 1 lm/m <sup>2</sup> = 1 lx.
Farbtemperatur	Kelvin (K)	Die Farbtemperatur bezieht sich auf die Temperatur eines schwarzen Körpers (Planckscher Strahler). Im kalten Zustand ist dieser völlig schwarz, beginnt allerdings ab einer Temperatur von etwa 2000K zu glühen. Mit steigender Temperatur verändert der Strahler seine Farbe von rötlich über weiß bis ins bläuliche. Breite Spektren, die keine spezifische Wellenlänge besitzen, werden häufig mit der Farbe und der entsprechenden Temperatur des Strahlers verglichen. Daher spricht man von warmweiß bei Temperaturen unter 3300K, neutralweiß bei 3300-5000K und kaltweiß ab 5000K.
Leuchtdichte $L_v$	cd/m <sup>2</sup>	Die Leuchtdichte ist der Lichtstrom je Fläche und Raumwinkel. Wir empfinden die Leuchtdichteunterschiede als Helligkeitsunterschiede. Je höher die Leuchtdichte, desto heller erscheint uns das Objekt.

Lichtausbeute	lm/W	Die Lichtausbeute ist ein Maß für die Effizienz einer Lichtquelle. Sie ist das Verhältnis vom Lichtstrom zur Lampenleistung.
Lichtstärke $I_v$	Candela (cd)	Die Lichtstärke ist der Lichtstrom, der in einem bestimmten Raumwinkel abgestrahlt wird.
Lichtstrom $\Theta_v$	Lumen (lm)	Der Lichtstrom ist die mit der $V(\lambda)$ -Kurve (spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges) bewertete elektromagnetische Strahlungsleistung und stellt die von einer Lichtquelle abgestrahlte oder von einem Körper reflektierte Lichtleistung dar.

### 3.1.2 Lichtfarben

Das weiße Licht setzt sich aus allen Farben zusammen. Mit einem Prisma kann man die Farben sichtbar machen. Dabei sind die Farben des sichtbaren Lichts abhängig von ihrer Wellenlänge. In Abb. 2 ist das Farbspektrum abgebildet [5].

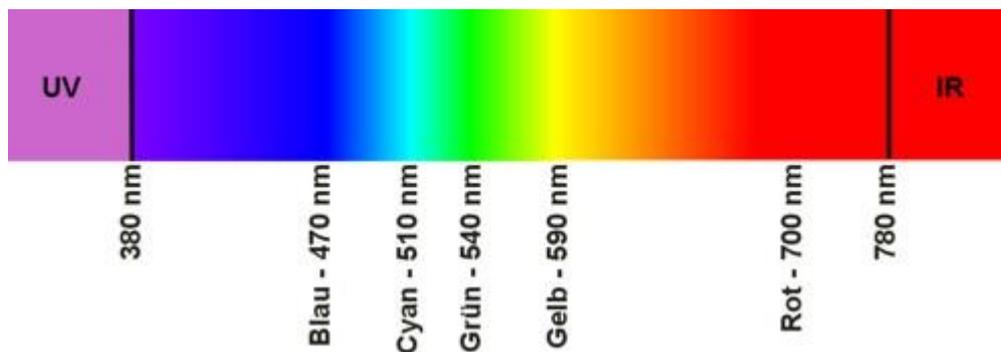


Abb. 2: Farbspektrum des sichtbaren Lichtbereichs (Quelle: PUCHNER, Ronny: Licht und Farbe < Physik < Grundlagen < Fotoschule;. URL <http://www.puchner.org/Fotografie/technik/physik/licht.htm>. – Aktualisierungsdatum: 2012-12-18 – Überprüfungsdatum 2015-02-10)

Der sichtbare Lichtbereich ist vom ultravioletten und infraroten Bereich umschlossen. Im Bereich von ca. 380-500 nm befindet sich der violette bis blaue Bereich. Das Blau geht langsam über Cyan (bei 510 nm) ins Grün (ca. 520-570 nm) über. Durch Erhöhen der Wellenlänge gelangt man über Gelb (bei 590 nm) in den roten Lichtbereich (ca. 620-780 nm).

#### 3.1.2.1 Farbmeterik

Die Lichtfarben lassen sich durch verschiedene Verfahren charakterisieren. Eine Möglichkeit ist das CIE-Normfarbsystem. Dieses System wurde von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE – *Commission internationale de l'éclairage*) definiert und soll eine Relation

zwischen der menschlichen Farbwahrnehmung (Farbe) und der physikalischen Ursache des Farbreizes (Farbvalenz) herstellen [6].

Dabei wird mittels drei verschiedenfarbiger Lampen (rot, grün, blau) eine vorgegebene Farbfläche nachgestellt. Ein Beobachter kann die Lampen so regeln, dass diese drei in ihrer Zusammensetzung die gleiche Wahrnehmung wie die vorgegebene Farbfläche ergeben. Daraus ergeben sich drei Koordinaten, die die Regelung der Lampen widerspiegeln. Dieser Versuch wurde mit mehreren Probanden durchgeführt, welche den gemittelten Beobachter ergeben [2].

Die drei Koordinaten (rot, grün, blau) sind im Koordinatenraum den Koordinaten  $x$ ,  $y$ ,  $z$  gleichzusetzen. Rot wird dabei auf die  $x$ -Achse, grün auf die  $y$ -Achse und blau auf die  $z$ -Achse übertragen.

Die internationale Beleuchtungskommission hat diesen dreidimensionalen Farbraum auf eine 2D-Darstellung reduziert, da die Addition der drei Koordinaten eins ergibt. In Abb. 3 ist die 2D-Farbtafel abgebildet [7].

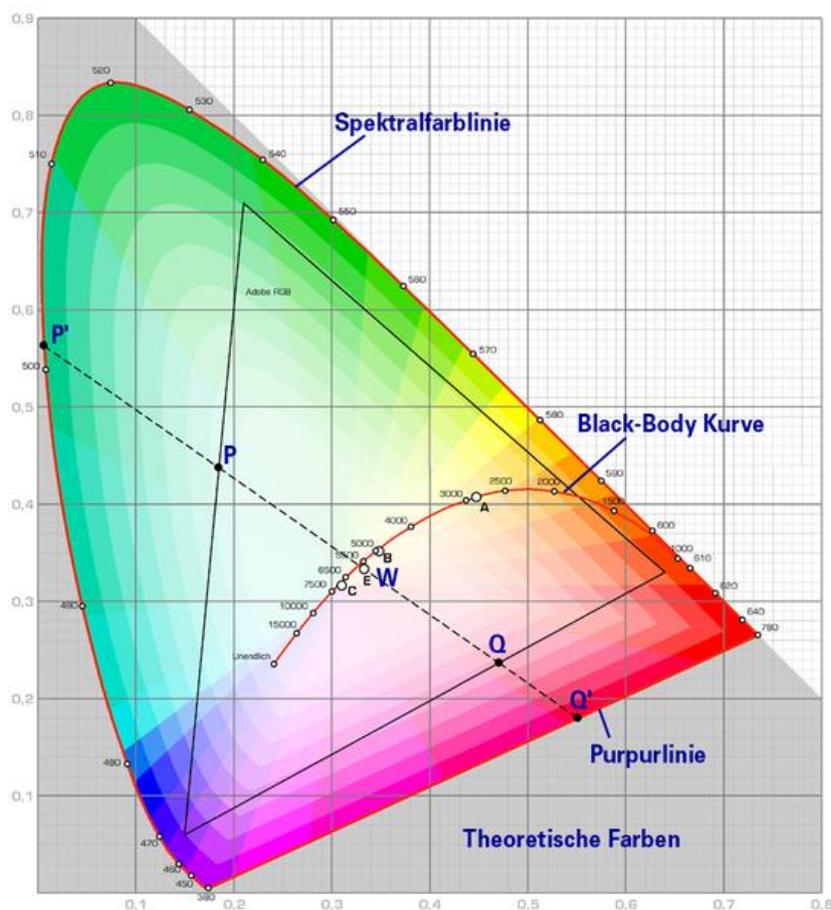


Abb. 3: CIE-Farbtafel nach Din 5033-3

Dabei dient die farbliche Darstellung nur zur Orientierung, da die Darstellung durch die Pixel begrenzt ist. Die 2D-Darstellung wird auch oft als Hufeisen oder Schuhsohle bezeichnet.

### 3.1.2.2 Tagesverlauf des Lichts

Das natürliche Licht der Sonne verändert sich über den Tagesverlauf in der Farbzusammensetzung. Der Grund hierfür ist die Lichtbrechung in der Atmosphäre.

In den frühen Morgenstunden, wenn die Sonne am Horizont aufgeht, werden die kurzwelligeren Lichtwellen, also das blaue Licht, von der Atmosphäre herausgefiltert. Dadurch ist das Licht am Morgen wärmer und rötlicher.

Sobald die Sonne höher steigt, dringt auch das blaue Licht durch die Atmosphäre. Gegen Mittag, wenn die Sonne am höchsten steht, ist der Kontrast zwischen den Farben am größten und somit wird das Licht als weiß angesehen.

Am Abend verhält sich das Licht ähnlich wie am Morgen. Da die Sonne tief steht, wird das blaue Licht durch die Atmosphäre gebrochen und herausgefiltert [8]. In Abb. 4 ist das Spektrum des Sonnenlichts am Morgen/Abend dem Spektrum am Mittag gegenübergestellt.

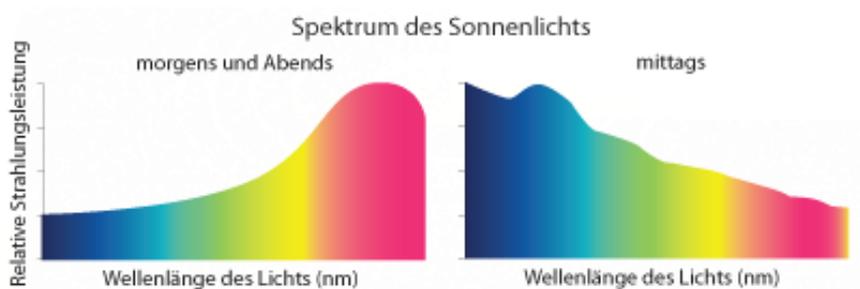


Abb. 4: Vergleich Sonnenlichtspektrum morgens/abends gegenüber mittags (Quelle: Farbwirkungen im Tagesverlauf - Fotografieren in der Praxis - Prophoto Online. URL <http://www.prophoto-online.de/fotopraxis/farbwirkungen-im-tagesverlauf-10000460> – Überprüfungsdatum 2015-02-17)

Die genaueren Lichtverhältnisse, sowie die Intensität sind nicht genau bestimmbar, da dort sehr viele Variable eine Rolle spielen, wie z.B. Höhe, Längen- und Breitengrad, Wetter oder die Jahreszeit.

### 3.1.2.3 Bedeutung der Farben in der Wissenschaft

In der Medizin werden bereits einige Lichtfarben verwendet.

So wird zum Beispiel dem roten und nahinfraroten Licht eine heilende Wirkung nachgesagt. Rotes Licht fördert die Durchblutung und regt somit zur Heilung an [9].

Das blaue Licht kann durch die Nähe zum UV-Bereich schädigend sein und wird häufig zur antibakteriellen Wirkung eingesetzt [9].

Grünes Licht wird oft nicht genauer betrachtet. Jedoch ist bekannt, dass die größte Empfindlichkeit des menschlichen Auges im grünen Bereich liegt. Auch wird grünes Licht oft in anderen Wissenschaften zur Analyse verwendet, wie z.B. in der Spektroskopie.

Das weiße Licht beinhaltet alle Farben des sichtbaren Spektrums und wird als Lichtdusche bei Schlafstörungen verwendet. Entscheidend ist allerdings beim Weißlicht die Farbtemperatur. Dabei ist warmweißes Licht (unter 3300 K) eher rötlich bis gelblich, da der blaue Anteil wenig bis gar nicht vorhanden ist. Je höher der Blauanteil, desto kühler wirkt das Licht. Neutralweißes Licht liegt zwischen 3300 K und 5000 K. Über 5000 K wird das weiße Licht als kaltweiß bezeichnet. Die angegebenen Temperaturen beziehen sich auf einen schwarzen Körper, der mit steigender Temperatur den Farben entsprechend zu glühen beginnt. Dabei wird er blauer, je mehr die Temperatur steigt. Das menschliche Empfinden ist dabei entgegengesetzt. Einen hohen Blauanteil empfinden wir als kalt. Kaltweißes Licht entspricht am ehesten dem Licht der Sonne (6000 K).

### 3.2 Tagesablauf des Menschen

Der Tagesablauf von uns Menschen sieht ziemlich ähnlich aus. Wir stehen auf, gehen zur Arbeit, vertreiben uns den Feierabend mit verschiedensten Dingen und gehen schlafen.

Dabei gibt es Unterschiede im Tagesverhalten. Dem einen fällt es leicht aufzustehen und startet munter in den Tag. Ein anderer wiederum schafft es kaum aus dem Bett und über den Tag wird es kaum besser. Ursache hierfür ist unter anderem das Verhältnis zwischen Serotonin und Melatonin. Diese beiden Hormone sind Botenstoffe im Körper, welche als Gegenspieler wirken, d.h. Melatonin macht uns müde und Serotonin macht uns aktiver [10]. Häufig wird auch vom „circadianen Rhythmus“ gesprochen. Dabei ist „circadian“ lateinisch und heißt grob übersetzt „um den Tag herum“. Das bedeutet, dass es Hormone bzw. Neurotransmitter im Körper gibt, die abhängig von der Tageszeit sind. In Abb. 5 ist der circadiane Rhythmus von Serotonin und Melatonin abgebildet [11].

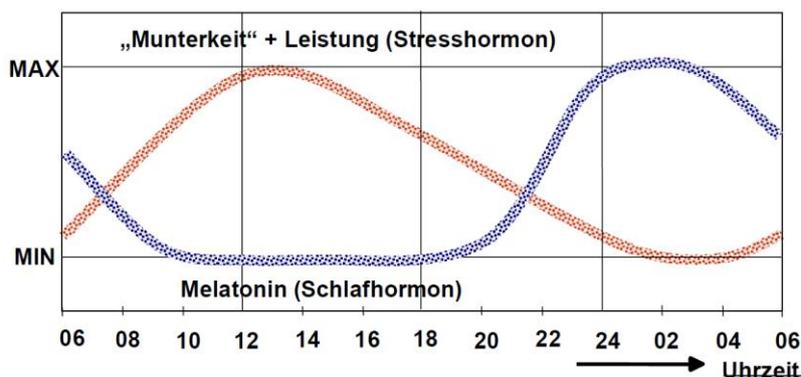


Abb. 5: Circadianer Rhythmus von Melatonin und Serotonin (Quelle: DIPL.-ING. RICHTER, HaJo: Gesundes Wohnklima : Lichtemotionen; Tageslichtnutzung; Beleuchtung. Stuttgart, 18.07.2006. URL [http://www.bubw.de/PDF\\_Dateien/News/2006/07\\_Juli/Vortrag\\_Richter.pdf?lvl=-](http://www.bubw.de/PDF_Dateien/News/2006/07_Juli/Vortrag_Richter.pdf?lvl=-) Überprüfungsdatum 2015-01-19

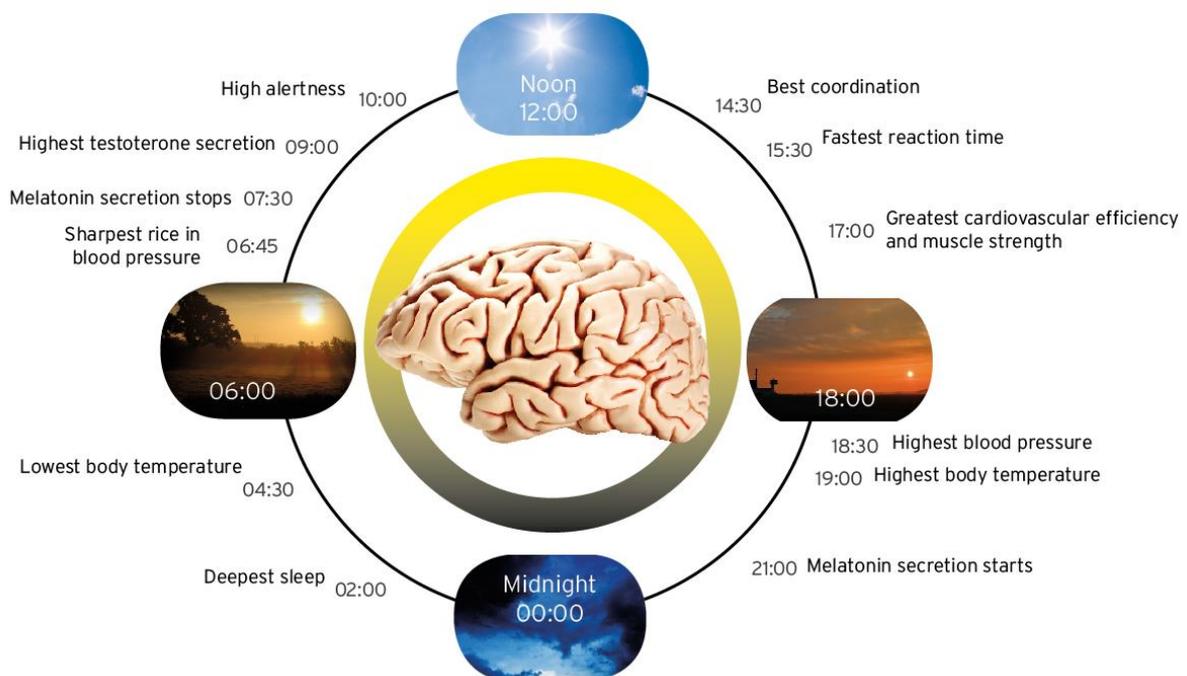
Zu erkennen ist hierbei, dass am Tage die Konzentration von Serotonin am höchsten ist und Melatonin sehr gering. Dagegen ist die maximale Konzentration von Melatonin in der Nacht vorzufinden.

Wir fühlen uns am Tage müde, wenn die Konzentration von Melatonin zu hoch oder Serotonin zu niedrig ist.

### 3.2.1 Einwirkung des Lichts auf den Tagesablauf

Das Licht hilft uns dabei in den Tag zu starten. Die Reize des Lichts nehmen wir durch unsere Augen auf, dabei ist es egal, ob diese offen oder geschlossen sind. Bei Sonnenaufgang nehmen die Augen den ersten Reiz auf, die Produktion des Neurotransmitters Melatonin wird gesenkt und im Gegenzug startet die Produktion von Serotonin.

Dabei ist die Serotoninproduktion abhängig vom Tag. Ist es bewölkt und somit dunkler, wird weniger Serotonin freigesetzt und dafür mehr Melatonin. Abends wenn die Sonne unter geht, wird das ganze umgedreht, die Serotoninproduktion wird gestoppt und Melatonin ausgeschüttet. In Abb. 6 ist der Tagesrhythmus im Zusammenhang mit der Tageszeit an einem Sommertag abgebildet [12].



Zu erkennen ist, dass nach Sonnenaufgang die Melatoninausschüttung (7:30Uhr) gestoppt wird und nach Sonnenuntergang (21:00) wieder aufgenommen wird. Auffällig ist, dass wir gegen Nachmittag, nachdem die Sonne ihren höchsten Stand erreicht hat, die beste Koordination und die schnellste Reaktionszeit haben [12].

Im Winter bemerken wir oft die Müdigkeit durch die erhöhte Melatoninabgabe. Ist es draußen trüb, dann fühlen wir uns müde und schlapp.

In Abb. 7 sind Kenngrößen verschiedener Lichtverhältnisse aufgeführt [11].

Sonnenschein	100.000 Lux	↑ Synchronisation der biologischen Uhr Circadiane Effekte
Bedeckter Himmel im Sommer	ca. 20.000 Lux	
Im Schatten bei Sonne	10.000 Lux	
Beginn „biologischer Wirksamkeit“	2.500 Lux	↑ „Biolo- gische Dunkel- heit“
Sommertag im Büro am Fenster	ca. 2.000 Lux	
Empfohlen für Büroarbeitsplätze	500 Lux	
Empfohlen für Unterrichtsräume	300 Lux	
Straßenbeleuchtung	10 - 20 Lux	
Mondschein	0,1 Lux	

Beleuchtungs-  
stärken zur  
Bewältigung  
der  
Sehaufgabe  
nach Normen  
und  
Vorschriften

Abb. 7: Kennwerte verschiedener Lichtverhältnisse (Quelle: DIPL.-ING. RICHTER, HaJo: Gesundes Wohnklima : Lichtemotionen; Tageslichtnutzung; Beleuchtung. Stuttgart, 18.07.2006. URL [http://www.bubw.de/PDF\\_Dateien/News/2006/07\\_Juli/Vortrag\\_Richter.pdf?lvl=-](http://www.bubw.de/PDF_Dateien/News/2006/07_Juli/Vortrag_Richter.pdf?lvl=-) Überprüfungsdatum 2015-01-19

Von großer Bedeutung ist vor allem der Wert für den Beginn der biologischen Wirksamkeit. Ab 2500 Lux werden die Reize weitergeleitet und es wird Serotonin produziert, man spricht dann auch von der Synchronisation der inneren Uhr [11]. Alle Werte darunter bewirken nichts bzw. bewirken das Gegenteil, indem vermehrt Melatonin freigesetzt wird. Im Winter wird der Wert für die biologische Wirksamkeit oft nicht erreicht.

### 3.2.2 Störungen des Tagesablaufs

Es ist aber auch nicht nur die natürliche Beleuchtung der Sonne, von der wir uns beeinflussen lassen. Andere Einflüsse erschweren es uns, dem natürlichen Rhythmus der Sonne zu folgen. Einige Beispiele werden hier erläutert.

### 3.2.2.1 Schichtarbeit

Die Schichtarbeit ist ein typisches Beispiel dafür, dass unser Körper aus dem Rhythmus gerät. Ein Schichtarbeiter lebt gegen seine innere Uhr: Schlafen muss er, wenn der Körper aktiv ist und arbeiten muss er, wenn der Körper seinen Schlaf verlangt [13].

Wer am Tag schläft, „schläft in der Regel kürzer, weniger tief und allgemein störanfälliger [13].“ Daher ist der Schlaf am Tage weniger erholsam, wie der in der Nacht. Hinzu kommen Leistungsbeeinträchtigungen, sowie ein erhöhtes Unfallrisiko durch Übermüdung.

Durch die dauerhaften Schichtarbeiten können vielerlei Symptome auftreten, wie Konzentrationsschwäche, Nervosität, vorzeitige Ermüdung, sowie Appetitlosigkeit und Magenbeschwerden. Außerdem existieren Hinweise darauf, dass Schichtarbeit auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen begünstigt und durch eine soziale Isolation können auch psychische Probleme auftreten [13].

### 3.2.2.2 Reisen

Seit dem es so gut wie jedem möglich ist zu reisen, reist der Mensch öfter und viel weiter. Ein Problem gibt es dabei jedoch: der Jetlag.

Der Jetlag ist ein Phänomen, welches die innere Uhr aus dem Gleichgewicht bringt. Dabei sind vor allem Reisen entlang der Ost-West-Achse problematisch.

Zeitzone sorgen dafür, dass es in Los Angeles 8 Stunden eher und in Shanghai 8 Stunden später als in Berlin ist.

Die Reisen in Richtung Osten sind unangenehmer als die Reisen nach Westen und sind häufiger mit einem Jetlag verbunden. Gefühlt verliert der Mensch gen Osten Zeit und gen Westen gewinnt er sie [14].

Fliegt man nach Westen ist der Tag um ein paar Stunden länger, was der Körper und somit die innere Uhr besser verkraften können, indem man abends nach der aktuellen Zeitzone ins Bett geht. Gen Osten hinkt die innere Uhr allerdings der Zeit hinterher. Da die innere Uhr verzögert reagiert, ist die Aufgabe der Synchronisation doppelt schwer. In Tab. 3 ist die geschätzte Dauer für die Anpassung verschiedener Ortszeiten (Zeitzone) dargestellt [14].

*Tab. 3: geschätzte Dauer des Jetlags (WATERHOUSE, James M. ; MINORS, David S. ; WATERHOUSE, Maureen E.: Die innere Uhr : Mit ihr leben - und nicht gegen sie. Bern, Göttingen, Toronto, Seattle : Huber, 1992)*

Flüge in Richtung Westen		Flüge in Richtung Osten	
überquerte Zeitzone	Dauer des Jetlags	überquerte Zeitzone	Dauer des Jetlags
0-3	0	0-2	0
4-6	1-3	3-5	1-5
7-9	2-5	6-8	3-7
10-12	2-6	9-11	4-9

Der Jetlag ist zu erkennen durch Symptome, wie Übermüdung, Bauchschmerzen, Verdauungsstörungen, Kopfschmerzen und Konzentrationsstörungen [14].

### 3.2.2.3 Lichtverschmutzung

Auch das Licht selbst kann uns den Tagesablauf erschweren. Vor allem in größeren Städten ist nachts das fehlerhafte Einsetzen von Licht bemerkbar. Dort ist oft so hell, dass wenig bis keine Sterne sichtbar sind und gerne wird davon gesprochen, dass die Stadt nie schläft. Man spricht dabei vom Lichtsmog. In Abb. 8 ist die starke Straßenbeleuchtung im Vergleich zur Nacht ohne Straßenbeleuchtung dargestellt.

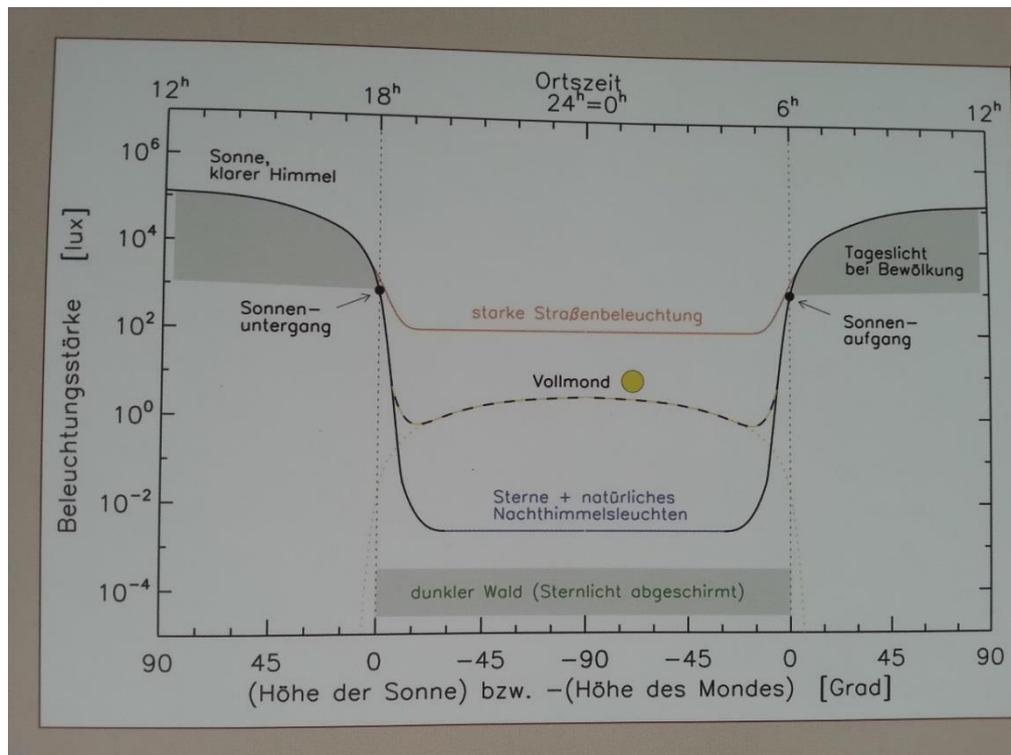


Abb. 8: Vergleich nächtliche Beleuchtung (Quelle: POSCH, Thomas ; HÖLKER, Franz ; FREYHOFF, Anja ; UHLMANN, Thomas: Das Ende der Nacht : Lichtsmog: Gefahren- Perspektiven- L@ösungen. 2. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013)

Zu erkennen ist hierbei, dass die Straßenbeleuchtung viel heller ist, als die natürliche Beleuchtung durch die Sterne. Außerdem ist die Nacht mit Straßenbeleuchtung nicht viel dunkler gegenüber dem Sonnenuntergang. Dies erklärt, weshalb häufig Stadtbewohner einen unruhigen Schlaf besitzen [15].

Weitere Probleme entstehen durch die Nutzung der neuzeitigen Erfindungen, wie Fernseher, Handy und Computer. Viele Schlafwissenschaftler sind gegen eine Nutzung dieser Geräte vor dem Schlafengehen. Die Helligkeit sowie ein hoher Blauanteil blockieren die Melatoninausschüttung; wir schlafen dann oft sehr spät und unruhig [15].

Das Arbeiten am Arbeitsplatz wirkt sich häufig ebenfalls auf die Müdigkeit aus. Die Beleuchtung in Büros ist oft zu dunkel (ca. bei 300-500 Lux) und ein effektives Arbeiten ist durch die entstehende Müdigkeit selten möglich.

Daher ist es besonders wichtig das Licht gezielter einzusetzen und auf unnötige Beleuchtung zu verzichten.

### 3.3 In vitro Modellsysteme

Der Mensch ist wissenschaftlich betrachtet ein komplexes System bestehend aus Sinnesorganen, welche es erschweren, erste Versuche bezüglich des Verhaltens gegenüber Licht zu machen. Eine Alternative ist durch in vitro Modellsysteme gegeben.

Die Modelle stehen für unterschiedliche Funktionen im Körper, welche durch entsprechende Zellkulturen wiedergegeben werden. Die Zellkulturen können humanen, tierischen oder pflanzlichen Ursprungs sein. Im Allgemeinen bezeichnet eine Zellkultur die Kultivierung von Zellen außerhalb des Organismus („*in vitro*“) auf entsprechendem Nährboden und unter definierten Bedingungen, die den physiologischen Wachstumsbedingungen nachempfunden sind.

Die Zelle ist die kleinste lebende Einheit eines Organismus. Sie geben in vitro Aufschluss über den Zellstoffwechsel, Morphologie, Zellzyklus u.a., welche durch Einflüsse verändert sein können. Dadurch lassen sich erste Auswirkungen beobachten. Sie spiegeln jedoch als Modellsystem nur eine begrenzte Anzahl an Eigenschaften des menschlichen Körpers wieder und stellen somit ein beschränktes Abbild der Wirklichkeit dar. Um einen ersten Eindruck der Lichteinflüsse zu erhalten, reicht dieses Abbild aus.

Zur Kultivierung dienen Plastikschaalen oder Flaschen, die Kulturmedien mit Wachstumsfaktoren und Nährstoffen enthalten.

Die Ansprüche an das Zellkulturmedium unterscheiden sich von Zelllinie zu Zelllinie. Dabei muss „eine Umgebung geschaffen werden, die Proliferation, Wachstum und, wenn nötig, Differenzierung und Ausübung von typischen Zellfunktionen erlauben“ [16]. Die Zellkulturmedien bestehen aus Aminosäuren, Vitaminen, Salzen, fetales Kälberserum, anorganische Puffersubstanz (meist  $\text{NaHCO}_3$ ) und sonstige Substanzen, wie z.B. Antibiotika [16].

Es wird unterschieden in Primärkulturen, die direkt aus dem Gewebe gewonnen werden und durch eine finite Lebensdauer gekennzeichnet sind, und infinite Zellkulturen, deren Zellen sich unendlich teilen können und somit scheinbar unsterblich sind. Ein großer Teil infiniter Kulturen entstehen aus Tumorzellen, die nur noch sehr wenige in-vivo-Eigenschaften besitzen.

Die Art des Wachstums ist ein weiteres Unterscheidungskriterium. Adhärente Zellen wachsen an der Oberfläche des Kulturgefäßes, zumeist als Monolayer. Nicht adhärente

Zellen hingegen werden als Suspensionskultur, d.h. frei schwimmend im Nährmedium, gehalten [17].

Aufgrund des Teilungsvermögens einer jeden Zelle, steigt die Zellzahl exponentiell an [16]. Nehmen adhärente Zellen die Wachstumsfläche der Kulturschale vollständig ein, wachsen sie in der Regel nicht mehr weiter und es kann sogar zum Absterben der Kultur führen. Daher müssen die Zellen auf enzymatischem (Trypsin, Accutase etc.) oder mechanischem (Shake off-Verfahren, Abschaben etc.) Wege von der Oberfläche des Kulturgefäßes abgelöst werden, mit Nährmedium verdünnt und in ein neues Kulturgefäß überführt werden. Diesen Vorgang nennt man Subkultivierung bzw. Passagieren. Es ist üblich, Zelllinien nur bis zu einer bestimmten Passage zu verwenden, da sie sonst ihre spezifischen Eigenschaften verlieren [17].

Die Haut ist das größte menschliche Organ, welches einer hohen Lichtintensität ausgesetzt ist. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit eine Zelllinie der humanen Keratinozyten betrachtet.

### **Keratinozyten**

Eine humane Zelllinie der Keratinozyten ist die HaCaT Zelllinie. HaCaT ist eine Abkürzung und steht für „*Human adult low Calcium high Temperature*“ und es handelt sich um eine permanente, epitheliale humane Zelllinie. Sie wird als nicht tumorigen eingestuft [18].

Diese Zelllinie entstammt aus dem Randgebiet eines primären malignen Melanoms aus der oberen Rückenhaut eines 62jährigen Patienten [19].

Für diese Zelllinie ist es charakteristisch, dass sie ihre Differenzierungsfähigkeit zu Korneozyten beibehalten. Dabei spielt der Calciumgehalt eine große Rolle. Eine niedrige Calciumkonzentration ( $<0,1$  mM) unterstützt die Bildung eines adhärenen Monolayers proliferierender Keratinozyten [18].

Als Vorteil der HaCaT-Zellen ist die hohe Immortalität ( $>140$  Passagen möglich) anzusehen. Des Weiteren sind ihre Eigenschaften den NHK-Zellen (normal adult human Keratinozyten = native Keratinozyten) ähnlich [18]:

- a) bilden ein Monolayer
- b) gleiche phänotypische Morphologie
- c) Ähnlichkeiten in der Zelladhäsion, Zellinteraktionen und in der Reaktion auf zytotoxische Ereignisse

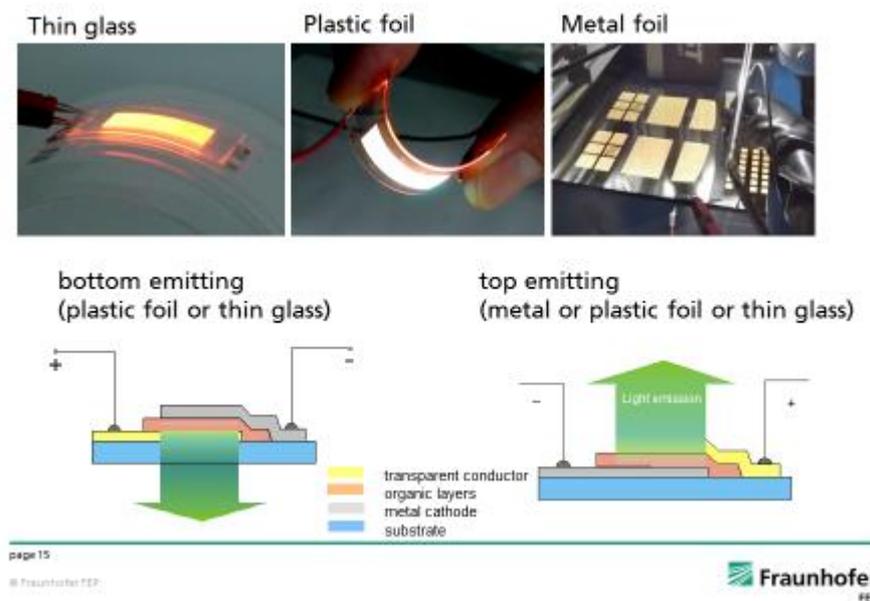
HaCaT-Zellen weisen im Wesentlichen die Eigenschaften von basalen epidermalen Keratinozyten auf und bilden somit das in vitro-Modell für die oberste Hautschicht [20].

## 4 Material, Geräte und Methoden

### 4.1 OLED

Eine relativ junge Technologie in der Beleuchtungsbranche ist die Herstellung von OLEDs. Das sind organische LEDs, die sich durch folgende Eigenschaften auszeichnen:

- Sie sind Flächenlichtquellen herstellbar auf Glas, Dünnglas, Plastik- oder Metallfolie. (herstellbar auf Dünnglas, Plastik- oder Metallfolie; siehe Abb. 9)



- Sie sind dünn, leicht und z.T. flexibel.
- Sie weisen ein sonnenähnliches Spektrum auf.
- Sie können das Licht in verschiedene Richtungen emittieren (durch das Substrat-bottom- und vom Substrat weg-top emitting).
- Sie zeichnen sich durch geringen Stromverbrauch aus.
- Es ist keine zusätzliche Kühlung notwendig.

In Abb. 10 ist eine opake OLED zu sehen, die am Fraunhofer FEP erfolgreich hergestellt wurde und für die Versuche verwendet wird.



*Abb. 10: weiße opake Tabola OLED mit COMEDD Signatur*

In Anhang 15 befindet sich ein Datenblatt der Tabola OLED.

Ein mögliches Einsatzgebiet für die OLED ist die Medizin. Zum Beispiel ist die unterstützende Wirkung in der Wundheilung mit Licht bekannt. Daher sollen die Auswirkungen des OLED-Lichts auf die menschliche Zelle untersucht werden. Im Folgenden wurde eine Auswahl an OLED-Leuchtquellen getroffen, die einen Einsatz finden könnten.

#### **4.1.1 Auswahl OLED**

In diesem Kapitel werden die ausgewählten OLEDs charakterisiert. Es wurden aus dem Bestand des Fraunhofer FEP Tabola Module ausgesucht. Die Tabola ist eine OLED aus starrem Glas mit Glas verkapselt. Diese OLEDs wurden ausgewählt, um das Lichtspektrum vollständig zu untersuchen, aber die Parameter dennoch gering zu halten.

##### **4.1.1.1 Blaue OLED**

Blaues Licht ist für seine antibiologische Wirkung bekannt, allerdings kann es auch menschliche Zellen schädigen, wenn der kurzwellige Blauanteil (nahe UV-Bereich) zu groß ist. Daher sollte das blaue Licht der OLED nicht schädigend wirken, was ein Teil der Versuche bilden wird. In Abb. 11 ist das Spektrum der blauen OLED bei 300 cd/m<sup>2</sup> vermessen dargestellt.

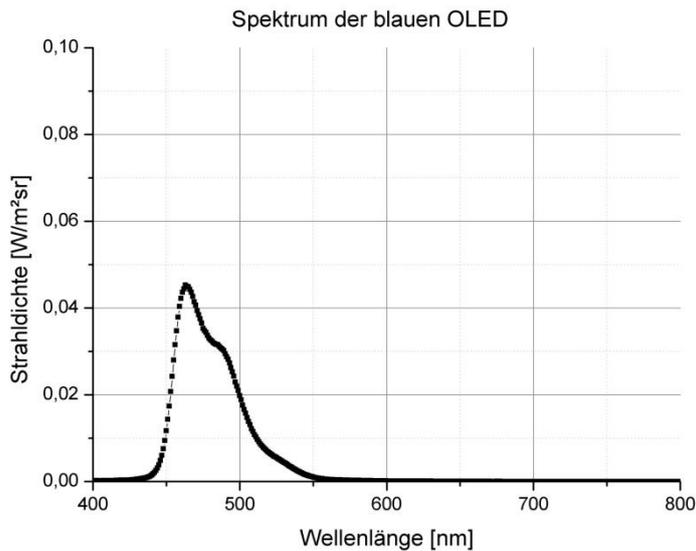


Abb. 11: Spektrum der blauen OLED

Die blaue OLED hat einen Spektralbereich von ca. 450 nm bis ca. 550 nm. Der organische Emitter hat sein Maximum bei 463 nm. Ein weiteres lokales Maximum existiert bei 483 nm. Zu erkennen ist, dass der Bereich kontinuierlich ist und die Ränder steil abfallen, d.h. die Übergänge sind deutlich zu erkennen.

In Abb. 12 ist die Abhängigkeit der Leuchtdichte zum Strom dargestellt.

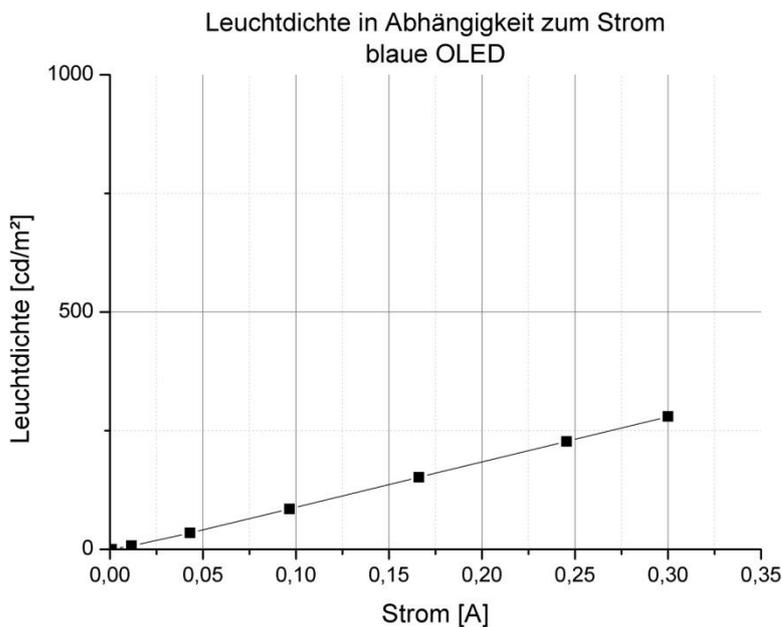


Abb. 12: Leuchtdichte in Abhängigkeit vom Strom

Diese Darstellung ist für den Versuchsaufbau relevant. Zu erkennen ist, dass die Leuchtdichte sehr gering ist und somit die OLED mit einem höheren Strom betrieben werden muss, um eine gute Leuchtdichte für die Versuche zu erreichen. Weitere Grafiken befinden sich in Anhang 1.

#### 4.1.1.2 Grüne OLED

Grünes Licht wird bisher in wissenschaftlichen Bereichen wenig betrachtet. Jedoch reagiert das menschliche Auge am empfindlichsten auf grüne Strahlung. Daher werden auch Versuche mit grünem Licht durchgeführt, um eine eventuelle Sensibilität der menschlichen Zellen nachzuweisen. In Abb. 13 ist das Leuchtspektrum der grünen OLED bei  $3800 \text{ cd/m}^2$  vermessen dargestellt.

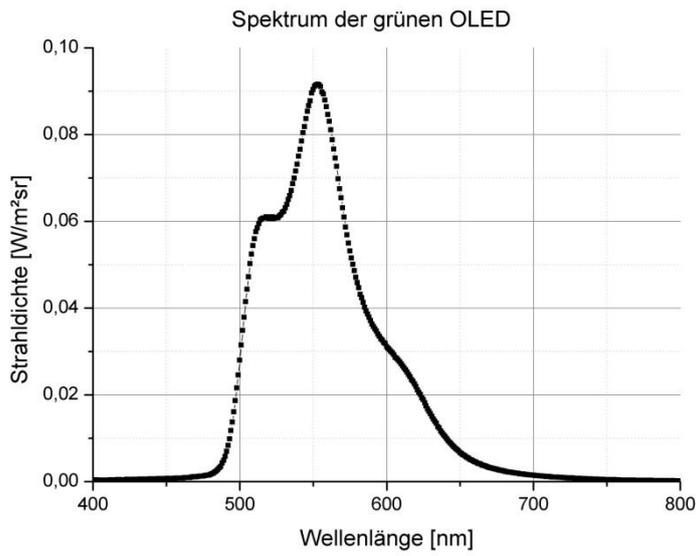


Abb. 13. Leuchtspektrum der grünen OLED

Bei der grünen OLED werden zwei verschiedene organische Emitter verwendet, um eine hohe Leuchtintensität zu erreichen. Das Spektrum reicht von ungefähr 480 nm bis 700 nm. Das globale Maximum liegt hier bei 551 nm. In Abb. 14 ist die Leuchtdichte der grünen OLED in Abhängigkeit zum Strom dargestellt.

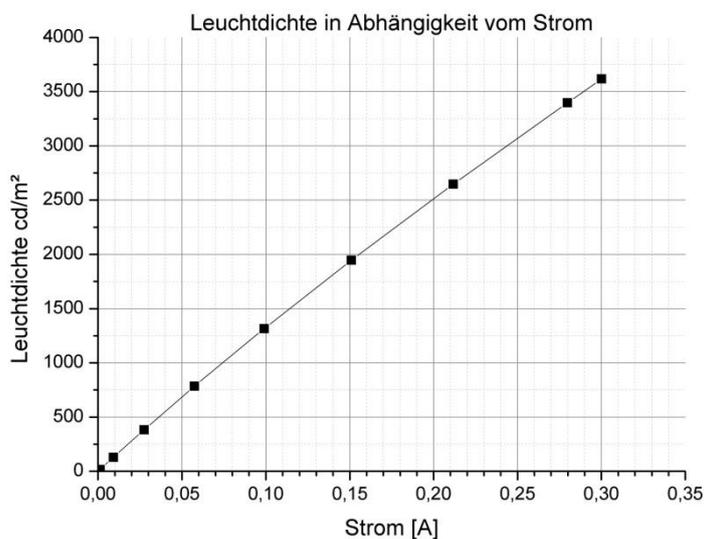


Abb. 14: Leuchtdichte in Abhängigkeit zum Strom der grünen OLED

Es ist zu erkennen, dass die OLED eine sehr gute Effizienz hat, da weniger Strom benötigt wird, um eine hohe Leuchtdichte zu erzeugen. In Anhang 2 befinden sich weitere Grafiken.

#### 4.1.1.3 Orange OLED

Oranges Licht ist nahe dem roten Bereich und kann somit auch eine heilende Wirkung haben. Das Spektrum der orangen OLED bei  $788 \text{ cd/m}^2$  vermessen, ist in Abb. 15 zu sehen.

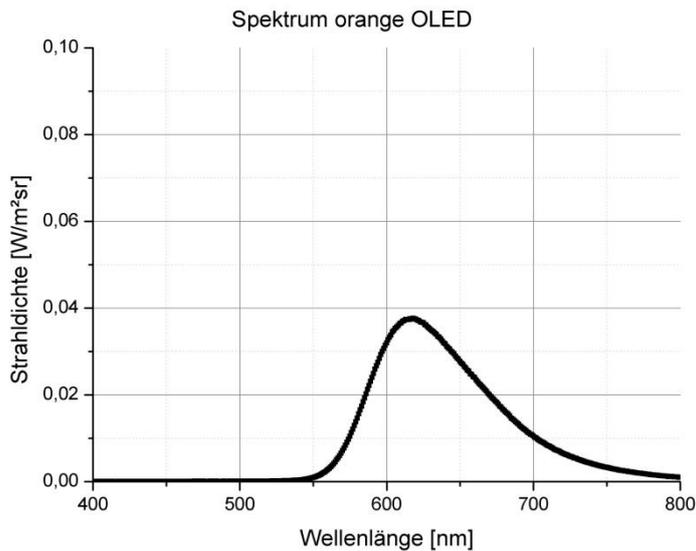


Abb. 15: Lichtspektrum der orangen OLED

Das Spektrum beginnt im gelben Lichtbereich und geht über bis ins rote Licht. Daher wirkt das Licht der OLED orange und der rote Anteil kann zur Wundheilung nützlich sein. Das Maximum liegt bei 616 nm. Die Leuchtdichte gegenüber dem Strom ist in Abb. 16 zu sehen.

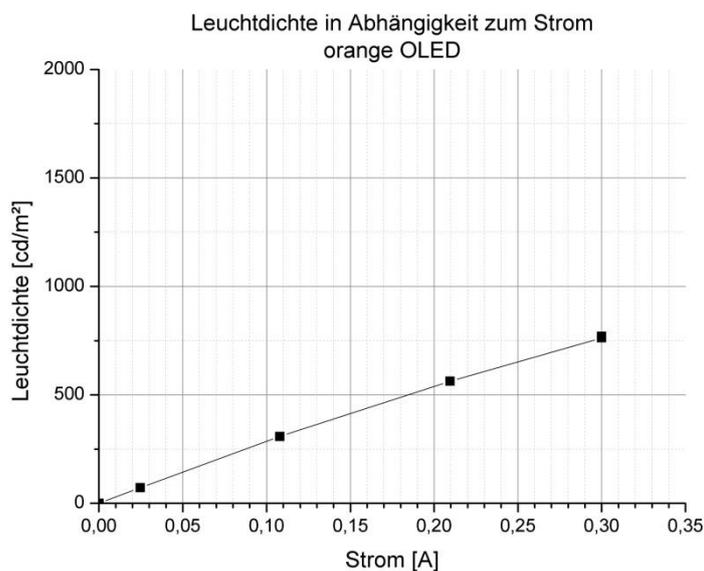


Abb. 16: Leuchtdichte in Abhängigkeit zum Strom der orangen OLED

Die Effizienz ist geringer als die der grünen OLED. In Anhang 3 sind weitere charakteristische Diagramme zu finden.

#### 4.1.1.4 Warmweiße OLED

Man spricht von warmweißem Licht, wenn die Farbtemperatur des weißen Lichts unter 3300 K ist. Dabei wirkt das Licht gelblich bis rötlich, da der Blauanteil sehr gering ist. Die Farbtemperatur der OLED wurde mit Hilfe der Ulbrichtkugel ermittelt und liegt bei 3200 K. In Abb. 17 ist das Lichtspektrum bei 2000 cd/m<sup>2</sup> vermessen, der warmweißen OLED abgebildet.

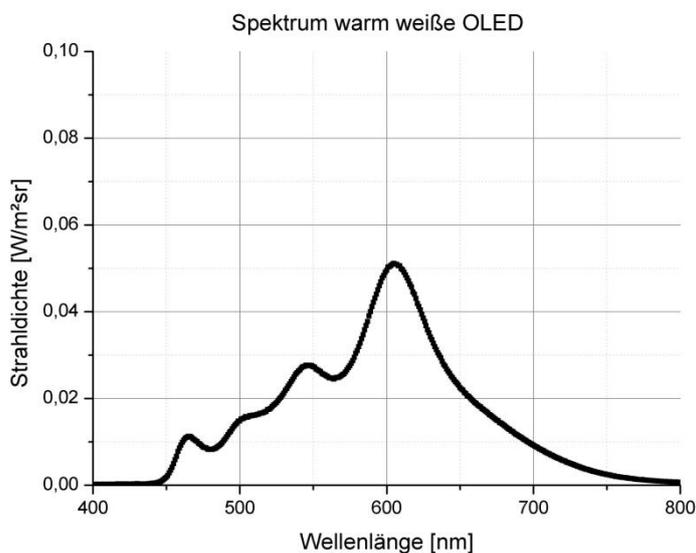


Abb. 17: Lichtspektrum der warmweißen OLED

Die warmweiße OLED enthält drei verschiedene Emittoren: blau, grün und orange. Dabei ist die Intensität des blauen Emittors wesentlich geringer als die Intensität des Roten. Der rote bzw. orange Emittor erzeugt ein globales Maximum bei 603 nm. Der grüne Emittor hat zwei lokale Maxima bei 500 nm und 543 nm. Das lokale Maximum des blauen Emittors liegt bei 463 nm. Zur Ermittlung, welcher Strom für eine bestimmte Leuchtdichte benötigt wird, ist die Abhängigkeit in Abb. 18 dargestellt.

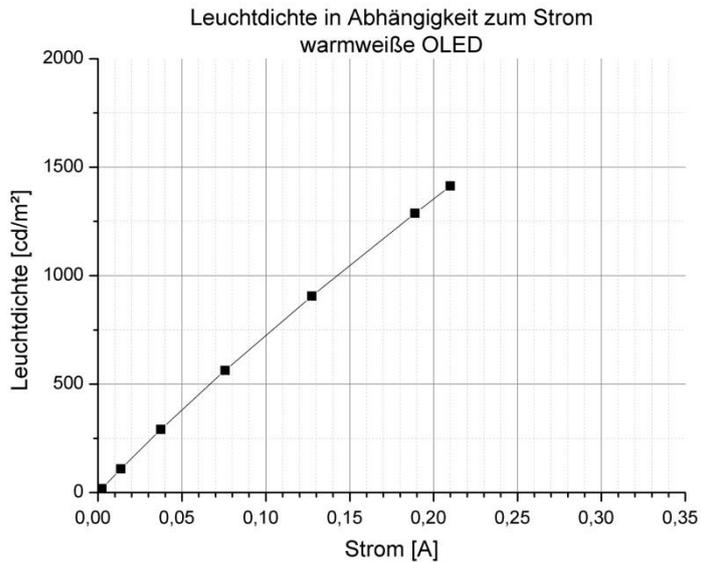


Abb. 18: Leuchtdichte in Abhängigkeit des Stroms der warmweißen OLED

Weitere charakterisierende Grafiken sind in Anhang 4.

#### 4.1.1.5 Kaltweiße OLED

Die kaltweiße OLED hat eine Farbtemperatur von 3360 K und liegt somit genaugenommen im neutralweißen Bereich. In Abb. 19 ist das Leuchtspektrum der kaltweißen OLED gemessen bei 1230 cd/m<sup>2</sup> dargestellt.

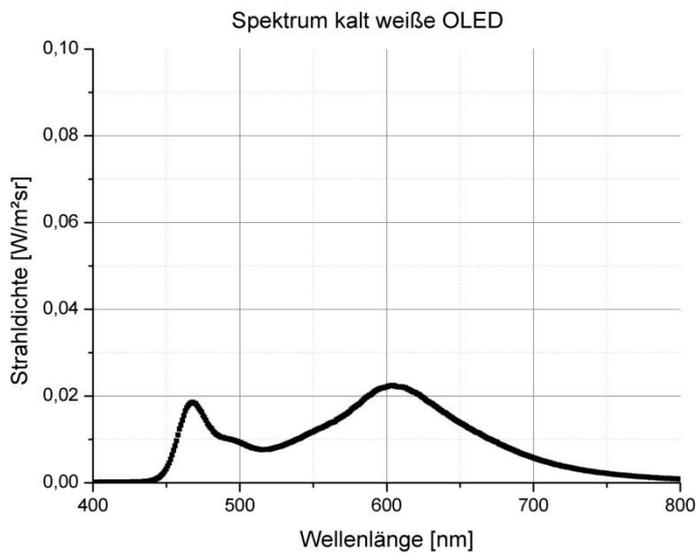


Abb. 19: Leuchtspektrum der kaltweißen OLED

Es ist zu erkennen, dass der rote Emitter sowie der blaue Emitter nahezu identische Strahldichten erzeugen. Daher wirkt das Licht kühler als bei der warmweißen OLED. Daher wird diese OLED als kaltweiß bezeichnet. Das globale Maximum liegt im roten Bereich bei

603 nm. Der blaue Emitter erzeugt ein lokales Maximum bei 468 nm. Die Leuchtdichte ist in Abhängigkeit zum Strom in Abb. 20 dargestellt.

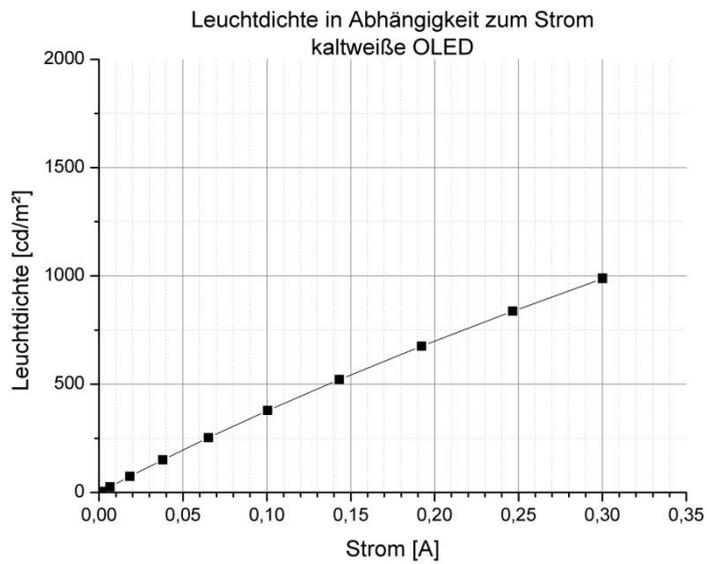


Abb. 20: Leuchtdichte in Abhängigkeit zum Strom der kaltweißen OLED

Weitere charakteristische Grafen befinden sich in Anhang 5.

## 4.2 Zellkultivierung

Die HaCaT-Zellen wachsen in Zellkulturflaschen mit Belüftungskappe (Greiner bio-one) heran, die eine Wachstumsfläche von 25 bzw. 75 cm<sup>2</sup> haben. Das Füllvolumen des Zellkulturmediums entspricht 5 bzw. 15 ml.

Die Inkubation erfolgt in einem CO<sub>2</sub>-Inkubator bei 37 °C, ca. 95 % Luftfeuchtigkeit und 5 % Kohlenstoffdioxid.

Alle zellbiologischen Schritte sowie alle notwendigen Hilfsmittel müssen unter sterilen Bedingungen durchgeführt werden, um eine Kontamination und somit den Zelltod zu verhindern. Des Weiteren sind Medium, Puffer und Trypsin im Wasserbad auf 37 °C vorzutemperieren.

Im Nährmedium befindet sich ein Farbindikator (Phenolrot) [16]. Sobald sich dieser von Rot nach Gelb verfärbt, ist dies ein Indiz, dass die Nährstoffe im Medium verbraucht sind und die Zellen stellen ihr Wachstum ein. Um dies zu verhindern, wird das verbrauchte Medium abgesaugt und frisches Medium entsprechend dem Füllvolumen hinzugefügt.

Bedecken die Zellen die gesamte Wachstumsfläche (konfluenten Monolayer) werden sie umgesetzt (passagiert). Dabei werden die Zellen zunächst mittels Puffer (PBS) gewaschen. Des Weiteren enthält der Puffer EDTA, welcher die Zell-Zell-Kontakte lösen soll. Bei HaCaT-Zellen ist dieser Kontakt sehr stark ausgeprägt, weshalb der Puffer 15-20 min im Inkubator einwirken muss. Das Aufbrechen der Kontakte kann unter einem Lichtmikroskop beobachtet werden. Beim Puffer ist darauf zu achten, dass dieser nicht zu lange einwirkt, da dieser mit der Zeit auch die Zellen vom Flaschenboden ablöst.

Nach der Einwirkzeit wird der Puffer vorsichtig abgesaugt und eine Trypsinlösung wird hinzugegeben. Trypsin ist eine alkalische Pankreasprotease aus den Bauchspeicheldrüsen von Rindern oder Schweinen [16], welche die Zell-Matrix-Verbindungen andaut, d.h. die Zellen lösen sich von der Kulturunterlage. Die Flasche wird vorsichtig geschwenkt, sodass das Trypsin sich verteilt und wird dann für ca. 5 min im Inkubator temperiert. Eine längere Einwirkzeit kann die Zellen schädigen. Nach dem Einwirken, wird das Trypsin mit der doppelten Menge Medium abgestoppt. Diese Suspension wird nun in ein Zentrifugenröhrchen pipettiert und 5 min bei 900 rpm zentrifugiert. Nun befindet sich ein Zellpellet am Boden des Röhrchens und das Trypsin-Mediumgemisch kann vorsichtig abgesaugt werden. Das Zellpellet wird dann in frisches Medium resuspendiert. Durch Bestimmung der Zellzahl kann die gewünschte Zellkonzentration durch Verdünnung mit Nährmedium erstellt werden und in eine neue Zellkulturflasche überführt werden.

Die entsprechenden Volumina sowie die Zusammensetzung der Lösungen zur Zellkultivierung befinden sich in Anhang 6.

## 4.3 Zellbiologische Methoden

### 4.3.1 Lichtmikroskopie

Zur Untersuchung der Zellvitalität und Zellmorphologie sowie zur Überprüfung, ob eine Kontamination vorliegt, werden die Zellen in den Zellkulturgefäßen mit Hilfe eines Lichtmikroskops täglich begutachtet. Dabei wird bei 100-facher Vergrößerung die gesamte Wachstumsfläche betrachtet. Es kann das Aussehen der Zellen, die Konfluenz (Zelldichtigkeit) sowie Zellreste (Zellschrott) von toten Zellen beurteilt werden.

Für spätere Vergleiche können mit Hilfe der am Mikroskop angebrachten Kamera und der speziellen PC-Software (Motic Images Plus 2.0) Einzelbilder der Proben aufgenommen werden.

### 4.3.2 Zellzahl

Die Zellzahl kann mit Hilfe einer Neubauer-Zählkammer bestimmt werden. Dazu müssen die Zellen durch Ablösen in Suspension gebracht werden.

Die Zählkammer sowie das Deckgläschen sind mit Ethanol zu reinigen. Dann wird die Zählkammer durch Anhauchen befeuchtet und das Deckgläschen auf die Seitenstege gedrückt, sodass Newtonringe entstehen. Diese zeigen an, dass das Deckgläschen richtig befestigt ist und die richtige Tiefe des Mittelsteges (0,1 mm) eingestellt ist.

Nun wird die Zellsuspension mit Hilfe einer Pipette an den Rand des Deckgläschens pipettiert. Durch die Kapillarkräfte wird die Suspension in den Zwischenraum zwischen Deckglas und Zählkammer gesaugt. Unter einem Lichtmikroskop mit 100-facher Vergrößerung kann nun die Zellzahl bestimmt werden. In Abb. 21 ist das Schema der Zählkammer zu finden [16].

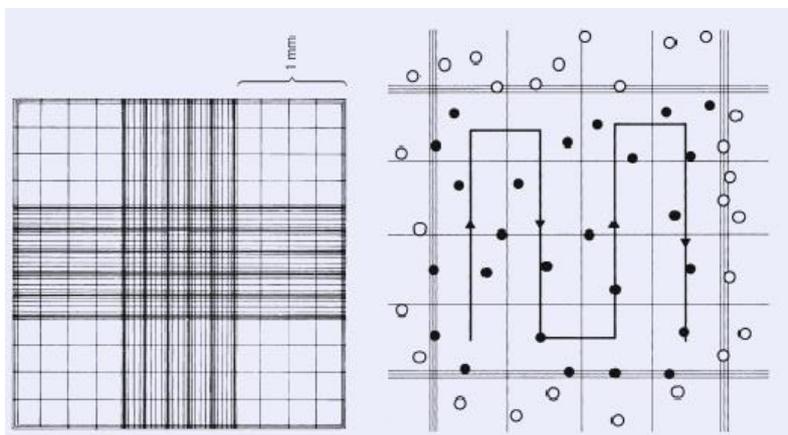


Abb. 21: Neubauer Zählkammer; links: Netzeinteilung der Zählkammer; rechts: Schema zum Auszählen (Quelle: LINDL, Toni: Zell- und Gewebekultur : Einführung in die Grundlagen sowie ausgewählte Methoden und Anwendungen. 5., überarb. und erw. Aufl. Heidelberg, Berlin : Spektrum, Akad. Verl., 2002)

Die Zählkammer besteht aus 9 (3 x 3) Großquadraten mit je einer Fläche von 1 mm<sup>2</sup>. Diese bestehen wiederum aus 16 kleinen Quadraten. Zum Auszählen der Zellen werden nun die 4 großen Eckquadrate verwendet. In jedem Großquadrat werden die kleinen Quadrate in Schräglinie ausgezählt. Zellen, die auf dem Rand liegen, werden nur an 2 Seiten mitgezählt, d.h. links und oben oder rechts und unten.

Nach dem Auszählen der 4 Großquadrate wird der Mittelwert ermittelt. Die Zellzahl pro Milliliter berechnet sich wie folgt:

$$\text{Zellkonzentration} \left[ \frac{\text{Zellen}}{\text{ml}} \right] = \frac{\text{gezählte Zellen}}{4 \text{ Großquadrate}} * 10^4$$

Daraus kann nun die Gesamtzellzahl bestimmt werden:

$$\text{Gesamtzellzahl} = \text{Zellkonzentration} \left[ \frac{\text{Zellen}}{\text{ml}} \right] * \text{Verdünnung [ml]}$$

Die Verdünnung ist das Gesamtvolumen, indem die Zellen suspendiert wurden.

#### 4.3.3 Stoffwechselaktivität mit Resazurin

Die Stoffwechselaktivität kann mit Hilfe des Resazurin Assay Kits ermittelt werden. Dies ist ein extrazellulärer Reduktionstest. Resazurin ist ein blauer Redox-Farbstoff, ungiftig und ist nicht fluoreszierend [21].

Das Resazurin wird in die Zelle aufgenommen und in Abhängigkeit der Stoffwechselaktivität irreversibel zum pinkfarbenen, fluoreszierenden Resorufin reduziert (siehe Abb. 22).

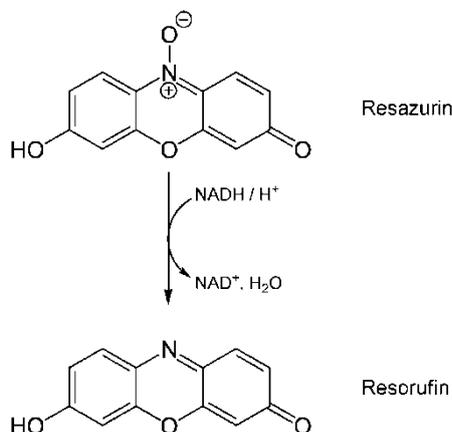


Abb. 22: Resazurin-Reduktion (Quelle: ANNA KARUTZ: Ermittlung des Einflusses der Nanophotonentechnologie auf in vitro-Zellkulturen. Zittau, Internationales Hochschulinstitut Zittau, Biotechnologie und Angewandte Ökologie. Masterarbeit. 2012)

Die Reduktion ist abhängig von der Aktivität der einzelnen Zellen, sowie von der Zellanzahl. Die Aktivität kann durch äußere Einflüsse, z.B. zytotoxische Stoffe, beeinflusst werden. Mit der Zeit, wenn das Resazurin verbraucht ist, wird das Resorufin in den farblosen Stoff Dihydroresorufin reduziert.

Die Ermittlung der Stoffwechselaktivität erfolgt nach der Beleuchtung am MTP-Reader. Das verbrauchte Nährmedium wird abgesaugt und 2 ml frisch hergestellte Resazurinlösung

---

(Nährmedium +10 % des des Mediumvolumens Resazurin) zu den Proben pipettiert. Danach werden die Zellen für zwei Stunden im CO<sub>2</sub>-Inkubator inkubiert, damit das Resazurin metabolisch zum Resorufin reduziert werden kann. Als Blank dienen 2 ml der Resazurinlösung ohne Zellrasen. Zur Messung der Fluoreszenz werden die Wellplatten in den MTP-Reader gestellt und vermessen. Nach dem Starten des Programms, werden die Proben geschüttelt, um das Resorufin gleichmäßig zu verteilen, so dass es egal ist, an welcher Stelle in der Kavität gemessen wird. Die Fluoreszenz wird mittels Blitzen mit einer Wellenlänge von 560 nm angeregt. Die Intensität des emittierenden Lichts wird bei 590 nm vermessen. Die Messwerte werden als relative Fluoreszenzeinheiten (RFU) ausgegeben. Die Proben werden auf die mitgeführte Kontrolle bezogen.

#### 4.3.3.1 Stoffwechselumsatz pro Zelle

Durch Auszählen der Zellen kann der Stoffwechselumsatz pro Zelle ermittelt werden. Hierzu werden die Zellen nach der Messung im MTP-Reader aus der Kavität gelöst und mittels Zählkammer gezählt. Die relative Fluoreszenzeinheit wird dann durch die Zellzahl geteilt.

#### 4.4 Versuchsaufbau

##### 1. Zweck

Diese Arbeitsanweisung dient dazu einen zweckmäßigen Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung zu beschreiben.

##### 2. Material und Geräte

Material/ Gerät	Anzahl
Spannungsquelle KEITHLEY 2400 Sourcemeter	1
Frischhaltebox	1
Laborkabel rot	1
Laborkabel schwarz	1
Krokodilklemmen	2
OLED-Platine	1
Klemmen	2
OLED	1
schwarze undurchsichtige Folie	-
große Petrischale	1
12-Well-Platte	je nach Versuch
Mini-Brutschrank	1

##### 3. Anweisung

###### Vorbereitung:

- a) Die Frischhaltebox ist mit der schwarzen Folie zu ummanteln (siehe Abb. 23).



Abb. 23: abgedunkelte Box; Kiste und Deckel jeweils mit schwarzer Folie ummantelt

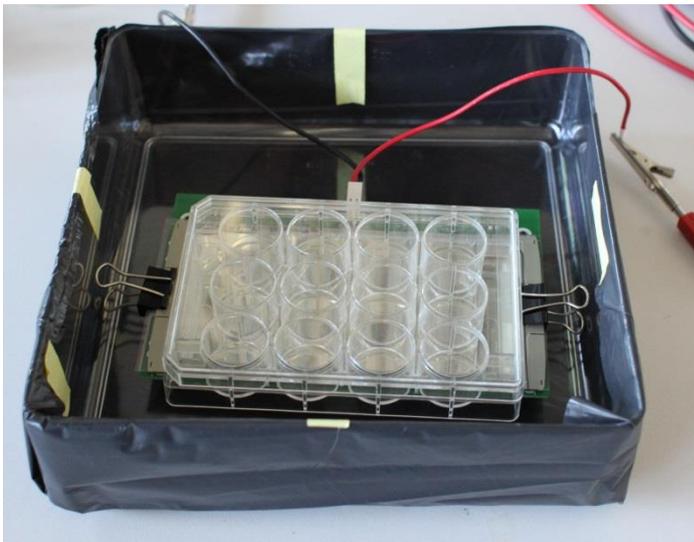
- b) Die Zellkultur in gewünschter Konzentration (abhängig von Versuchsplan) nach Abb. 24 in 12-Well-Platte aussähen und inkubieren.



- (8) Die noch freien Enden der Laborkabel an die Spannungsquelle anschließen (siehe Abb. 26).



- (9) Die Spannungsquelle auf gewünschte Strom- und Spannungswerte einstellen.  
(10) OLED anschalten und überprüfen, ob OLED leuchtet, ggf. Kontakte überprüfen.  
(11) OLED ausschalten.  
(12) Die Well-Platte, die beleuchtet werden soll, mit der Orientierungsseite nach links auf die OLED stellen (siehe Abb. 27).



- (13) Den Deckel der Box schließen.  
(14) Die Well-Platte zur Kontrolle wird in den Mini-Brutschrank gestellt.

OLED anschalten. **Hinweis: Die Versuchsdauer darf eine Dauer von 30min nicht überschreiten. Längere Zeiten müssen gestaffelt werden.**

## 5 Experimentelles

In diesem Kapitel wird der Versuchsablauf erläutert. Für die Versuchsreihe müssen einige Parameter festgelegt werden und das Versuchskonzept erstellt werden.

### 5.1 Vorbereitung der Zellen zur Beleuchtung

Ein wichtiger Bereich für die Versuchsdurchführung sind die Zellen, diese müssen für die Versuche vorbereitet werden.

#### 5.1.1 Bestimmung der Wachstumskurve

Für die Versuche müssen Zellen in 12-Well-Platten ausgesät werden. Um zu ermitteln, wie viele Zellen ausgesät werden müssen, wird eine Wachstumskurve erstellt. Diese ist nötig, um eine gute Ausgangssituation der Zellen für die Versuche zu haben. Dabei ist es wichtig, dass sich die Zellen während des Versuches im exponentiellen Wachstum befinden, allerdings die Wachstumsfläche nicht vollständig bedecken, da sich die HaCaTs schlecht ablösen lassen. Eine Bedeckung der Wachstumsfläche von 80-90 % sollte zur Behandlung und Zellzahlbestimmung genügen. Da die Zellen während der Aussaat im Medium gelöst sind, wird die Zellzahl mit einer Konzentration von Zellen pro ml (Zellen/ml) angegeben.

Es hat sich bewährt drei Wachstumskurven zu erstellen, um die geeignetste Konzentration zu ermitteln. Ermittelt werden an sieben Tagen die absolute Zellzahl sowie die Konfluenz<sup>1</sup> des Zellrasens. Um Fehler zu vermeiden, werden täglich drei unabhängige Kavitäten (Wells der Wellplatte) der einzelnen Konzentrationen ausgezählt. In Abb. 28 sind die drei Wachstumskurven abgebildet.

---

<sup>1</sup> Konfluenz beschreibt die Zelldichte auf der Wachstumsfläche. Sind die Zellen dicht an dicht, ist die Fläche konfluent.

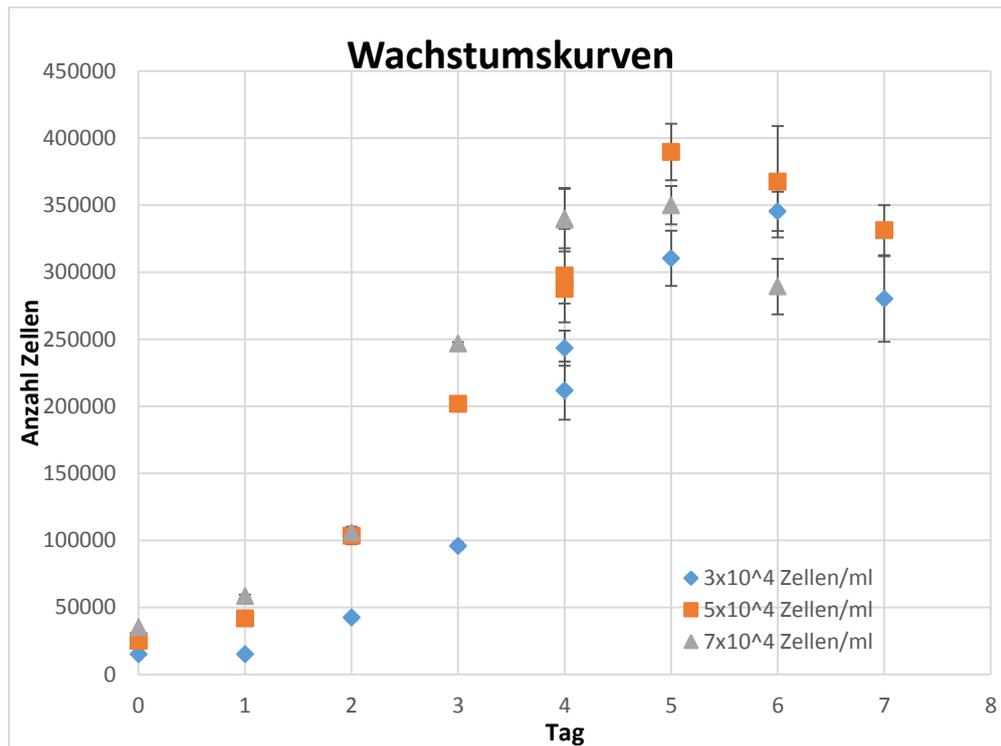


Abb. 28: Wachstumskurven von 3 verschiedenen Konzentrationen

Zu erkennen ist, dass die HaCaTs ca. 48 Stunden benötigen, um sich zu regenerieren und in das exponentielle Wachstum überzugehen. In Abb. 29 ist die zugehörige Konfluenz der Konzentrationen dargestellt.

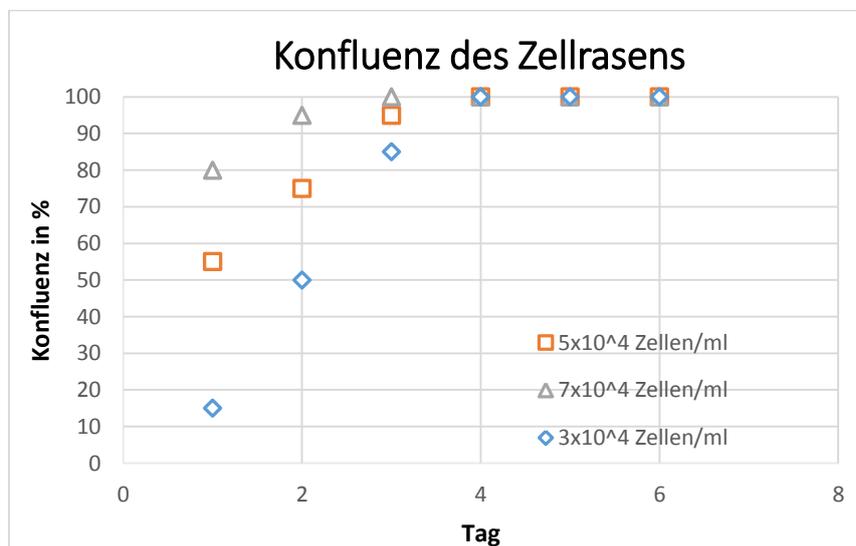


Abb. 29: Konfluenz des Zellrasens

An Tag 4 nach der Aussaat ist die Wachstumsfläche aller Konzentrationen vollständig bewachsen. Zwar wachsen diese noch weiter und ziehen sich zusammen, aber mit jedem weiteren Tag lassen sich die Zellen schlechter ablösen und auszählen. Optimal für spätere Versuche ist daher Tag 2 oder Tag 3 nach der Aussaat. Eine gute Konfluenz und Zellzahl hat an Tag 2 und Tag 3 die Konzentration von  $5 \times 10^4$  Zellen/ml. Daher wird diese Konzentration für die Lichtversuche verwendet.

### 5.1.2 Aussaat der Zellen und Aufzucht

Zunächst werden HaCaTs mit einer Konzentration von  $5 \times 10^4$  Zellen/ml in eine 12-Wellplatte ausgesät. Ebenso wird mit der Kontrolle verfahren, die dieselbe Konzentration erhält, aber nicht beleuchtet wird. Beide Wellplatten werden für ca. 48 Stunden im Brutschrank bei  $37^\circ\text{C}$ , 5%  $\text{CO}_2$  und 95% Luftfeuchtigkeit inkubiert.

## 5.2 Versuchskonzept zur Beleuchtung der Zellen mit OLEDs

Im Versuch werden HaCaTs mit Licht verschiedener OLEDs beleuchtet. In Abb. 30 ist das Versuchskonzept aufgezeichnet.

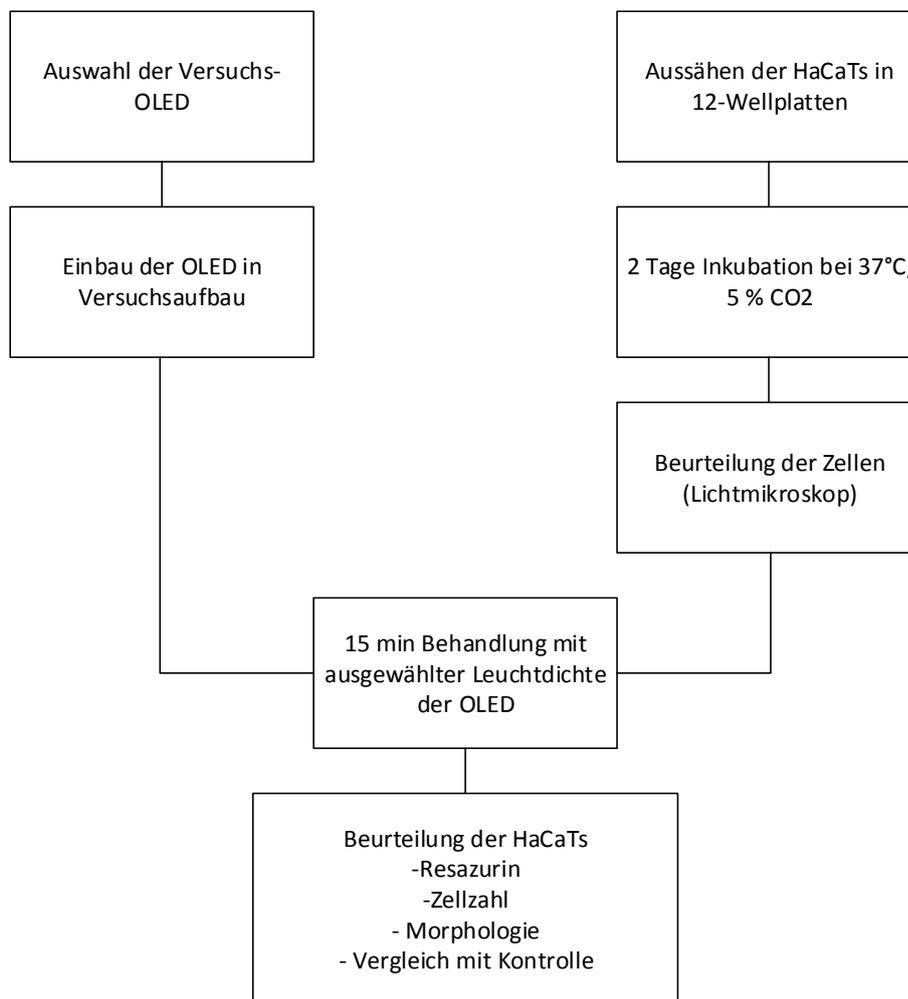


Abb. 30: Versuchskonzept

Die entsprechende Versuchs-OLED wird aus den vorhandenen OLEDs, die unter 4.1.1 beschrieben wurden, ausgewählt.

Am Versuchstag werden die Zellen vor dem Versuch unter einem Mikroskop begutachtet und beurteilt. Wichtig sind dabei das Aussehen (Morphologie) der Zellen, ggf. Kontaminationen und die Konfluenz des Zellrasens. Der Versuchsaufbau wird mit der ausgewählten OLED aufgebaut.

Dann wird eine Wellplatte für 15 min mit einer definierten Leuchtdichte beleuchtet, während die Kontrolle abgedunkelt in einem Mini-Brutschrank steht. Nach der Beleuchtung werden die Kontrolle und die behandelte Probe unter dem Mikroskop verglichen. Anschließend wird ein Resazurintest durchgeführt und die Zellzahl wird ermittelt.

### 5.3 Versuchsplanung zur Bestrahlung

Die Versuche sollen einen ersten Eindruck über die Auswirkung von Licht auf humane Zellen zeigen. Daher werden die Versuche breit gefächert.

Es stehen 5 Lichtfarben zur Verfügung:

- Blau
- Grün
- Orange
- Warmweiß
- Kaltweiß

Diese 5 Farben werden zunächst mit derselben Leuchtintensität verwendet, um eventuelle Unterschiede in der Farbwirkung zu ermitteln. Da die blaue OLED die schwächste Intensität hat, werden die anderen Farben auf die Intensität von 300 cd/m<sup>2</sup> eingestellt. Um die richtige Intensität zu erhalten, wird der Strom eingestellt, welcher durch das Leuchtdichte-Strom-Diagramm ermittelt werden kann.

Da eine Intensität von 300 cd/m<sup>2</sup> sehr gering ist, werden drei Lichtfarben, die durch ihre technischen Eigenschaften geeignet sind, auch bei 1000 cd/m<sup>2</sup> verwendet. Jeder einzelne Versuch wird mind. zweimal wiederholt, um eine statistische Genauigkeit zu ermitteln. Des Weiteren werden pro Versuch 4 Kavitäten beleuchtet und ausgezählt. In Tab. 4 sind die einzelnen Versuche aufgelistet.

Tab. 4: Versuchsplanung

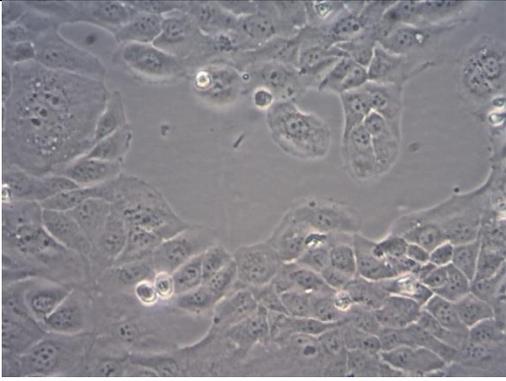
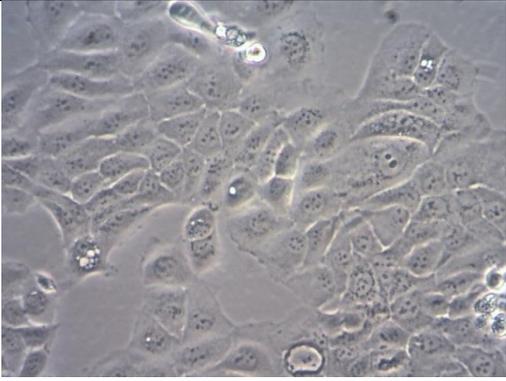
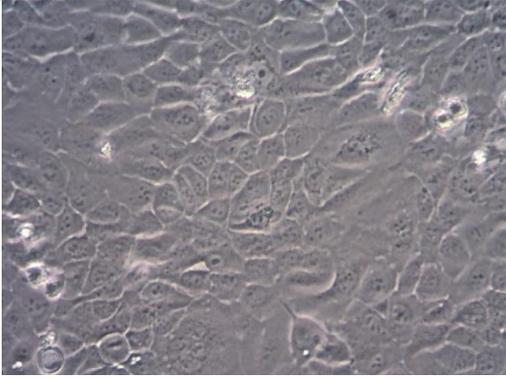
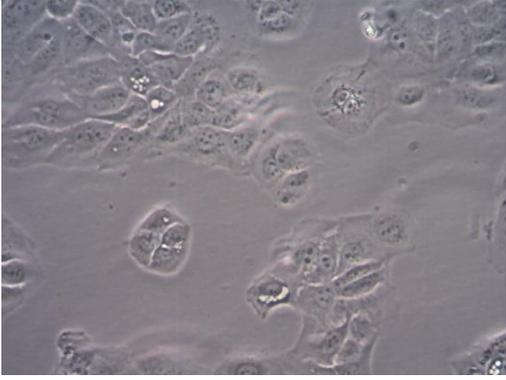
Versuch	Lichtfarbe	Intensität in cd/m <sup>2</sup>	Ermittelter Strom in mA
1	Blau	300	300
2	Grün	300	20
3	Orange	300	100
4	Kaltweiß	300	70
5	Warmweiß	300	35
6	Grün	1000	75
7	Kaltweiß	1000	300
8	warmweiß	1000	140

## 6 Ergebnisse und Diskussion

### 6.1 Blaue OLED

Mit der blauen OLED wurden die Keratinozyten bei einer Leuchtdichte von  $300 \text{ cd/m}^2$  für 15 min beleuchtet. In Tab. 5 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Zellen zum Vergleich.

Tab. 5: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (blaues Licht,  $300 \text{ cd/m}^2$ )

	Kontrolle	15 min blaues Licht
vorher		
nachher		

In Tab. 6 sind die absoluten Zahlenwerte der Behandlung mit blauem Licht und einer Leuchtdichte von  $300 \text{ cd/m}^2$  aufgeführt.

Tab. 6: 15 min Behandlung mit blauem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>

Versuch	1		2		3	
	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min
Zellzahl	338125	303438	276875	277500	210625	180000
Stoffwechsel- aktivität pro Kavität	21954,5	19735	21739,25	21709,75	18244,75	21090,5
Stoffwechsel- aktivität pro Zelle	0,0649	0,0650	0,0785	0,0782	0,0866	0,1172
Morphologie (Lichtmikroskopie)	Keine Veränderungen		Keine Veränderungen		Keine Veränderungen	

In Anhang 7 sind die ausführlichen Tabellen zum blauen Licht zu finden.

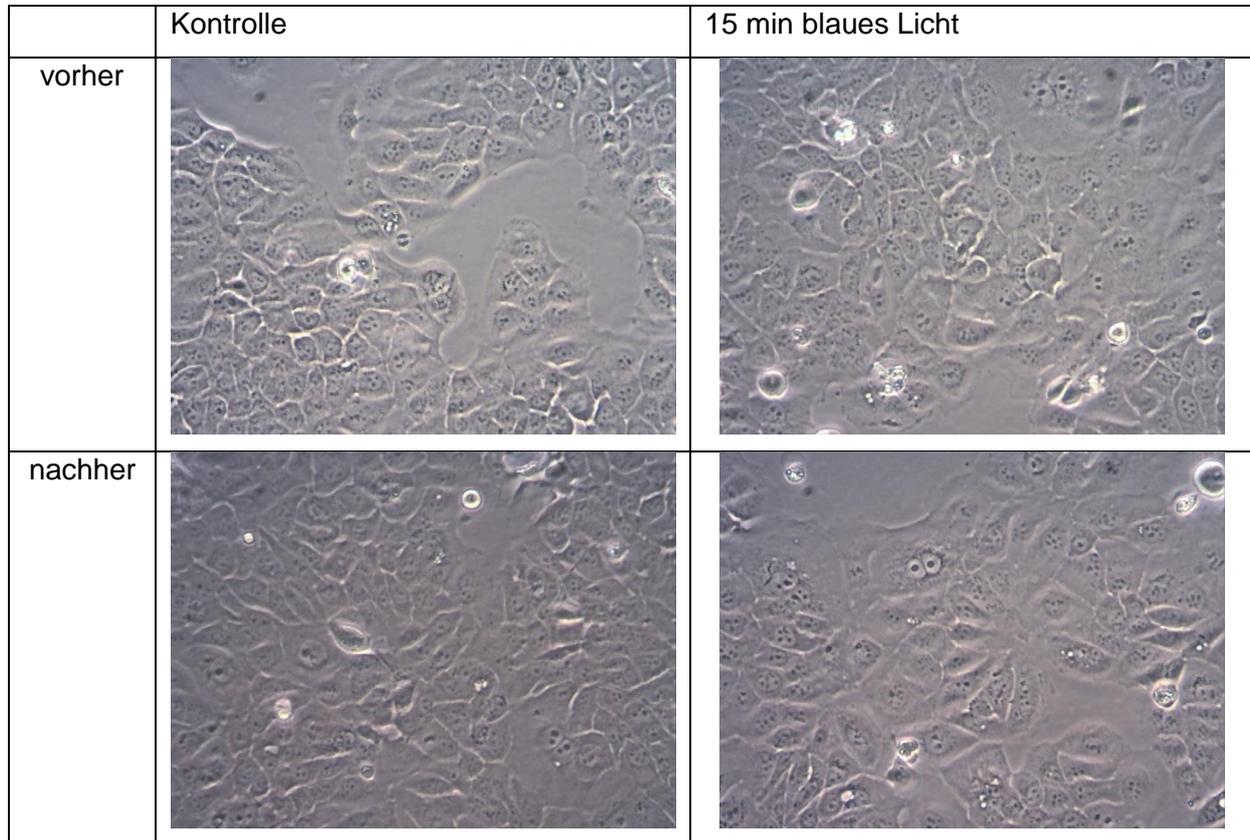
Der Versuch mit dem blauen Licht zeigt nur im dritten Versuch eine starke Tendenz. Die Stoffwechselaktivität pro Zelle hat sich um 35 % zur Kontrolle erhöht. Allerdings muss in weiteren Versuchen gezeigt werden, dass diese Aktivitätssteigerung kein Einzelfall bleibt, denn diese Steigerung könnte auch durch Stress hervorgerufen worden sein. Dieser Stress kann auftreten, wenn die Zellen zu lange außerhalb des Brutschrankes bleiben. Das Ausbleiben einer Aktivitätssteigerung kann aber auch durch Stress hervorgerufen werden. Eine genauere Zeitüberwachung könnte dies verhindern.

Des Weiteren ist anzumerken, dass in allen drei Versuchen die Parameter zur Bestimmung der Zellteilung sowie der Zelltod nicht erhöht waren. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass blaues Licht kein Krebs fördern sollte (vermehrte Zellteilung) und die vorhandene Leuchtquelle für die Zellen nicht schädlich sein sollte. Die Auswirkungen müssen mit einer höheren Leuchtdichte überprüft werden.

## 6.2 Grüne OLED

Die Keratinozyten wurden mit 300 cd/m<sup>2</sup> für 15min beleuchtet. In Tab. 7 sind zum Vergleich die lichtmikroskopischen Aufnahmen vor und nach der Beleuchtung.

Tab. 7: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (grüne OLED, 300 cd/m<sup>2</sup>)



In Tab. 8 sind die absoluten Zahlenwerte der Behandlung mit grünem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup> zu finden.

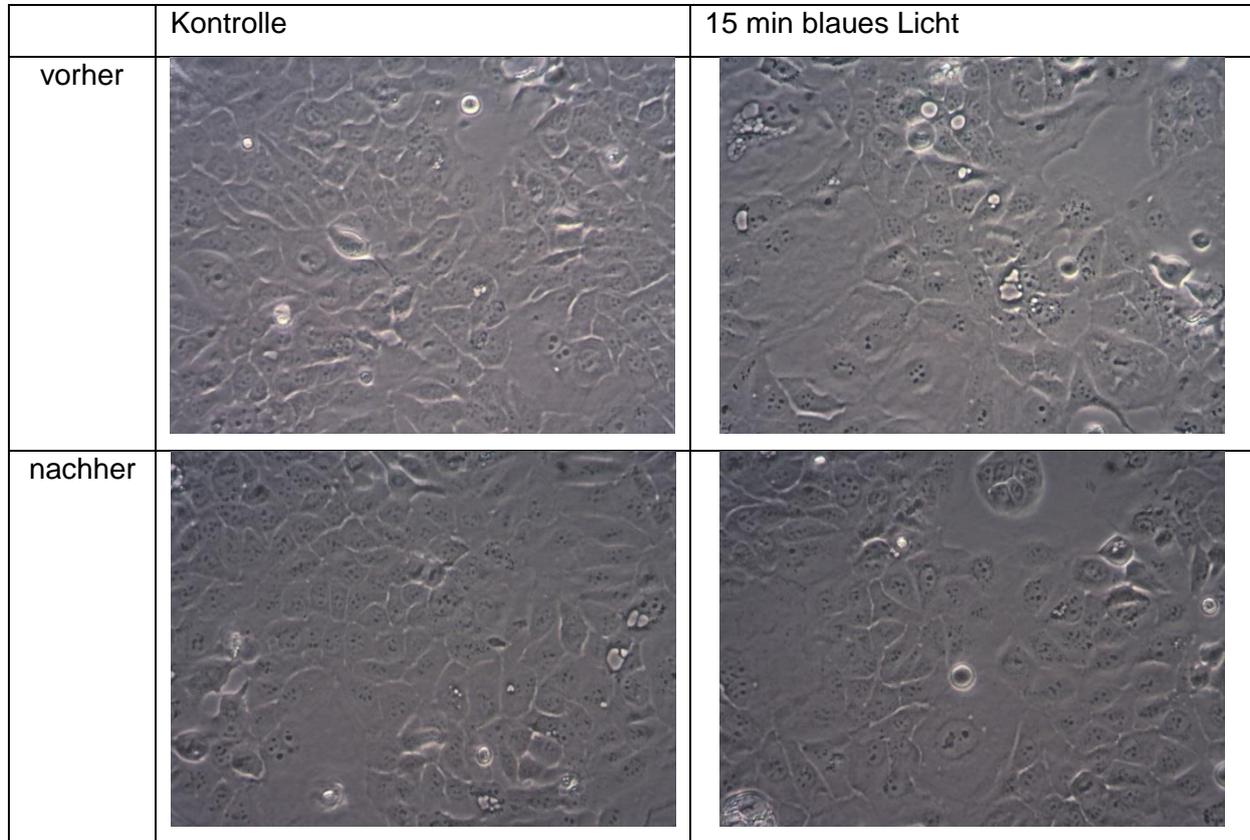
Tab. 8: 15 min Behandlung mit grünem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>

Versuch	1		2		3	
	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min
Zellzahl	322812,5	282187,5	109687,5	99062,5	252500	245937,5
Stoffwechsel- aktivität pro Kavität	24763,5	24299,75	12809,25	12613,75	24795	23900
Stoffwechsel- aktivität pro Zelle	0,0767	0,0861	0,1168	0,1273	0,0945	0,0972
Morphologie (Lichtmikroskopie)	Keine Veränderungen		Keine Veränderungen		Keine Veränderungen	

Die entsprechenden ausführlichen Tabellen befinden sich in Anhang 8.

In Tab. 9 sind die Aufnahmen der Beleuchtung mit grünem Licht bei 1000 cd/m<sup>2</sup>.

Tab. 9: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (grüne OLED, 1000 cd/m<sup>2</sup>)



Die absoluten Zahlenwerte für eine Behandlung mit grünem Licht bei einer Leuchtdichte von 1000 cd/m<sup>2</sup> befinden sich in Tab. 10.

Tab. 10: 15 min Behandlung mit grünem Licht bei 1000 cd/m<sup>2</sup>

Versuch	1		2		3	
	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min
Zellzahl	290000	287500	154062,5	170315,5	284062,5	226250
Stoffwechsel- aktivität pro Kavität	22369,25	23994,5	21636,25	21790,5	23355,5	22839
Stoffwechsel- aktivität pro Zelle	0,0771	0,0835	0,1404	0,1279	0,0822	0,1010
Morphologie	Keine Veränderungen		Keine Veränderungen		Keine Veränderungen	

In Anhang 9 befinden sich die ausführlichen Tabellen zu diesem Versuch.

Das grüne Licht verspricht eine Überraschung. Sowohl die kleine Leuchtdichte von 300 cd/m<sup>2</sup> als auch die hohe Leuchtdichte von 1000 cd/m<sup>2</sup> zeigen Auswirkungen auf die

Stoffwechselaktivität. In beiden Fällen sind Tendenzen zur Aktivitätssteigerung pro Zelle vorhanden. Des Weiteren ist kein vermehrtes Zellwachstum oder Zellsterben ersichtlich.

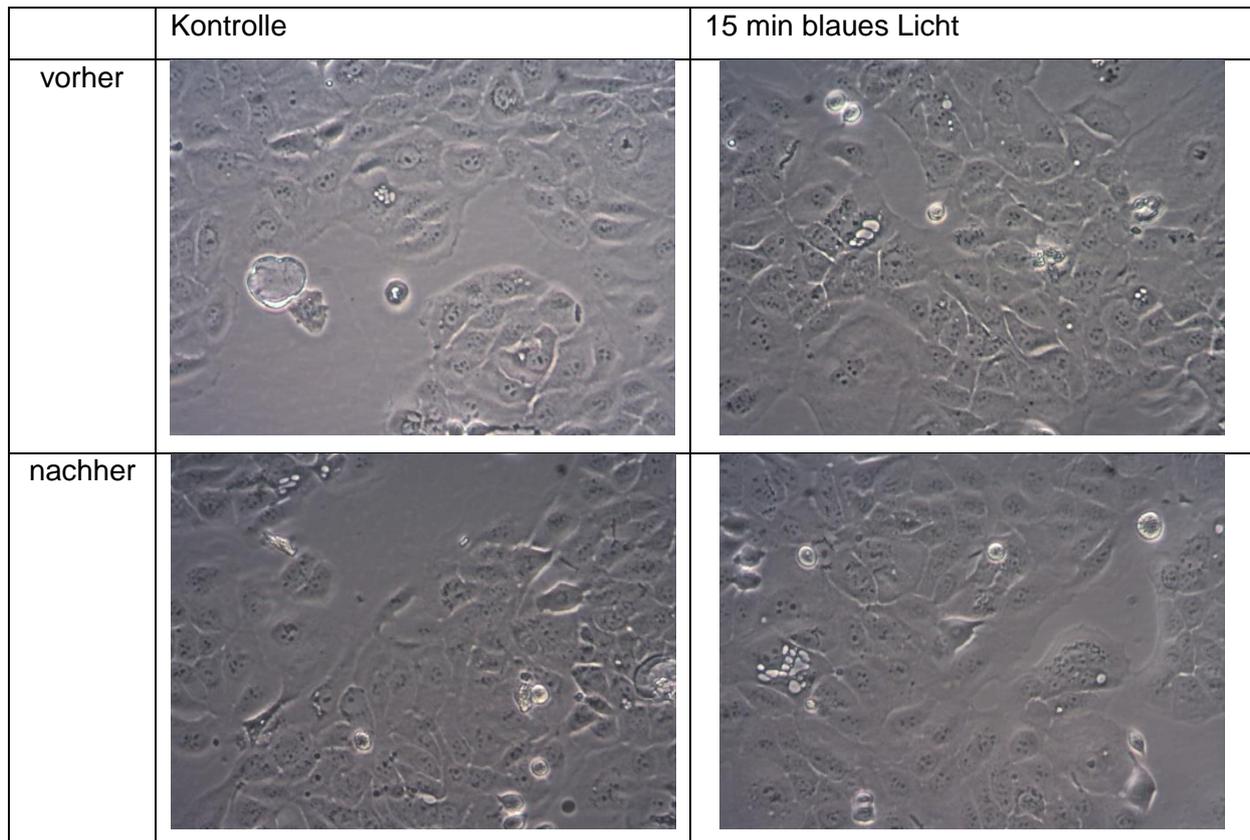
Jedoch ist auch kein Unterschied zwischen den zwei verschiedenen Leuchtdichten ersichtlich. Ein empfindlicherer intrazellulärer Test könnte eventuell eine stärkere Differenzierung erbringen.

Die OLEDs mit grünem Licht sollten in jedem Fall in weiteren Versuchen mit Zellen erprobt werden.

### 6.3 Orange OLED

Die HaCaTs wurden 15 min lang mit orangem Licht bei einer Leuchtdichte von 300 cd/m<sup>2</sup>. Mit Hilfe einer lichtmikroskopischen Aufnahme sind Ausschnitte der Wachstumsfläche in Tab. 11 zu finden.

Tab. 11: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (orange OLED, 300 cd/m<sup>2</sup>)



Ein Überblick über die absoluten Zahlen aus dem Versuch mit orangem Licht bei einer Leuchtdichte von 300 cd/m<sup>2</sup> befindet sich in

Tab. 12.

Tab. 12: 15 min Behandlung mit orangem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>

Versuch	1		2		3	
	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min
Zellzahl	386250	412500	294375	271875	204375	238125
Stoffwechsel- aktivität pro Kavität	23165,75	24606,5	23475,25	23582,5	23647	24024,75
Stoffwechsel- aktivität pro Zelle	0,0599	0,0597	0,0798	0,0867	0,1157	0,1009
Morphologie	Keine Veränderungen		Keine Veränderungen		Keine Veränderungen	

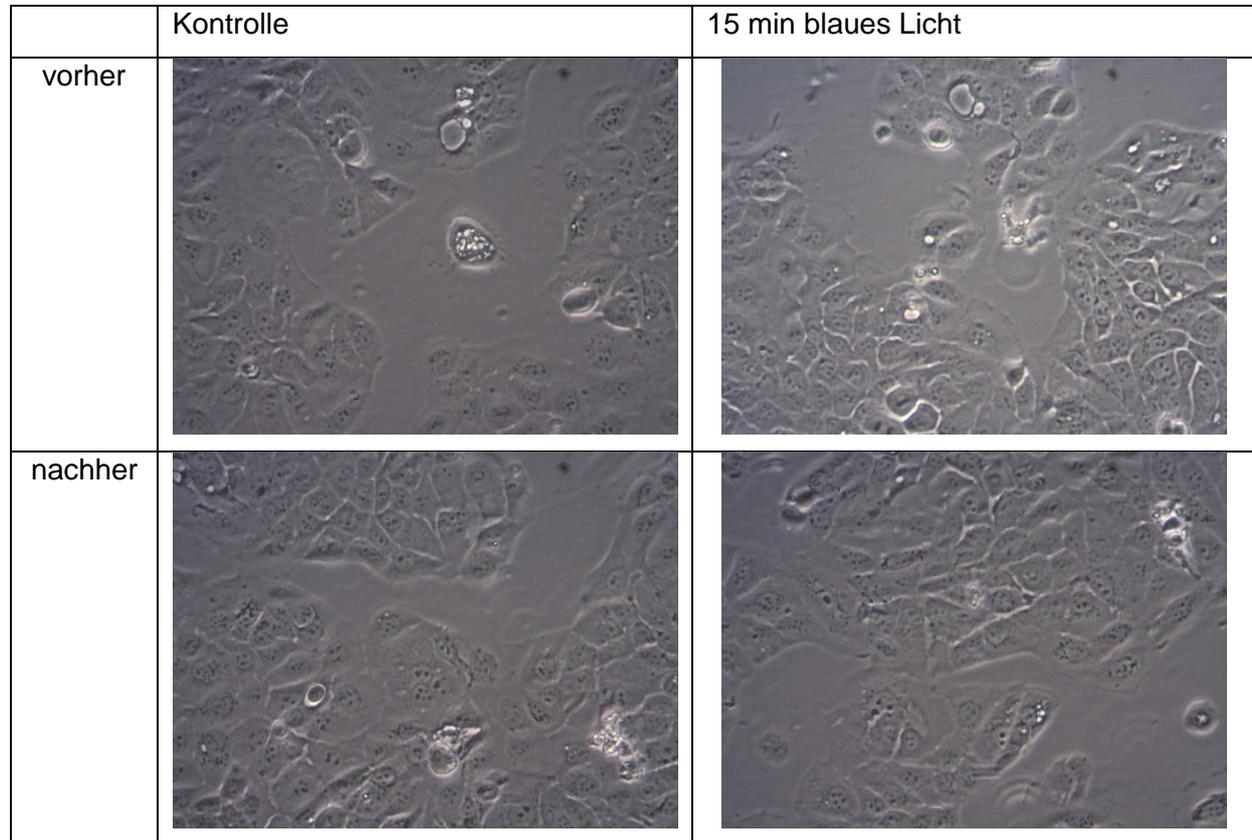
Die ausführliche Tabelle zu diesem Versuch befindet sich in Anhang 10.

Das orange Licht zeigt kaum Veränderung, weder im positiven noch im negativen Bereich. Dies kann an der geringen Leuchtdichte liegen, als auch an der Zelllinie. Die HaCaTs könnten nicht sensibel genug für diesen Spektralbereich sein. Ein Vergleich mit einer anderen Zelllinie und den gleichen Versuchsparametern sollte Aufschluss darüber bringen.

## 6.4 Warmweiße OLED

Die Keratinozyten wurden auch mit warmweißem Licht mit einer Leuchtdichte von 300 cd/m<sup>2</sup> beleuchtet. Aufnahmen der Zellmorphologie sind in Tab. 13 zu finden.

Tab. 13: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (warmweiße OLED, 300 cd/m<sup>2</sup>)



In Tab. 14 befinden sich die absoluten Zahlen zum Versuch mit warmweißem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>.

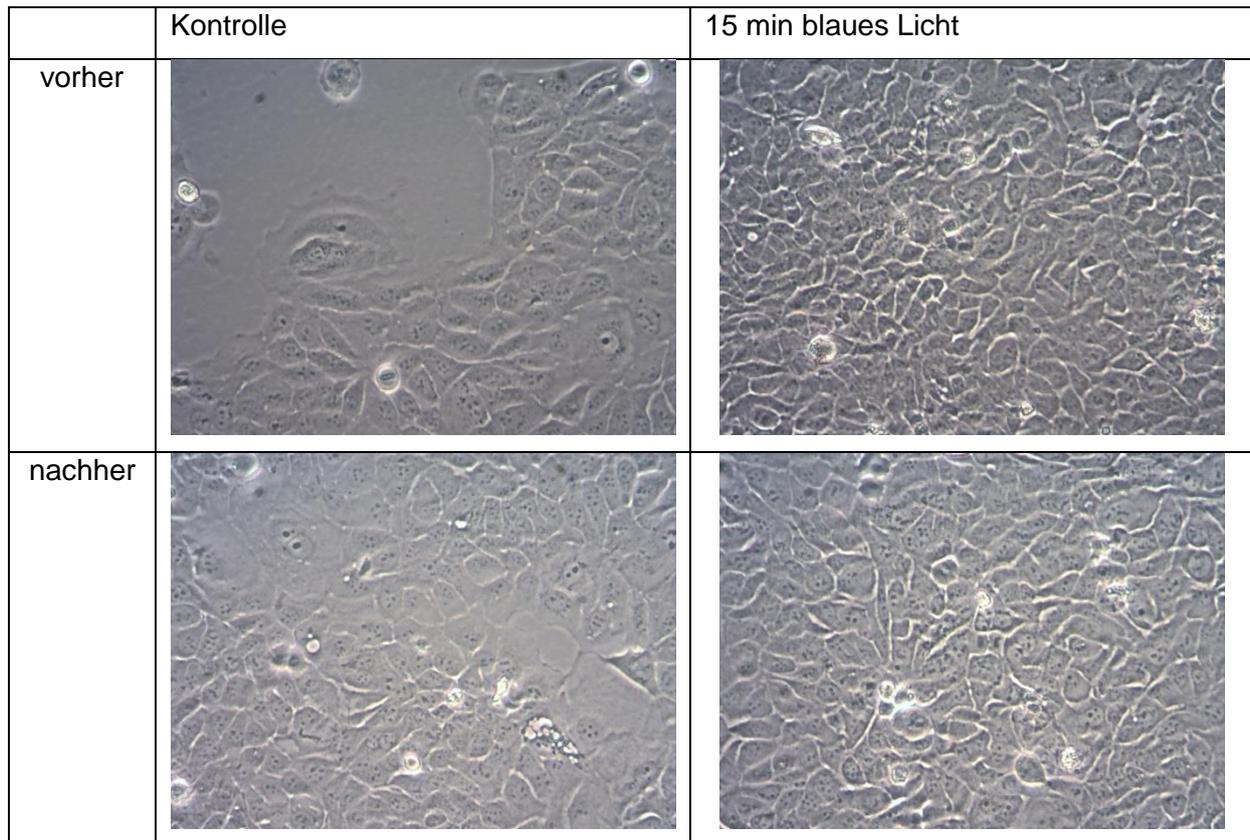
Tab. 14: 15 min Behandlung mit warmweißem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>

Versuch	1		2		3	
	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min
Zellzahl	331562,5	301250	207187,5	205312,5	290000	309375
Stoffwechsel- aktivität pro Kavität	17332,5	17196,25	19750,25	20880,25	24075,25	25466
Stoffwechsel- aktivität pro Zelle	0,0523	0,0571	0,0953	0,1017	0,0830	0,0823
Morphologie	Keine Veränderungen		Keine Veränderungen		Keine Veränderungen	

Die ausführliche Tabelle zu den Versuchen befindet sich in Anhang 11.

In Tab. 15 sind die Aufnahmen der Zellmorphologie bei warmweißem Licht mit einer Leuchtdichte von 1000 cd/m<sup>2</sup> zu finden.

Tab. 15: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (warmweiße OLED, 1000 cd/m<sup>2</sup>)



In Tab. 16 werden die absoluten Zahlen aus dem Versuch mit warmweißem Licht bei 1000 cd/m<sup>2</sup>.

Tab. 16: 15 min Behandlung mit warmweißem Licht bei 1000 cd/m<sup>2</sup>

Versuch	1		2		3	
	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min
Zellzahl	317187,5	302500	176875	194375	207812,5	270937,5
Stoffwechsel- aktivität pro Kavität	25233,25	24630,25	22747,5	22834	22957,75	21868,25
Stoffwechsel- aktivität pro Zelle	0,0796	0,0814	0,1286	0,1175	0,1105	0,1279
Morphologie	Keine Veränderungen		Keine Veränderungen		Keine Veränderungen	

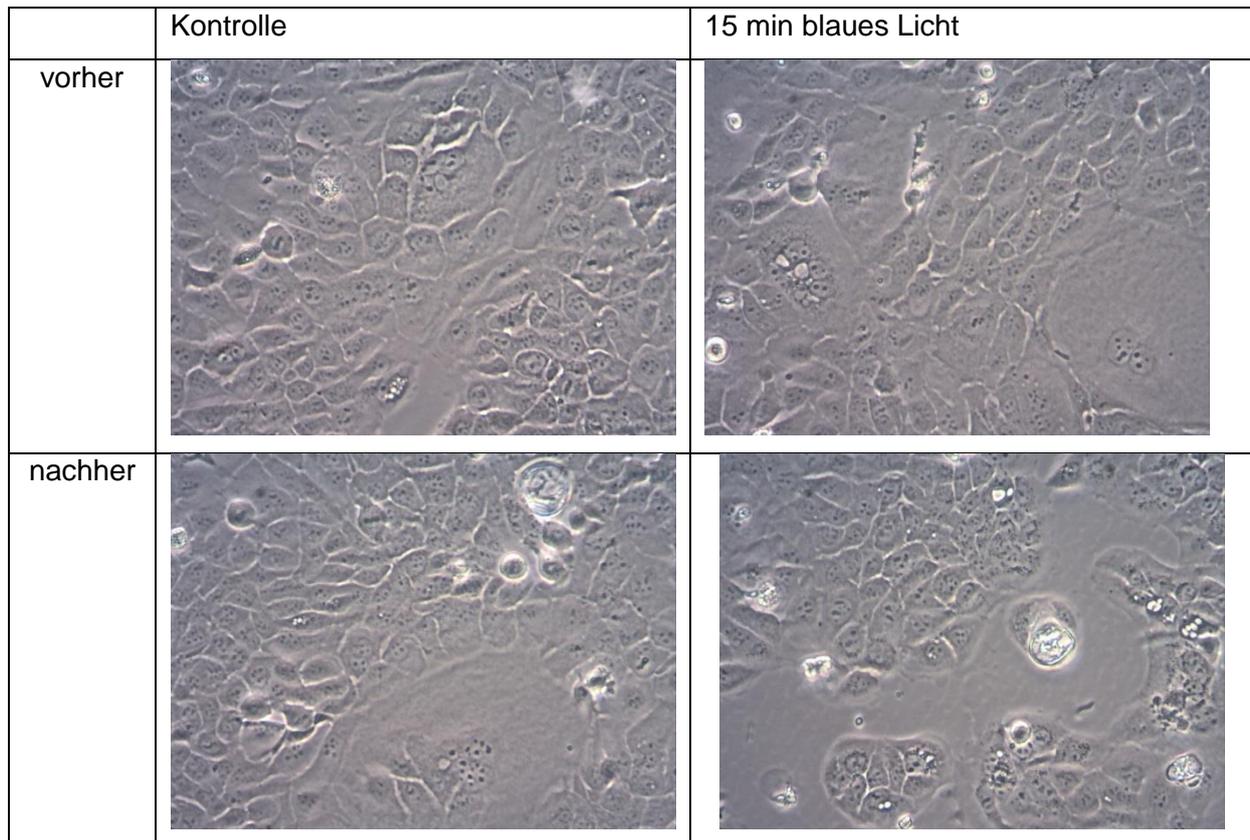
Die Versuchstabelle befindet sich in Anhang 12.

Das warmweiße Licht enthält einen hohen Rot-Orange-Anteil. Die Ergebnisse des warmweißen Lichtes weisen eine geringe bis gar keine Veränderung auf. Diese Ergebnisse stützen das Ergebnis des orangen Lichtes, dass die HaCaTs auf oranges bzw. rotes Licht nicht reagieren. Allerdings weist das warmweiße Licht bei einer Leuchtdichte von 1000 cd/m<sup>2</sup> eine höhere Stoffwechselsteigerung pro Zelle auf. Dies würde auf eine zu geringe Leuchtdichte hinweisen.

## 6.5 Kaltweiße OLED

Zu guter Letzt wurden die Keratinozyten auch mit kaltweißem Licht beleuchtet. In Tab. 17 sind zellmorphologische Ausschnitte der Beleuchtung mit kaltweißem Licht bei einer Intensität von 300 cd/m<sup>2</sup>.

Tab. 17: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (kaltweiße OLED, 300 cd/m<sup>2</sup>)



Tab. 18 gibt die absoluten Zahlen des Versuchs mit kaltweißem Licht bei einer Leuchtdichte von 300 cd/m<sup>2</sup> wieder.

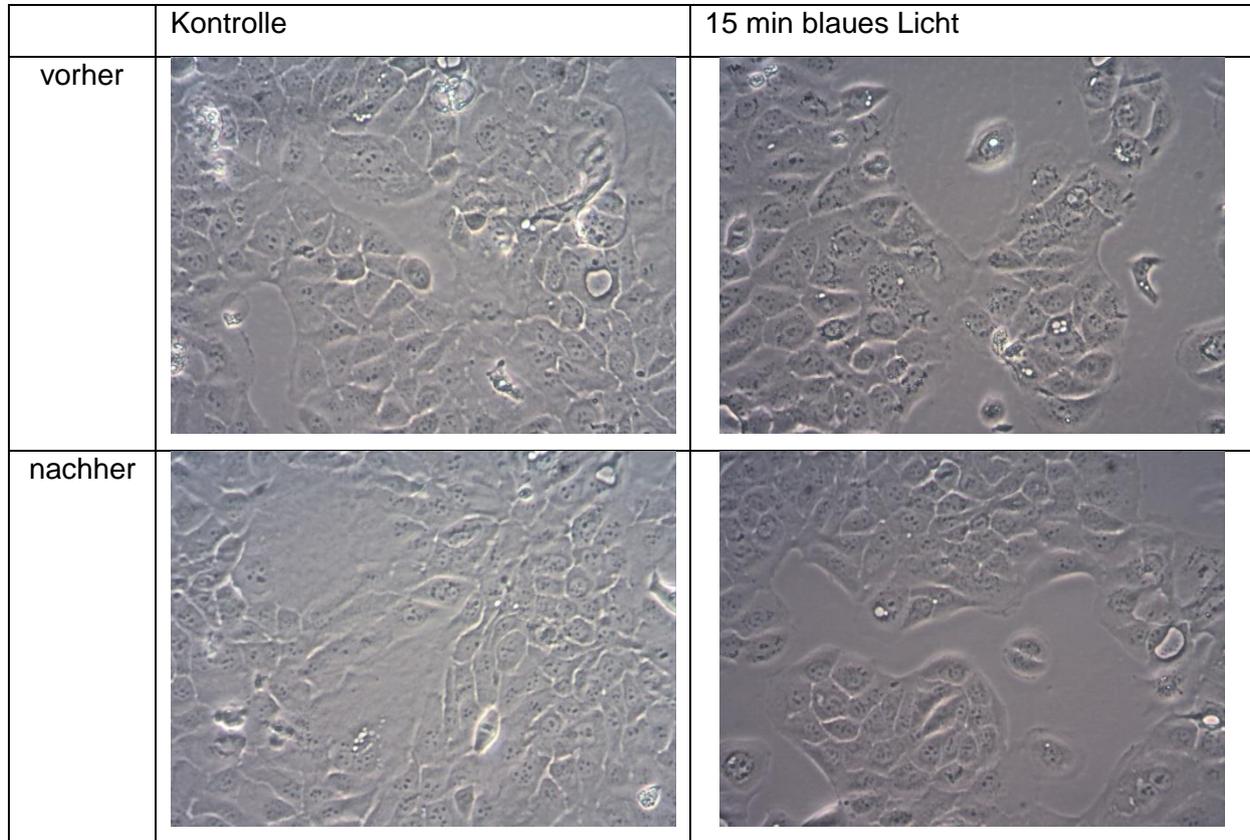
Tab. 18: 15 min Behandlung mit kaltweißem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>

Versuch	1		2		3	
	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min
Zellzahl	290000	288437,5	220625	220625	102500	108750
Stoffwechsel- aktivität pro Kavität	17098,75	17045,75	19868,5	19661,5	13375	13117,5
Stoffwechsel- aktivität pro Zelle	0,0590	0,0591	0,0901	0,0891	0,1305	0,1206
Morphologie	Keine Veränderungen		Keine Veränderungen		Keine Veränderungen	

Die Versuchstabelle befindet sich in Anhang 13.

Tab. 19 zeigt den Vergleich der Zellmorphologie vor und nach der Beleuchtung mit 1000 cd/m<sup>2</sup>.

Tab. 19: lichtmikroskopische Aufnahmen der Wachstumsfläche (Ausschnitte) vor und nach der Beleuchtung (kaltweiße OLED, 1000 cd/m<sup>2</sup>)



In Tab. 20 befinden sich die absoluten Zahlen des Versuchs mit kaltweißem Licht bei einer Leuchtdichte von 1000 cd/m<sup>2</sup>.

Tab. 20: 15 min Behandlung mit kaltweißem Licht bei 1000 cd/m<sup>2</sup>

Versuch	1		2		3	
	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min	Kontrolle	15 min
Zellzahl	366562,5	328750	141875	162187,5	177500	176875
Stoffwechsel- aktivität pro Kavität	23780,25	25225,5	20656	20113	21186	20488,75
Stoffwechsel- aktivität pro Zelle	0,0649	0,0767	0,1456	0,1240	0,1194	0,1158
Morphologie	Keine Veränderungen		Keine Veränderungen		Keine Veränderungen	

Die entsprechende ausführliche Tabelle befindet sich in Anhang 14.

Tendenzen sind auch beim kaltweißen Licht sehr gering. Eine Stoffwechselaktivitätssteigerung pro Zelle ist mit der höheren Leuchtdichte zu erkennen. Das unterstreicht die Vermutung, dass die Leuchtdichte zu gering ist.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Versuche sollten einen ersten Überblick verschaffen, um Tendenzen abzuschätzen und weitere tiefergehende Versuche zu planen. In jedem Fall reagieren die Zellen auf das Licht. Zu erkennen ist, dass die HaCaTs mehr im blauen bis grünen Bereich Reaktionen zeigen. Um genaue Unterschiede festzulegen, ist der Stoffwechselfest mit Resazurin zu grob. Gezielte Versuche mit einem intrazellulären Stoffwechselfest, z.B. mit einem ATP-Assay, können einen tieferen und genaueren Einblick gewähren.

Außerdem scheinen die Leuchtdichten sehr gering zu sein für eine Reaktion. Daher könnte eine Versuchsreihe mit mehreren Leuchtdichten, auch über 1000 cd/m<sup>2</sup>, hilfreich sein, um eine geeignete Leuchtdichte zu ermitteln. Für den Leuchtdichteversuch eignet sich das grüne Licht, da die Zellen hier schon bei geringer Leuchtdichte reagieren.

Eine weitere Möglichkeit, um andere Ergebnisse zu erhalten, ist die Versuchsdauer. Diese könnte verlängert werden, indem die Zellen stündlich 10-15 min beleuchtet werden.

Die HaCaTs stellen ein Modell der oberen Hautschicht dar. Zudem sind die HaCaTs recht robust. Daher könnten die Versuche mit anderen Zelllinien wiederholt werden, z.B. mit Fibroblasten (Bindegewebszellen) oder T-Zellen (Leukozyten).

Für eine Spezifikation des Anwendungsbereiches scheint es noch zu früh. Allerdings sollte einer Anwendung in der Medizin nichts im Wege stehen. Vielversprechend ist das grüne Licht, welches in der Humanmedizin nicht eingesetzt wird. Weitere Versuche mit grünem Licht können einen Anwendungsbereich spezifizieren.

Ein Vorteil bieten auch die flexiblen OLEDs, da diese in der Wundheilung als Wundaufgabe dienen können. Mit anderen Bereichen kombiniert, wie z.B. dem Gleichstrom, kann die Heilung gefördert werden.

---

**Literaturverzeichnis**

- [1] SCHREIL, Manfred: *Erzeugung großflächiger Leuchtdioden in einem vertikalen In-Line-Bedampfungssystem*. Dresden, Technische Universität Dresden, Institut für Angewandte Photophysik. Dissertation. 2004
- [2] Norm DIN 5033-3. 07.1992. *Farbmessung; Farbmasszahlen*
- [3] WALLER, Christoph: *Long life for art - Schutz für wertvolles Gut – Überprüfungsdatum 2015-02-09*
- [4] HALLER, Hauke: *Grundlagen - Definitionen LED-INFO: Das Leuchtdioden-Portal*. URL <http://www.led-info.de/grundlagen/definitionen.html> – Überprüfungsdatum 2015-02-09
- [5] PUCHNER, Ronny: *Licht und Farbe < Physik < Grundlagen < Fotoschule;*. URL <http://www.puchner.org/Fotografie/technik/physik/licht.htm>. – Aktualisierungsdatum: 2012-12-18 – Überprüfungsdatum 2015-02-10
- [6] OHTA, Noboru ; ROBERTSON, Alan R.: *Colorimetry : Fundamentals and applications*. Chichester, West Sussex, England, Hoboken, NJ, USA : J. Wiley, 2005
- [7] *Farbmetrik*. URL <http://cmyktastic.ch/lithografie/farbmetrik/> – Überprüfungsdatum 2015-01-06
- [8] *Farbwirkungen im Tagesverlauf - Fotografieren in der Praxis - Prophoto Online*. URL <http://www.prophoto-online.de/fotopraxis/farbwirkungen-im-tagesverlauf-10000460> – Überprüfungsdatum 2015-02-17
- [9] KRAUSE, Rolfdieter ; STANGE, Rainer: *Lichttherapie*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012 (SpringerLink : Bücher)
- [10] HILDEBRANDT, Gunther ; LEHOFER, Michael ; MOSER, Maximilian: *Chronobiologie und Chronomedizin : Biologische Rhythmen ; medizinische Konsequenzen*. Stuttgart : Hippokrates, 1998 (Lernen & fortbilden)
- [11] DIPL.-ING. RICHTER, HaJo: *Gesundes Wohnklima : Lichtemotionen; Tageslichtnutzung; Beleuchtung*. Stuttgart, 18.07.2006. URL [http://www.bubw.de/PDF\\_Dateien/News/2006/07\\_Juli/Vortrag\\_Richter.pdf?lvl=](http://www.bubw.de/PDF_Dateien/News/2006/07_Juli/Vortrag_Richter.pdf?lvl=) – Überprüfungsdatum 2015-01-19
- [12] RIEGENS: *Dynamische Beleuchtung*. URL <http://riegens.de/katalog/dynamische-beleuchtung> – Überprüfungsdatum 2015-02-17
- [13] KURZ, Sabine: *Schichtarbeit - leben gegen die innere Uhr*. URL <http://www.bvpraevention.de/cms/index.asp?inst=bvpg&snr=9136>. – Aktualisierungsdatum: 2012-11-27 – Überprüfungsdatum 2015-01-18

- 
- [14] WATERHOUSE, James M. ; MINORS, David S. ; WATERHOUSE, Maureen E.: *Die innere Uhr : Mit ihr leben - und nicht gegen sie*. Bern, Göttingen, Toronto, Seattle : Huber, 1992
- [15] POSCH, Thomas ; HÖLKER, Franz ; FREYHOFF, Anja ; UHLMANN, Thomas: *Das Ende der Nacht : Lichtsmog: Gefahren- Perspektiven- Lösungen*. 2. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013
- [16] LINDL, Toni: *Zell- und Gewebekultur : Einführung in die Grundlagen sowie ausgewählte Methoden und Anwendungen*. 5., überarb. und erw. Aufl. Heidelberg, Berlin : Spektrum, Akad. Verl., 2002
- [17] SCHMITZ, Sabine: *Der Experimentator: Zellkultur*. 2. Aufl. Heidelberg : Spektrum, Akad. Verl., 2009
- [18] DIPL.-PHARM. KÜRSCHNER, Ute: *Untersuchungen zur Toxizität und Biotransformation an der humanen Keratinozytenzelllinie HaCaT*. Halle/Saale, Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg, Naturwissenschaftliche Fakultät I. Dissertation. 2007-11-19. URL <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/07/08H301/prom.pdf> –  
Überprüfungsdatum 2015-02-23
- [19] CLS CELL LINES SERVICE GMBH: *HaCaT*. URL [http://www.cell-lines-service.de/content/e3969/e4490/e4557/index\\_ger.html](http://www.cell-lines-service.de/content/e3969/e4490/e4557/index_ger.html) – Überprüfungsdatum 2015-03-02
- [20] KORS, Christian: *Regulation der Freisetzung von SCF aus proliferierenden versus differenzierenden Keratinozyten/HaCaT*. Berlin, Medizinischen Fakultät der Charité – Universitätsmedizin Berlin. Dissertation. 2006-07-05. URL <http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/kors-christian-2006-07-05/HTML/front.html> –  
Überprüfungsdatum 2015-01-08
- [21] ANNA KARUTZ: *Ermittlung des Einflusses der Nanophotonentechnologie auf in vitro-Zellkulturen*. Zittau, Internationales Hochschulinstitut Zittau, Biotechnologie und Angewandte Ökologie. Masterarbeit. 2012

---

**Anhang**

Anhang 1.....	XII
Anhang 2.....	XIII
Anhang 3.....	XIV
Anhang 4.....	XV
Anhang 5.....	XVI
Anhang 6.....	XVII
Anhang 7.....	XVIII
Anhang 8.....	XIX
Anhang 9.....	XX
Anhang 10.....	XXI
Anhang 11.....	XXII
Anhang 12.....	XXIII
Anhang 13.....	XXIV
Anhang 14.....	XXV
Anhang 15.....	XXVI

Anhang 1

## blaue OLED

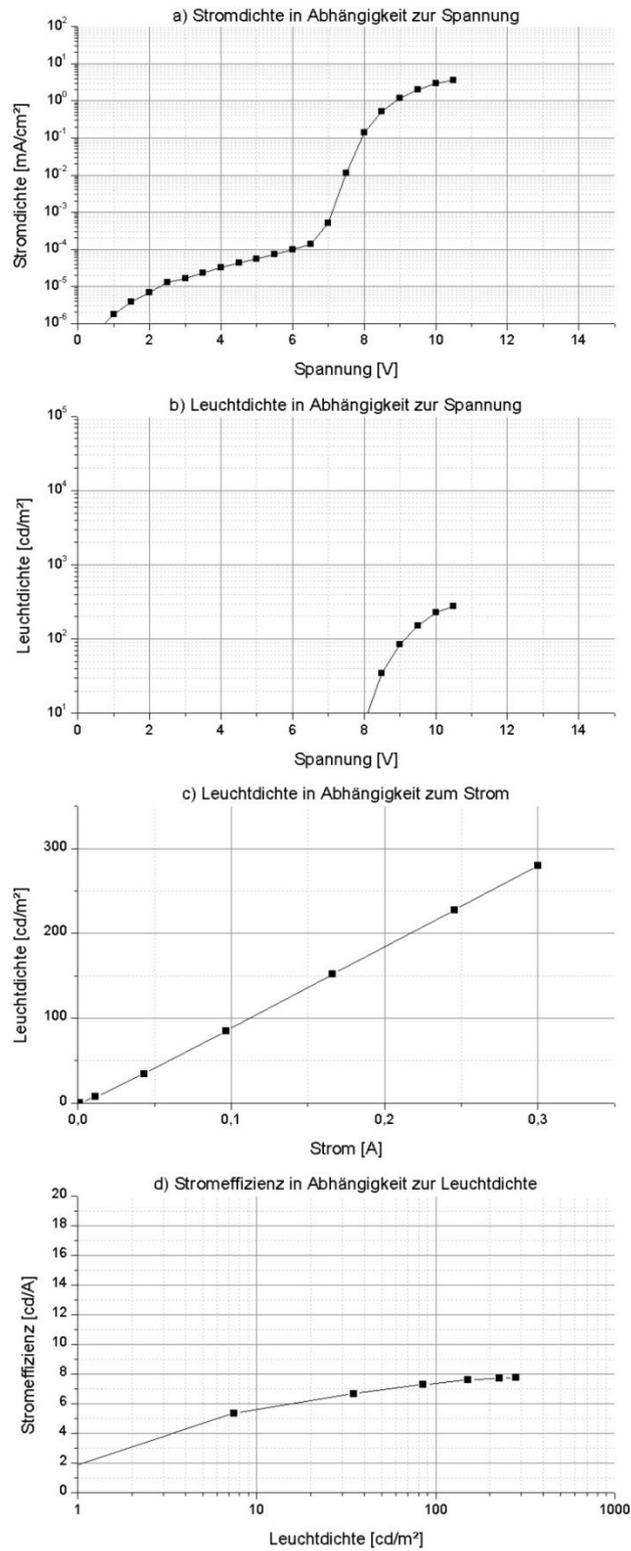


Abb. 31: charakterisierende Grafiken zur blauen OLED

Anhang 2

## grüne OLED

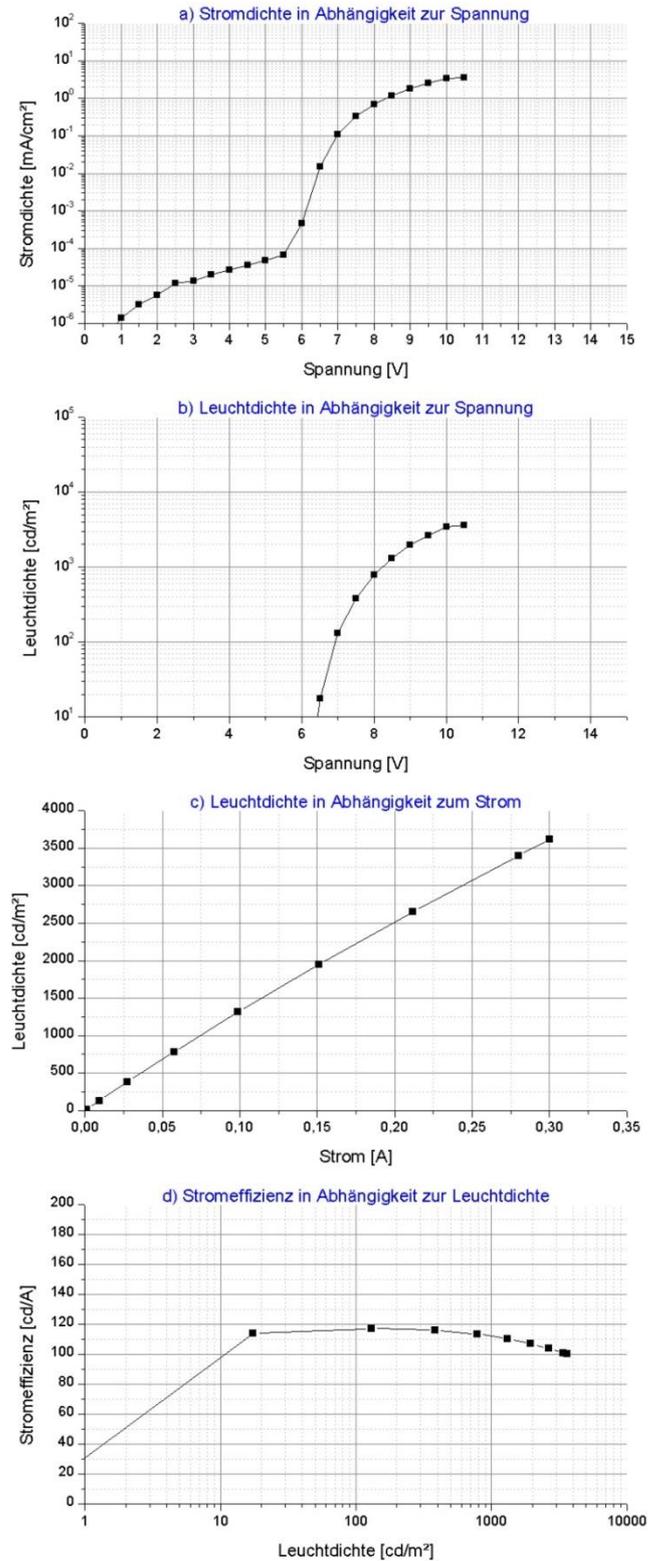


Abb. 32: charakterisierende Grafiken zur grünen OLED

Anhang 3

## orange OLED

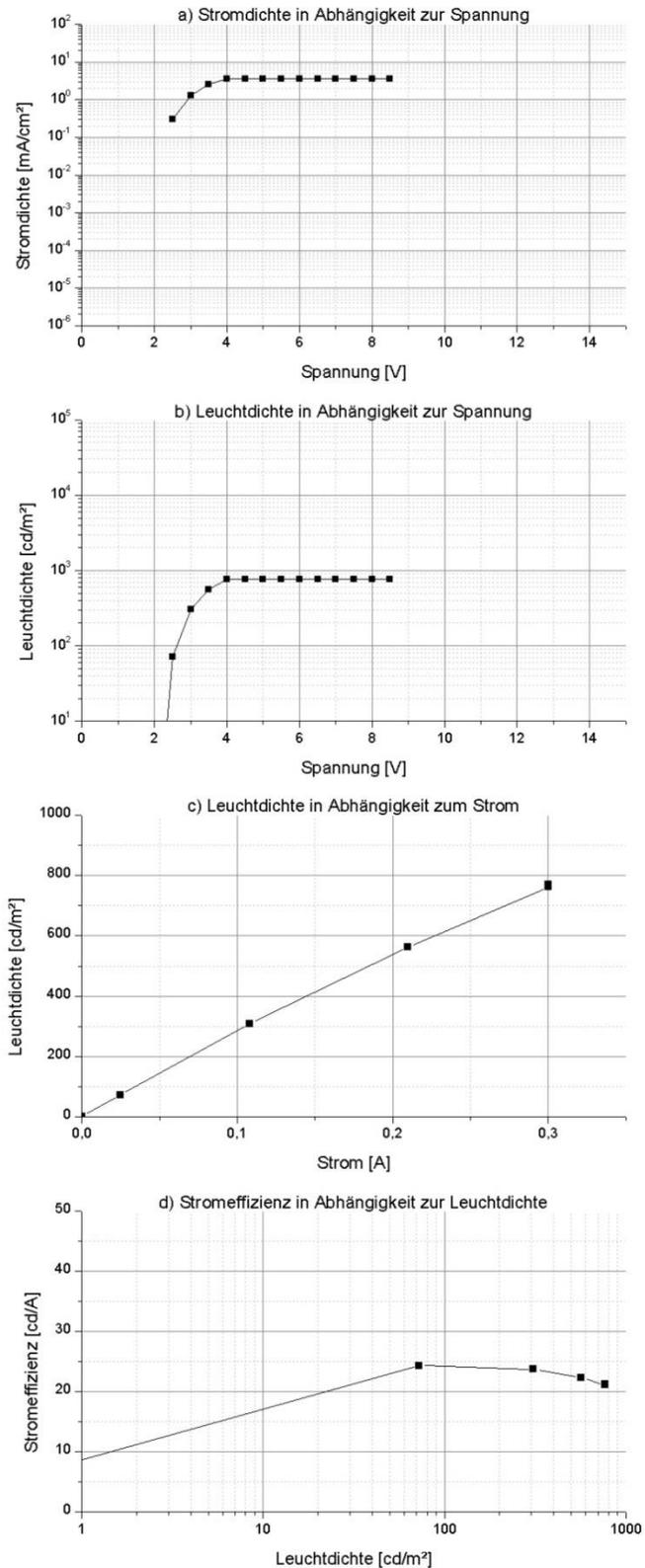


Abb. 33: charakterisierende Grafiken zur orangen OLED

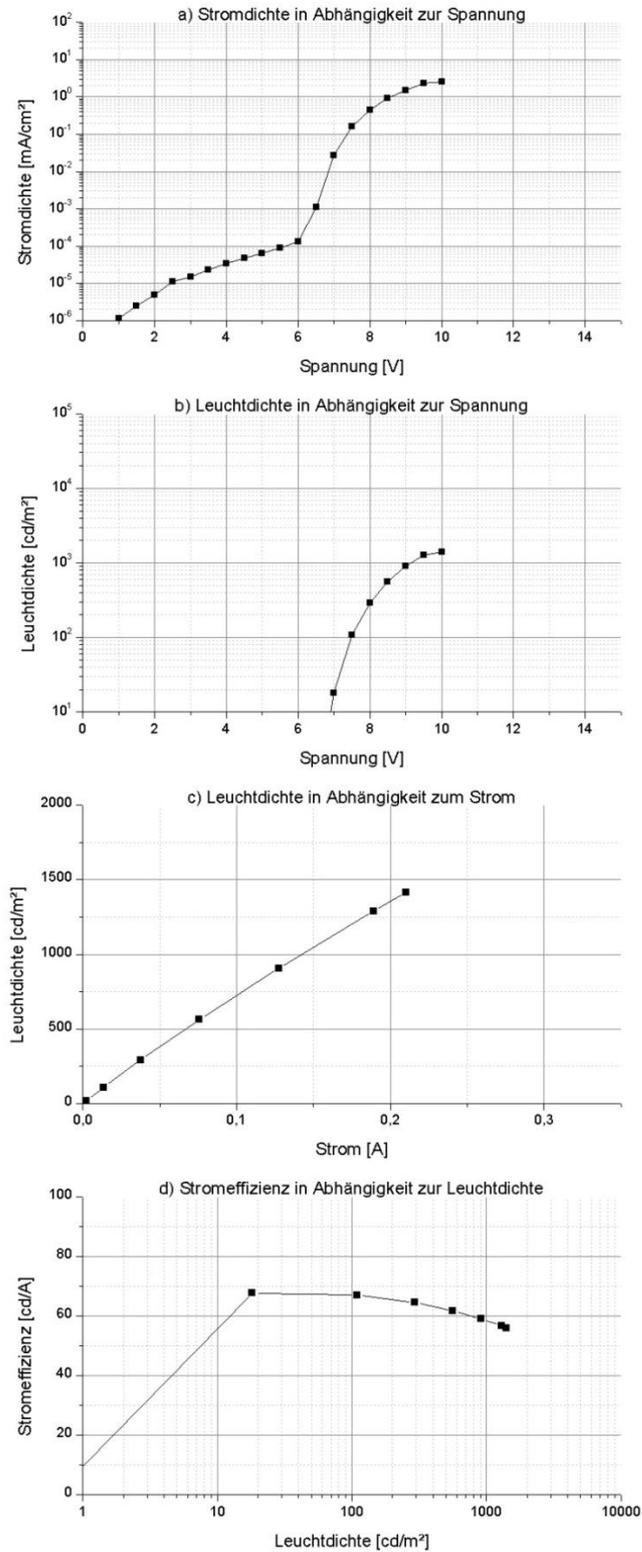
**Anhang 4****warmweiße OLED**

Abb. 34: charakterisierende Grafiken zur warmweißen OLED

Anhang 5

# kaltweiße OLED

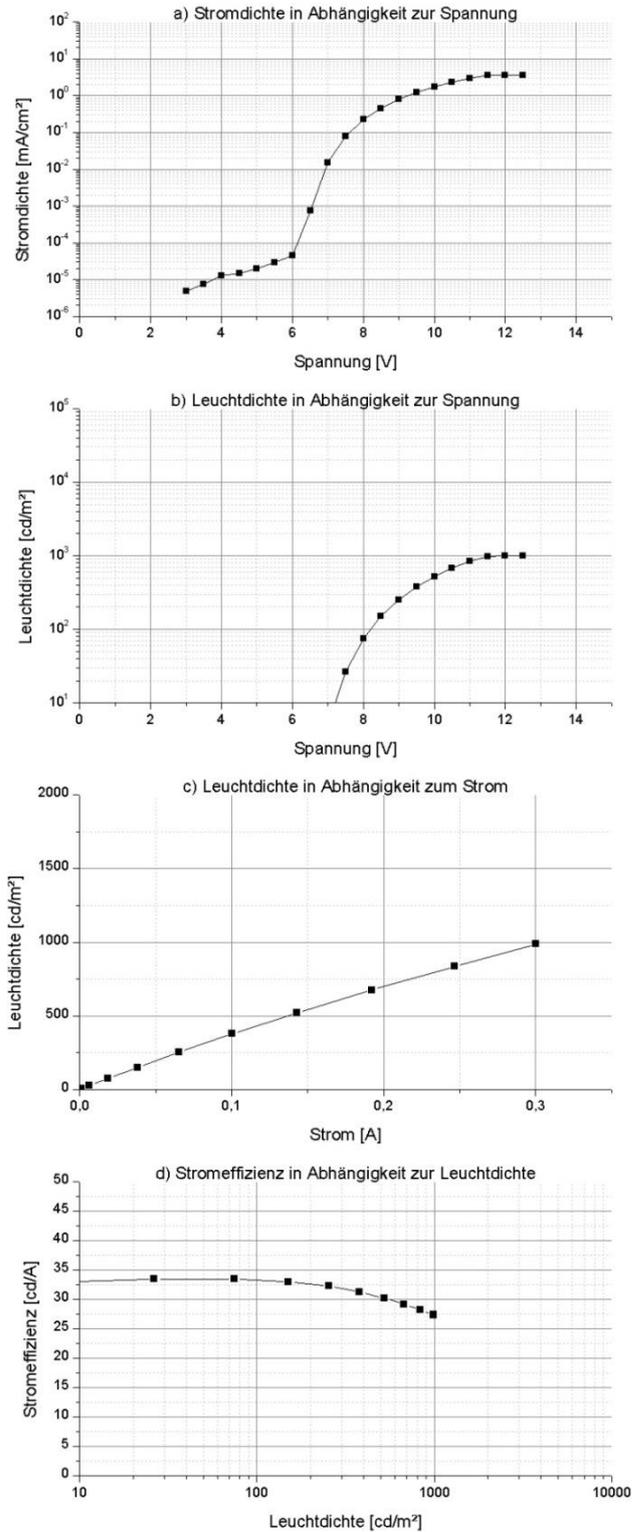


Abb. 35: charakterisierende Grafiken zur kaltweißen OLED

**Anhang 6***Tab. 21: benötigte Volumina zu den entsprechenden Flaschengrößen*

<b>Zellkulturflasche nach Wachstumsfläche</b>	<b>25 cm<sup>2</sup></b>	<b>75 cm<sup>2</sup></b>
<b>Volumen Medium</b>	5 ml	15 ml
<b>Volumen Puffer</b>	2 ml	6 ml
<b>Volumen Trypsin</b>	1 ml	3 ml

*Tab. 22: Zusammensetzung der benötigten HaCaT-Lösungen*

<b>Lösungen</b>	<b>Keratinocyten (HaCaT)</b>
<b>Puffer</b>	5 % EDTA in DBPS
<b>Trypsinlösung</b>	2 % Trypsin, 2,5 % EDTA in DPBS
<b>Nährmedium</b>	1 % Natriumpyruvat, 2 % NaHCO <sub>3</sub> , 2% L-Glutamin, 10% FCS, 10 % DMEM in Aqua dest.

**Anhang 7**

				Versuchsaufbau nach Arbeitsanweisung						
				Farbe blau						
				Zellkonzentration		5*10 <sup>4</sup>				
				Strom in mA		300				
Resazurin-Assay				Zellzahl						
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well				
	3178	26346	23875	147	1	367500			Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	3169	24836	22956	135	1	337500			0,06493013	
	3136	24804	22266	137	1	342500				
	3233	24548	22559	142	1	355000				
				113	1	282500				
Mittelwert	3179	25133,5	22914	123	1	307500				
Standardab	40,2740611	818,544033	700,288988	140	1	350000				
				145	1	362500				
Mittelwert-blank (Mittelwert)		21954,5	19735	Mittelwert		338125				
				Standardabweichung		27235,9482				
Abweichung von der Kontrolle in %		-10,1095447	blau							
				127	1	317500			Stoffwechselumsatz pro Zelle	
				120	1	300000			0,06503811	
				116	1	290000				
				121	1	302500				
				119	1	297500				
				128	1	320000				
				115	1	287500				
				125	1	312500				
				Mittelwert		303437,5				
				Standardabweichung		11383,7535				
Resazurin-Assay				Zellzahl						
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well				
	1830	24381	24050	131	1	327500			Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	1840	24071	23291	121	1	302500			0,07851648	
	1849	23679	23831	112	1	280000				
	1880	22225	23066	109	1	272500				
				107	1	267500				
Mittelwert	1849,75	23589	23559,5	113	1	282500				
Standardab	21,6082546	953,621868	458,234656	98	1	245000				
				95	1	237500				
Mittelwert-blank (Mittelwert)		21739,25	21709,75	Mittelwert		276875				
				Standardabweichung		27235,9482				
Abweichung von der Kontrolle in %		-0,13569925	blau							
				121	1	302500			Stoffwechselumsatz pro Zelle	
				116	1	290000			0,07823333	
				105	1	262500				
				109	1	272500				
				111	1	277500				
				116	1	290000				
				103	1	257500				
				107	1	267500				
				Mittelwert		277500				
				Standardabweichung		14523,6875				
Resazurin-Assay				Zellzahl						
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well				
	1879	20474	23298	95	1	237500			Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	1864	20239	22756	78	1	195000			0,08662196	
	1898	19883	23403	84	1	210000				
	1922	19946	22468	84	1	210000				
				98	1	245000				
Mittelwert	1890,75	20135,5	22981,25	72	1	180000				
Standardab	25,0516134	273,837543	444,359745	93	1	232500				
				70	1	175000				
Mittelwert-blank (Mittelwert)		18244,75	21090,5	Mittelwert		210625				
				Standardabweichung		24582,4505				
Abweichung von der Kontrolle in %		15,5976377	blau							
				60	1	150000			Stoffwechselumsatz pro Zelle	
				67	1	167500			0,11716944	
				75	1	187500				
				67	1	167500				
				66	1	165000				
				78	1	195000				
				76	1	190000				
				87	1	217500				
				Mittelwert		180000				
				Standardabweichung		20077,973				

Abb. 36: Versuchstabelle für die Versuche mit blauem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>

**Anhang 8**

				Versuchsaufbau nach Arbeitsanweisung				
				Farbe grün				
				Zellkonzentration		5*10 <sup>4</sup>		
				Strom in mA		20		
Resazurin-Assay	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	3852	28724	29017	145	1	362500	0,07671171	
	3864	28428	27832	129	1	322500		
	3847	28335	27588	137	1	342500		
	3953	29083	28278	112	1	280000		
				111	1	277500		
Mittelwert	3879	28642,5	28178,75	134	1	335000		
Standardab	49,8464308	337,267945	627,623759	153	1	382500		
				112	1	280000		
Mittelwert-blank (Mittelwert)		24763,5	24299,75	Mittelwert		322812,5		
				Standardabweichung		37737,529		
Abweichung von der Kontrolle in %		-1,87271589	grün				Stoffwechselumsatz pro Zelle	
				108	1	270000	0,08611207	
				114	1	285000		
				150	1	375000		
				96	1	240000		
				97	1	242500		
				116	1	290000		
				122	1	305000		
				100	1	250000		
				Mittelwert		282187,5		
				Standardabweichung		41447,2085		
Resazurin-Assay	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	1919	15213	14783	39	1	97500	0,11677949	
	1922	14634	14748	43	1	107500		
	1925	14585	14085	46	1	115000		
	1972	14543	14577	50	1	125000		
				55	1	137500		
Mittelwert	1934,5	14743,75	14548,25	43	1	107500		
Standardab	25,1197134	315,035845	321,680354	38	1	95000		
				37	1	92500		
Mittelwert-blank (Mittelwert)		12809,25	12613,75	Mittelwert		109687,5		
				Standardabweichung		14600,808		
Abweichung von der Kontrolle in %		-1,5262408	grün				Stoffwechselumsatz pro Zelle	
				49	1	122500	0,12733123	
				48	1	120000		
				36	1	90000		
				37	1	92500		
				32	1	80000		
				32	1	80000		
				46	1	115000		
				37	1	92500		
				Mittelwert		99062,5		
				Standardabweichung		16342,8836		
Resazurin-Assay	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	1868	28218	25400	81	1	202500	0,09445714	
	1860	26135	25796	115	1	287500		
	1865	26557	25336	79	1	197500		
	1922	25785	26583	122	1	305000		
				92	1	230000		
Mittelwert	1878,75	26673,75	25778,75	86	1	215000		
Standardab	29,0215437	1076,79567	573,46745	122	1	305000		
				143	1	357500		
Mittelwert-blank (Mittelwert)		24795	23900	Mittelwert		262500		
				Standardabweichung		55226,8051		
Abweichung von der Kontrolle in %		-3,60959871	grün				Stoffwechselumsatz pro Zelle	
				89	1	222500	0,09717916	
				99	1	247500		
				111	1	277500		
				115	1	287500		
				73	1	182500		
				109	1	272500		
				101	1	252500		
				90	1	225000		
				Mittelwert		245937,5		
				Standardabweichung		32570,5364		

Abb. 37: Versuchstabelle für die Versuche mit grünem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>

**Anhang 9**

				Versuchsaufbau nach Arbeitsanweisung					
				Farbe grün					
				Zellkonzentration 5*10^4					
				Strom in mA 75					
Resazurin-Assay				Zellzahl					
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle		
	3506	26901	27047	131	1	327500	0,07713534		
	3526	26001	27738	109	1	272500			
	3215	25670	28134	139	1	347500			
	3621	24773	26927	107	1	267500			
				100	1	250000			
Mittelwert	3467	25836,25	27461,5	110	1	275000			
Standardabw.	175,330165	879,199399	573,355329	130	1	325000			
			6,2905801	102	1	255000			
				Mittelwert		290000			
				Standardabweichung		35000			
Mittelwert-blank (Mittelwert)				grün				Stoffwechselumsatz pro Zelle	
		22369,25	23994,5	109	1	272500	0,08345913		
				152	1	380000			
Abweichung von der Kontrolle in %				7,26555428					
				99	1	247500			
				123	1	307500			
				103	1	257500			
				110	1	275000			
				124	1	310000			
				100	1	250000			
				Mittelwert		287500			
				Standardabweichung		41457,8099			
Resazurin-Assay				Zellzahl					
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle		
	1947	24346	24304	53	1	132500	0,14043813		
	1969	23945	23521	65	1	162500			
	1969	23005	22380	73	1	182500			
	2033	23167	24875	54	1	135000			
				56	1	140000			
Mittelwert	1979,5	23615,75	23770	64	1	160000			
Standardabw.	37,1438645	636,674367	1080,16696	57	1	142500			
			0,65316579	71	1	177500			
				Mittelwert		154062,5			
				Standardabweichung		18111,5252			
Mittelwert-blank (Mittelwert)				grün				Stoffwechselumsatz pro Zelle	
		21636,25	21790,5	73	1	182500	0,12794422		
				74	1	185000			
Abweichung von der Kontrolle in %				0,71292391					
				52	1	130000			
				67	1	167500			
				64	1	160000			
				65	1	162500			
				69	1	172500			
				81	1	202500			
				Mittelwert		170312,5			
				Standardabweichung		20017,0825			
Resazurin-Assay				Zellzahl					
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle		
	2046	26524	24604	111	1	277500	0,08221958		
	2039	24651	24494	106	1	265000			
	2043	25514	24742	109	1	272500			
	2102	24963	25746	136	1	340000			
				94	1	235000			
Mittelwert	2057,5	25413	24896,5	127	1	317500			
Standardabw.	29,8049213	822,124484	575,350038	118	1	295000			
			-2,03242435	108	1	270000			
				Mittelwert		284062,5			
				Standardabweichung		30642,5332			
Mittelwert-blank (Mittelwert)				grün				Stoffwechselumsatz pro Zelle	
		23355,5	22839	103	1	257500	0,10094586		
				105	1	262500			
Abweichung von der Kontrolle in %				-2,21147053					
				84	1	210000			
				88	1	220000			
				85	1	212500			
				79	1	197500			
				104	1	260000			
				76	1	190000			
				Mittelwert		226250			
				Standardabweichung		27528,3944			

Abb. 38: Versuchstabelle für die Versuche mit grünem Licht bei 1000 cd/m²

**Anhang 10**

								Versuchsaufbau nach Arbeitsanweisung			
								Farbe		orange	
								Zellkonzentration		5*10 <sup>4</sup>	
								Strom in mA		100	
<b>Resazurin-Assay</b>				Zellzahl							
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle				
	3237	26024	28036	135	1	337500	0,05997605				
	3229	26444	28013	126	1	315000					
	3201	26064	27652	171	1	427500					
	3292	27090	27684	218	1	545000					
				147	1	367500					
Mittelwert	3239,75	26405,5	27846,25	123	1	307500					
Standardab	38,09965	494,026652	206,453183	163	1	407500					
				153	1	382500					
Mittelwert-blank (Mittelwert)		23165,75	24606,5	Mittelwert		386250					
				Standardabweichung		71915,7493					
Abweichung von der Kontrolle in %			6,21931084	orange			Stoffwechselumsatz pro Zelle				
				163	1	407500	0,05965212				
				195	1	487500					
				177	1	442500					
				172	1	430000					
				113	1	282500					
				122	1	305000					
				171	1	427500					
				207	1	517500					
				Mittelwert			412500				
				Standardabweichung			76290,9726				
<b>Resazurin-Assay</b>				Zellzahl							
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle				
	1951	24800	24617	136	1	340000	0,07974607				
	1963	23150	23586	126	1	315000					
	1969	22857	22873	157	1	392500					
	2012	23094	23254	96	1	240000					
				95	1	237500					
Mittelwert	1973,75	23475,25	23582,5	100	1	250000					
Standardab	26,5753645	892,250852	748,666592	112	1	280000					
				120	1	300000					
Mittelwert-blank (Mittelwert)		23475,25	23582,5	Mittelwert		294375					
				Standardabweichung		50663,5656					
Abweichung von der Kontrolle in %			0,45686414	orange			Stoffwechselumsatz pro Zelle				
				122	1	305000	0,08674023				
				123	1	307500					
				107	1	267500					
				120	1	300000					
				105	1	262500					
				101	1	252500					
				95	1	237500					
				97	1	242500					
				Mittelwert			271875				
				Standardabweichung			26656,0851				
<b>Resazurin-Assay</b>				Zellzahl							
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle				
	2082	24719	24482	74	1	185000	0,11570398				
	2070	23504	23535	93	1	232500					
	2086	24014	24389	70	1	175000					
	2148	22351	23693	83	1	207500					
				88	1	220000					
Mittelwert	2096,5	23647	24024,75	92	1	230000					
Standardab	35	997,319407	480,162733	84	1	210000					
				70	1	175000					
Mittelwert-blank (Mittelwert)		23647	24024,75	Mittelwert		204375					
				Standardabweichung		21892,8499					
Abweichung von der Kontrolle in %			1,59745422	orange			Stoffwechselumsatz pro Zelle				
				88	1	220000	0,10089134				
				88	1	220000					
				108	1	270000					
				99	1	247500					
				105	1	262500					
				85	1	212500					
				81	1	202500					
				108	1	270000					
				Mittelwert			238125				
				Standardabweichung			25731,4861				

Abb. 39: Versuchstabelle für die Versuche mit orangem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>

**Anhang 11**

					Versuchsaufbau nach Arbeitsanweisung					
					Farbe			warmweiß		
					Zellkonzentration			5*10 <sup>4</sup>		
					Strom in mA			35		
Resazurin-Assay					Zellzahl					
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle			
	3038	20493	20007	140	1	350000	0,05227521			
	3025	20196	19848	146	1	365000				
	3046	20597	20710	125	1	312500				
	3125	20278	20454	130	1	325000				
				121	1	302500				
Mittelwert	3058,5	20391	20254,75	133	1	332500				
Standardab	45,1700491	185,861956	397,399358	135	1	337500				
				131	1	327500				
Mittelwert-blank (Mittelwert)		17332,5	17196,25	Mittelwert		331562,5				
				Standardabweichung		18579,9581				
Abweichung von der Kontrolle in %			-0,78609549	warmweiß			Stoffwechselumsatz pro Zelle			
				135	1	337500	0,05708299			
				104	1	260000				
				126	1	315000				
				133	1	332500				
				115	1	287500				
				108	1	270000				
				120	1	300000				
				123	1	307500				
				Mittelwert		301250				
				Standardabweichung		25950,6744				
Resazurin-Assay					Zellzahl					
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle			
	1931	21839	22279	65	1	162500	0,09532549			
	1948	21498	22848	97	1	242500				
	1917	21390	22754	105	1	262500				
	1984	22054	23420	64	1	160000				
				80	1	200000				
Mittelwert	1945	21695,25	22825,25	83	1	207500				
Standardab	28,9251909	306,295473	468,22742	67	1	167500				
				102	1	255000				
Mittelwert-blank (Mittelwert)		19750,25	20880,25	Mittelwert		207187,5				
				Standardabweichung		39438,1933				
Abweichung von der Kontrolle in %			5,72144656	warmweiß			Stoffwechselumsatz pro Zelle			
				78	1	195000	0,10169985			
				88	1	220000				
				62	1	155000				
				95	1	237500				
				63	1	157500				
				109	1	272500				
				85	1	212500				
				77	1	192500				
				Mittelwert		205312,5				
				Standardabweichung		36921,3163				
Resazurin-Assay					Zellzahl					
	blank	Kontrolle	15min	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle			
	1995	26768	27426	122	1	305000	0,0830181			
	2005	25252	27015	106	1	265000				
	1993	26025	27257	106	1	265000				
	2055	26304	28214	110	1	275000				
				114	1	285000				
Mittelwert	2012	26087,25	27478	126	1	315000				
Standardab	29,143324	635,588638	518,848083	119	1	297500				
				125	1	312500				
Mittelwert-blank (Mittelwert)		24075,25	25466	Mittelwert		290000				
				Standardabweichung		19080,4219				
Abweichung von der Kontrolle in %			5,77667937	warmweiß			Stoffwechselumsatz pro Zelle			
				118	1	295000	0,08231434			
				131	1	327500				
				123	1	307500				
				120	1	300000				
				122	1	305000				
				120	1	300000				
				135	1	337500				
				121	1	302500				
				Mittelwert		309375				
				Standardabweichung		14017,2884				

Abb. 40: Versuchstabelle für die Versuche mit warmweißem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>

**Anhang 12**

Versuchsaufbau nach Arbeitsanweisung							
				Farbe warmweiß			
				Zellkonzentration $5 \cdot 10^4$			
				Strom in mA 140			
Resazurin-Assay							
	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle
	3529	29327	28103	129	1	322500	0,0795531
	3521	28714	27398	176	1	440000	
	3539	29190	28683	100	1	250000	
	3623	27914	28549	102	1	255000	
				122	1	305000	
Mittelwert	3553	28786,25	28183,25	123	1	307500	
Standardabw.	47,2440472	638,086919	579,246853	128	1	320000	
				135	1	337500	
Mittelwert-blank (Mittelwert)		25233,25	24630,25		Mittelwert	317187,5	
					Standardabweichung	54949,373	
Abweichung von der Kontrolle in %		-2,38970406	warmweiß				Stoffwechselumsatz pro Zelle
				114	1	285000	0,08142231
				116	1	290000	
				100	1	250000	
				117	1	292500	
				133	1	332500	
				175	1	437500	
				113	1	282500	
				100	1	250000	
					Mittelwert	302500	
					Standardabweichung	56568,5425	
Resazurin-Assay							
	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle
	1808	24932	25279	59	1	147500	0,12860777
	1815	25189	24693	72	1	180000	
	1804	24617	24366	50	1	125000	
	1890	23569	24315	69	1	172500	
				74	1	185000	
Mittelwert	1829,25	24576,75	24663,25	70	1	175000	
Standardabw.	40,7543454	711,391301	443,346648	85	1	212500	
				87	1	217500	
Mittelwert-blank (Mittelwert)		22747,5	22834		Mittelwert	176875	
					Standardabweichung	28661,5487	
Abweichung von der Kontrolle in %		0,38026157	warmweiß				Stoffwechselumsatz pro Zelle
				92	1	230000	0,11747395
				86	1	215000	
				62	1	155000	
				71	1	177500	
				70	1	175000	
				71	1	177500	
				86	1	215000	
				84	1	210000	
					Mittelwert	194375	
					Standardabweichung	24645,9302	
Resazurin-Assay							
	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle
	1930	26627	24141	89	1	222500	0,11047338
	1925	24143	23713	97	1	242500	
	1923	25468	24079	78	1	195000	
	1972	23343	23290	71	1	177500	
				88	1	220000	
Mittelwert	1937,5	24895,25	23805,75	91	1	227500	
Standardabw.	23,1876404	1449,40916	392,28338	73	1	182500	
				78	1	195000	
Mittelwert-blank (Mittelwert)		22957,75	21868,25		Mittelwert	207812,5	
					Standardabweichung	21917,3697	
Abweichung von der Kontrolle in %		-4,74567412	warmweiß				Stoffwechselumsatz pro Zelle
				64	1	160000	0,12793126
				73	1	182500	
				65	1	162500	
				51	1	127500	
				61	1	152500	
				76	1	190000	
				78	1	195000	
				79	1	197500	
					Mittelwert	170937,5	
					Standardabweichung	22910,7473	

Abb. 41: Versuchstabelle für die Versuche mit warmweißem Licht bei 1000 cd/m²

**Anhang 13**

Versuchsaufbau nach Arbeitsanweisung									
				Farbe		kaltweiß			
				Zellkonzentration		5*10 <sup>4</sup>			
				Strom in mA		70			
Resazurin-Assay									
	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	3014	20401	20214	103	1		257500	0,05896121	
	3021	20066	19865	107	1		267500		
	2998	19800	19975	125	1		312500		
	3086	20247	20248	115	1		287500		
				127	1		317500		
Mittelwert	3029,75	20128,5	20075,5	136	1		340000		
Standardab	38,7158452	258,274402	185,606214	110	1		275000		
				105	1		262500		
Mittelwert-blank (Mittelwert)		17098,75	17045,75	Mittelwert			290000		
Abweichung von der Kontrolle in %			-0,30996418	Standardabweichung			28090,2563		
				kaltweiß				Stoffwechselumsatz pro Zelle	
				118	1		295000	0,05909686	
				115	1		287500		
				120	1		300000		
				124	1		310000		
				105	1		262500		
				116	1		290000		
				105	1		262500		
				120	1		300000		
				Mittelwert			288437,5		
				Standardabweichung			16295,0098		
Resazurin-Assay									
	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	Kontrolle	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	1923	22345	22008	95	1		237500	0,09005552	
	1915	21992	21647	103	1		257500		
	1917	21595	21343	66	1		165000		
	1968	21265	21371	84	1		210000		
				79	1		197500		
Mittelwert	1930,75	21799,25	21592,25	84	1		210000		
Standardab	25,0649157	469,800223	309,258657	102	1		255000		
				93	1		232500		
Mittelwert-blank (Mittelwert)		19868,5	19661,5	Mittelwert			220625		
Abweichung von der Kontrolle in %			-1,04185016	Standardabweichung			29201,616		
				kaltweiß				Stoffwechselumsatz pro Zelle	
				111	1		277500	0,08911728	
				87	1		217500		
				75	1		187500		
				107	1		267500		
				73	1		182500		
				94	1		235000		
				80	1		200000		
				79	1		197500		
				Mittelwert			220625		
				Standardabweichung			33836,6942		
Resazurin-Assay									
	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	pendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle		
	1851	15475	15253	42	1		105000	0,1304878	
	1866	15195	14937	72	1		180000		
	1862	15146	15010	44	1		110000		
	1913	15176	14762	30	1		75000		
				37	1		92500		
Mittelwert	1873	15248	14990,5	35	1		87500		
Standardab	27,4104603	152,671761	203,601735	35	1		87500		
				33	1		82500		
Mittelwert-blank (Mittelwert)		13375	13117,5	Mittelwert			102500		
Abweichung von der Kontrolle in %			-1,92523364	Standardabweichung			31174,9098		
				kaltweiß				Stoffwechselumsatz pro Zelle	
				46	1		115000	0,12062069	
				42	1		105000		
				47	1		117500		
				37	1		92500		
				44	1		110000		
				45	1		112500		
				35	1		87500		
				52	1		130000		
				Mittelwert			108750		
				Standardabweichung			12808,6885		

Abb. 42: Versuchstabelle für die Versuche mit kaltweißem Licht bei 300 cd/m<sup>2</sup>

**Anhang 14**

Versuchsaufbau nach Arbeitsanweisung								
				Farbe kaltweiß				
				Zellkonzentration		5*10 <sup>4</sup>		
				Strom in mA		300		
Resazurin-Assay	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	3488	27538	29720	139	1	347500	0,06487366	
	3492	27591	28181	175	1	437500		
	3330	26993	29139	133	1	332500		
	3582	26891	27754	130	1	325000		
				146	1	365000		
Mittelwert	3473	27253,25	28698,5	143	1	357500		
Standardabw.	104,747315	362,451261	893,940527	169	1	422500		
				138	1	345000		
			5,30303725		Mittelwert	366562,5		
					Standardabweichung	38668,008		
				kaltweiß				Stoffwechselumsatz pro Zelle
Mittelwert-blank (Mittelwert)		23780,25	25225,5	132	1	330000	0,07673156	
				130	1	325000		
Abweichung von der Kontrolle in %			6,07752231	126	1	315000		
				148	1	370000		
				122	1	305000		
				149	1	372500		
				125	1	312500		
				120	1	300000		
					Mittelwert	328750		
					Standardabweichung	26160,5619		
Resazurin-Assay	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	1888	23407	21970	46	1	115000	0,14559295	
	1894	22484	21921	68	1	170000		
	1875	22621	22407	55	1	137500		
	1934	21703	21745	54	1	135000		
				50	1	125000		
Mittelwert	1897,75	22553,75	22010,75	69	1	172500		
Standardabw.	25,4345565	697,901318	281,27848	61	1	152500		
				51	1	127500		
			-2,40758189		Mittelwert	141875		
					Standardabweichung	19754,3508		
				kaltweiß				Stoffwechselumsatz pro Zelle
Mittelwert-blank (Mittelwert)		20656	20113	82	1	205000	0,12401079	
				64	1	160000		
Abweichung von der Kontrolle in %			-2,62877614	58	1	145000		
				54	1	135000		
				55	1	137500		
				57	1	142500		
				66	1	165000		
				83	1	207500		
					Mittelwert	162187,5		
					Standardabweichung	27226,9828		
Resazurin-Assay	blank	Kontrolle	15min	Zellzahl	resuspendiertes Medium	Zellzahl pro Well	Stoffwechselumsatz pro Zelle	
	1849	24451	23385	74	1	185000	0,11935775	
	1828	22838	21611	74	1	185000		
	1828	22563	22325	68	1	170000		
	1871	22268	22010	65	1	162500		
				70	1	175000		
Mittelwert	1844	23030	22332,75	77	1	192500		
Standardabw.	20,5426386	975,506364	759,908054	68	1	170000		
				72	1	180000		
			-3,02757273		Mittelwert	177500		
					Standardabweichung	9270,24811		
				kaltweiß				Stoffwechselumsatz pro Zelle
Mittelwert-blank (Mittelwert)		21186	20488,75	67	1	167500	0,11583746	
				66	1	165000		
Abweichung von der Kontrolle in %			-3,29108845	73	1	182500		
				66	1	165000		
				73	1	182500		
				69	1	172500		
				73	1	182500		
				79	1	197500		
					Mittelwert	176875		
					Standardabweichung	10661,7013		

Abb. 43: Versuchstabelle für die Versuche mit kaltweißem Licht bei 1000 cd/m<sup>2</sup>

**Anhang 15**

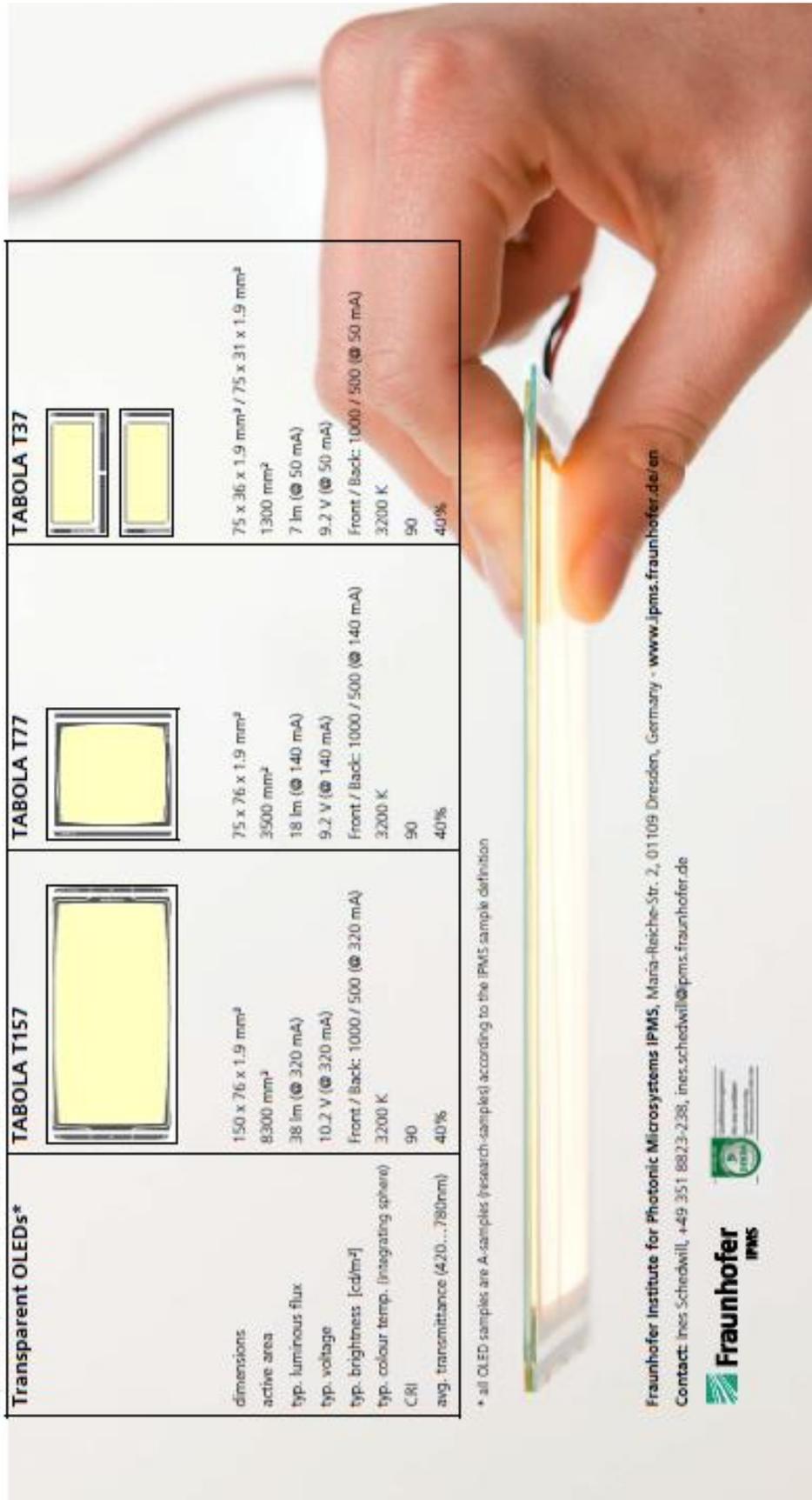


Preliminary Datasheet\* – 01.08.2011

**Transparent OLEDs\***

	TABOLA T157	TABOLA T77	TABOLA T37
dimensions	150 x 76 x 1.9 mm <sup>3</sup>	75 x 76 x 1.9 mm <sup>3</sup>	75 x 36 x 1.9 mm <sup>3</sup> / 75 x 31 x 1.9 mm <sup>3</sup>
active area	8300 mm <sup>2</sup>	3500 mm <sup>2</sup>	1300 mm <sup>2</sup>
typ. luminous flux	38 lm (⊙ 320 mA)	18 lm (⊙ 140 mA)	7 lm (⊙ 50 mA)
typ. voltage	10.2 V (⊙ 320 mA)	9.2 V (⊙ 140 mA)	9.2 V (⊙ 50 mA)
typ. brightness [cd/m <sup>2</sup> ]	Front / Back: 1000 / 500 (⊙ 320 mA)	Front / Back: 1000 / 500 (⊙ 140 mA)	Front / Back: 1000 / 500 (⊙ 50 mA)
typ. colour temp. (integrating sphere)	3200 K	3200 K	3200 K
CRI	90	90	90
avg. transmittance (420...780nm)	40%	40%	40%

\* all OLED samples are A-samples (research-samples) according to the IPMS sample definition



Fraunhofer Institute for Photonic Microsystems IPMS, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden, Germany - [www.ipms.fraunhofer.de/en](http://www.ipms.fraunhofer.de/en)

Contact: ines.schedwill, +49 351 8823-238, ines.schedwill@ipms.fraunhofer.de

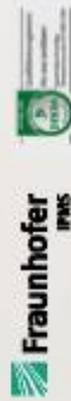


Abb. 36: Datenblatt der Tabola OLED; Verwendung der Tabola T157

**Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbstständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt wurde und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebenen oder beschriebenen Software, verwendet wurden.

Ort, Datum,

Unterschrift