



# [ REVOLUTION AIR ]

ENTWICKLUNG EINES EFFIZIENTEN  
LUFTREINIGUNGSSYSTEMS AUF BASIS VON UV-LEDS

FACHBEREICH:

ARBEITSWELT

BETREUER:

FABIAN BOTT

DR. MARTIN LÖFFLER

MAXIMILIAN PFANNKUCH  
JARO FILIP DOMINIK HEIN

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung.....	2
2	Einleitung.....	3
2.1	Projektidee/ Zielsetzung.....	3
2.2	Bezug zur aktuellen Lage.....	3
2.3	Historische Entwicklung und aktueller Stand der Technik .....	3
2.4	LEDs im Vergleich zu Quecksilberdampf lampen .....	3
3	Theoretische Grundlagen .....	4
3.1	Was ist UVC-Licht? .....	4
3.2	Desinfizierende Wirkungsweise des UVC-Lichts.....	4
3.2.1	DNA-Schäden.....	4
3.2.2	Sicherheit.....	4
4	Biologische Untersuchungen .....	5
4.1.1	Vergleich UVC Resistenzen E. coli und SARS-CoV-2.....	5
4.4	Bestrahlungstest Nr. 2.....	6
4.4.1	Erkenntnisgewinn für die Weiterentwicklung .....	7
5	Temperatur-Regel-Messmodul (TRM).....	7
5.1	Materialien .....	7
5.2	Versuchsaufbau:.....	8
5.3	Vorbereitung .....	8
5.4	Versuche LEDs .....	8
5.4.1	UVC LED Nr. 1 .....	8
5.4.2	UVC LED Nr. 4 .....	8
6	Bau des zweiten Prototyps .....	9
6.1	Elektronik des zweiten Prototyps.....	9
6.2	Validierung der Funktionalität des zweiten Prototyps.....	10
6.2.1	Ablauf des Experimentes.....	10
6.2.2	Ergebnis: .....	10
6.3	Messung des Luftstroms und Berechnung der Strahlendosis .....	11
6.4	Temperaturanalyse des Gerätes .....	11
7	Informatik.....	12
7.1	Ziel des Geräts und der Sensorik.....	12
7.2	Datenschutzproblematik.....	12
7.3	Alternative Auswertungsstrategie.....	12
7.4	Durchführung und Auswertung.....	13
7.5	Serverkommunikation .....	13
7.6	APP Entwicklung.....	13
8	Expiratorischer Filter: .....	13
9	Zusammenfassung/ Fazit.....	14
10	Ausblick.....	15

11	Quellen- und Literaturverzeichnis .....	17
11.1	Informationsquellen:.....	17
11.2	Bildquellen: .....	18
12	Wir danken! .....	19
	Authentizitätserklärung.....	20

## 1 Kurzfassung

Eine neue Entwicklung der Halbleiterindustrie ermöglicht es, UVC-Licht mithilfe von LEDs zu erzeugen. Diese LEDs haben Vorteile verglichen mit konventionellen Quecksilberdampflampen hinsichtlich der Ansteuerung, dem physischen Aufbau und der Umweltverträglichkeit.

Wir haben ein System entwickelt, welches autonom Luft durch UVC-Licht desinfiziert. Basierend auf verschiedenen mikrobiologischen Tests konnten wir die Wirksamkeit der LEDs bestätigen und durch die Daten unser Produktdesign verbessern. Des Weiteren steigert künstliche Intelligenz und die Optimierung mithilfe von Big Data die Effizienz im Betrieb. Die Zusammenführung der Daten in einer App ermöglicht eine smarte Steuerung. Durch Zusammenarbeit mit Mitarbeitenden in einer Krankenhausumgebung kann diese Entwicklung zielgerichtet eingesetzt werden.

## 2 Einleitung

### 2.1 Projektidee/ Zielsetzung

Luftdesinfektion spielt in allen Bereichen heutzutage eine wichtige Rolle. Wo nur möglich werden reinigende Geräte eingesetzt, um einen sicheren Lebensort oder Arbeitsplatz zu gewährleisten. An diesem Punkt setzt unsere Arbeit an, denn wir wollen ein Luftreinigungsgerät entwickeln, welches bedeutende Vorteile gegenüber den bisher auf dem Markt üblichen Geräten aufweist. Der Fokus liegt auf der zukunftsweisenden Technologie der UVC-LEDs, welche viele Vorteile mit sich bringen. Diese LEDs sollen mikrobiologisch untersucht und in ihrer Wirksamkeit bestätigt werden. Zusammen mit intelligenter Software soll ein portables und smartes Gerät gebaut werden, welches überall und von jedem genutzt werden kann.

### 2.2 Bezug zur aktuellen Lage

Aufgrund des Coronavirus (SARS-CoV-2) wurde das öffentliche Interesse an und die Notwendigkeit von Hygiene und Desinfektion erheblich gestärkt. Gerade Erreger, die sich über Aerosole in der Luft verbreiten, stellen ein großes Problem dar.<sup>[19]</sup> Als Schüler haben wir festgestellt, dass das Lüften im Winter keine wirklich gute Alternative darstellt. Mithilfe eines Luftdesinfektionssystems, welches die Luft stetig von Kontaminationen befreit, könnte man übermäßiges Lüften oder das Tragen eines Mund-Nasenschutzes ersetzen. Zudem würde dies auch die generelle Verbreitung von weiteren Krankheitserregern über Aerosole verhindern.

### 2.3 Historische Entwicklung und aktueller Stand der Technik

Im Jahre 1892 wurde die erste Quecksilberdampflampe entwickelt. Erst in den 50er-Jahren wurde diese Technik interessanter, da die ersten antibiotikaresistenten Keime entdeckt wurden.

Mit den 60er-Jahren begann die Entwicklung der LEDs. Zuerst konnten nur Infrarot-LEDs hergestellt werden, doch mit der Zeit war es möglich die Wellenlänge der Leuchtmittel zu senken. Im Jahre 1992 wurde die erste blaue, somit energiereiche LED entwickelt, welche zwei Jahre später mit einer Phosphorschicht versehen wurde, um weißes Licht zu erzeugen. Dies war auch die Geburtsstunde der ersten LED im ultravioletten Bereich.<sup>[14][24]</sup>

### 2.4 LEDs im Vergleich zu Quecksilberdampflampen

Quecksilberdampflampe	UVC LED
+ Günstige Leuchtmittel	- Hohe Kosten pro W (noch)
+ Hohe Ausgangsleistung	
- Hochspannung erlaubt nur feste Einbauten und trockene Umgebungen	+ Niederspannung ermöglicht einfachere Ansteuerung und den Verbau in feuchten Systemen oder Akkuanwendungen
- Hoher Platzbedarf und begrenzte Einbaumöglichkeiten	+ Geringer Platzbedarf ermöglicht nahezu grenzenlose Einbaumöglichkeiten
- Feste Wellenlänge und breites Spektrum, welches zur Ozonbildung führen kann	+ Wellenlänge ist einstellbar durch Zusammensetzung des Halbleiters
- Hohe Wärmeproduktion von ca. 600 °C - 950 °C	+ Genaues Emissionsspektrum verhindert die Produktion von unerwünschtem Ozon
- Aufwärmzeit benötigt	+ Leicht ansteuerbar und in technische Entwicklung integrierbar
- Wechsel alle 9.000 Betriebsstunden	+ Langlebig und wartungsfrei
- Beinhaltet hochgiftiges Quecksilber	+ Keine Aufwärmzeit
- Leuchtmittel kann durch Erschütterung brechen und Quecksilber freisetzen	+ Keine toxischen Schwermetalle (Quecksilber)
- Aufwendige Ansteuerungstechnik	+ Robust gegen Vibration und Schläge
- schlecht dimmbar	+ Dimmbar von 0 bis 100 %

### 3 Theoretische Grundlagen

#### 3.1 Was ist UVC-Licht?

„Das elektromagnetische Wellenspektrum ist die Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen verschiedener Wellenlängen.“<sup>[11]</sup>

Ein Teil dieses Spektrums ist das sichtbare Licht von 390 nm (violett) bis 780 nm (rot). Angrenzend findet sich der UVA-Bereich von 380 nm bis 315 nm. Darauf folgt mittelwelliges UV-B Licht im Bereich von 315 nm bis 280 nm. Der letzte Teil vor der Röntgenstrahlung ist der UVC-Bereich mit 280 nm bis 100 nm. Dieser wird von dem in der Atmosphäre enthaltenen Ozon nahezu vollständig herausgefiltert.

Weiter unterteilt sich der UVC-Bereich noch in die VUV-Strahlung. Diese existiert nur unter Vakuum und hat keinen genau definierten Bereich. Verschiedene Quellen nennen ihr langwelliges Ende bei ca. 190 nm und ihr kurzwelliges Ende zwischen 140 nm und 5 nm.<sup>[9]</sup> Durch die Filterung des UVC-Lichts durch die Ozonschicht haben die Lebewesen auf der Erde keinen Schutzmechanismus entwickelt, um speziell dieser zu widerstehen. Deshalb dringt der UVC-Anteil nahezu ungehindert in die Zellen ein. Anders sieht das bei UVA und UVB aus, durch Wachsschichten auf Pflanzen oder Farbpigmenten können sich Organismen gegen die besagte Strahlung schützen.<sup>[9]</sup>

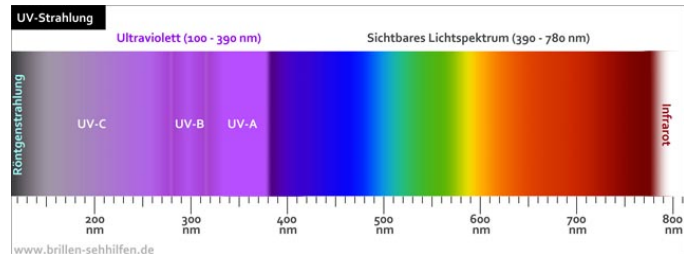


Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum von 100-780nm (Quelle: <https://www.brillen-sehhilfen.de/sonnenbrillen/uv-strahlung.php>) abgerufen: 14.01.2021

#### 3.2 Desinfizierende Wirkungsweise des UVC-Lichts

##### 3.2.1 DNA-Schäden

Das Erbgut, also der Bauplan der meisten Pro- und Eukaryoten, wird in Form von DNA gespeichert. Bei Viren besteht eine Ausnahme, da RNA-Viren wie das Coronavirus ihre Programme zur Reproduktion (Genom) in der RNA gespeichert haben. In beiden Fällen sind die Informationen in Basen gespeichert, unter anderem in den Pyrimidinbasen Cytosin, Thymin und Uracil. Diese Basen haben die Eigenschaft, unter UV-Licht mit benachbarten Pyrimidinbasen-Basen Dimere zu bilden. Dimere sind Verbindungen zweier gleicher Basen, welche das Ablesen und Vervielfältigen des Erbgutes verhindern. Mutationen im Genom erzeugen an der Stelle der Dimere eine Schleifenbildung, welche das gesamte Lesemuster des folgenden Genoms verändert. Durch diese Rasterschubmutationen können die Aminosäuren nicht richtig abgelesen werden, wodurch fehlerhafte oder defekte Proteine gebildet werden. Das hat wiederum je nach Position der Mutation zur Folge, dass wichtige Proteine oder Enzyme für z. B. Stoffwechsel oder Reproduktion nicht oder nicht einwandfrei funktionieren. Für den Virus oder das Bakterium bedeutet dies, dass es nicht reproduziert werden kann und dadurch unschädlich gemacht ist. Durch zelleigene Reparaturmechanismen und die Doppelhelix-Form der DNA können sich die Zellen teilweise von den UV-Licht-Schäden regenerieren. Das Prinzip der Desinfektion mit UVC-Licht beruht daher darauf, dass zu viele Genomschäden entstehen, die die Zelle nicht reparieren kann, sodass sie schlussendlich verendet.<sup>[9]</sup>

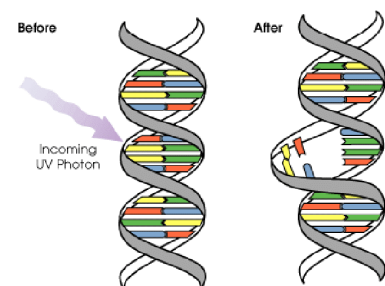


Abbildung 2: Bildung eines Dimers (Quelle: [https://www.researchgate.net/figure/UV-radiation-is-one-of-the-most-prominent-causes-of-DNA-damage-Since-UV-radiation-is-fig15\\_228369112](https://www.researchgate.net/figure/UV-radiation-is-one-of-the-most-prominent-causes-of-DNA-damage-Since-UV-radiation-is-fig15_228369112)) abgerufen: 14.01.2021

##### 3.2.2 Sicherheit

Nach unserer Sicherheitsrecherche ist obligatorisch die maximal verträgliche Strahlendosis der Haut einzuhalten. Laut der „American Conference of Governmental Industrial Hygienists“ (ACGIH) sind Strahlungsintensitäten für die Haut bis zu 0,1  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  verträglich.<sup>[4]</sup>

Durch die physikalischen Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen im UV/Vis-Bereich findet eine Abschirmung vor der Strahlung einfach durch die Kleidung statt.

Einen besonderen Schutz benötigen die Augen, da diese noch stärker von hochenergetischem Licht betroffen sind als andere Organe. Bei einer zu hohen Dosis an UV-Licht kann die Hornhaut einen Sonnenbrand erleiden (UV-Keratitis). Dies führt zu akuten Schmerzen und kann eine Eintrübung der Hornhaut zur Folge haben.<sup>[22]</sup> Aus diesem Grund haben wir die vorhandene Schutzbrille, welche bei Experimenten mit UVC-Licht notwendig ist, in unserem Fotometer des Schullabors analysiert. Ergebnis dessen war, dass die Brille den gesamten Bereich von 348 nm bis 192 nm herausfiltert und somit den hinreichenden Schutz für die Augen gewährleistet.

## 4 Biologische Untersuchungen

### 4.1.1 Vergleich UVC Resistenzen E. coli und SARS-CoV-2

Trotz der aktuellen Lage, in welcher in erster Linie von Viren die Rede ist, haben wir für unsere Tests auf Bakterien zurückgegriffen. Die Kultivierung von Viren gehört zu den schwierigeren biologischen Aufgabenfeldern, da sie stets einen Wirtsorganismus benötigt, um sich zu vermehren. Nach einer Recherche kam zudem schnell die Erkenntnis, dass unsere Schule nicht über ein solches Labor (Sicherheitsstufe 3) verfügt, in dem Viren des Corona-Stammes gezüchtet werden dürfen.<sup>[5]</sup>

Nach etwas Recherche sind wir auf eine Besonderheit von E. coli gestoßen, weshalb wir die folgenden Experimente nur noch damit durchgeführt haben.

Rein optisch fällt auf den ersten Blick der ähnliche Aufbau des *Escherichia Coli* Bakterium und dem *SARS-CoV-2 Virus* auf. Beide Keime sind gekapselt und in ihrem inneren liegt ihr Erbgut nicht kondensiert vor. Trotz der fundamentalen Unterschiede der Replikation und dem genauen Aufbau beider Keime ist die UVC Verträglichkeit laut der Fachliteratur im ähnlichen Dosisbereich.

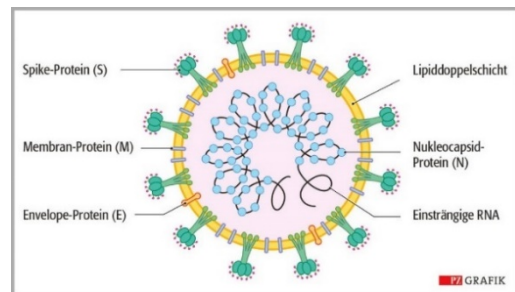


Abbildung 3: Sars-CoV-2<sup>[3]</sup>

Der Virus SARS-CoV-2 wurde in vielen verschiedenen Quellen aufgrund verschiedener experimenteller Aufbauten als unterschiedlich resistent gegen UVC- Licht beschrieben. Daher ist die Datenlage nicht eindeutig. Laut<sup>[26]</sup> konnten die Forscher eine Reduktion der Keime unter der Bestrahlung mit 254nm UVC Licht feststellen. In Ihrem Aufbau gelang es Ihnen, getrocknete *SARS-CoV-2* Proben mit einer Strahlendosis von umgerechnet 17,5 J/m<sup>2</sup> zu bestrahlen, um eine log 1 Desinfektion zu erreichen. Um eine vollständige Desinfektion zu erreichen, benötigten Sie eine Strahlendosis von 35 J/m<sup>2</sup>.

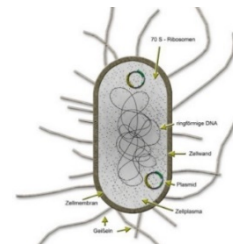


Abbildung 5: E.Coli<sup>[4]</sup>

Das Bakterium *Escherichia Coli* in Nährmedium Suspension benötigte der Literatur<sup>[27]</sup> nach für eine log 1 Desinfektion eine Dosis von 180 J/m<sup>2</sup>. Als Referenzwert, wie ähnlich die Eigenschaften der Keime sind, haben wir die Dosis für eine log 3 Desinfektion der *Adenovirus* herausgesucht. Diese Dosis beträgt 750-1300 J/m<sup>2</sup>.<sup>[27]</sup>

Aufgrund dieser beiden Quellen stellen wir die These auf, dass unser entwickelter Prototyp erfolgreich im Einsatz gegen das SARS-CoV-2 Virus ist. Um diese These zu bestätigen benötigt, es jedoch weitere Experimente, welche im Optimalfall unter Realbedingungen stattfinden.

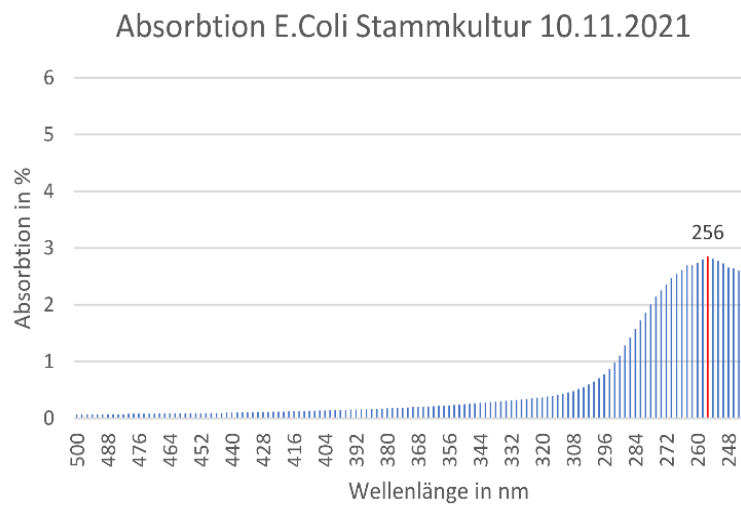


Abbildung 6: Messung Absorption

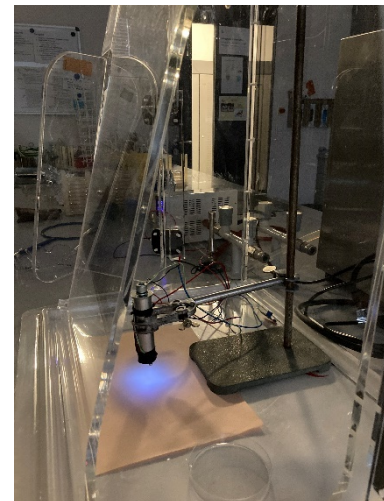


Abbildung 7: Versuchsaufbau im Herolab mit aktiver UVC-LED

Aufgrund dieser Tatsache verwendeten wir in allen folgenden Experimenten *E. Coli* als annähernden Surrogat für SARS-CoV-2. Um die These zu bestätigen, dass *E.Coli* wirklich bei ca. 260nm am besten absorbiert, haben wir eine Probe in unser Photometer gegeben. In folgendem Graph erkennt man, dass das Absorptionsmaximum im belastbaren Bereich ohne Streuung von *E. Coli* bei 256nm liegt.

#### 4.4 Bestrahlungstest Nr. 2

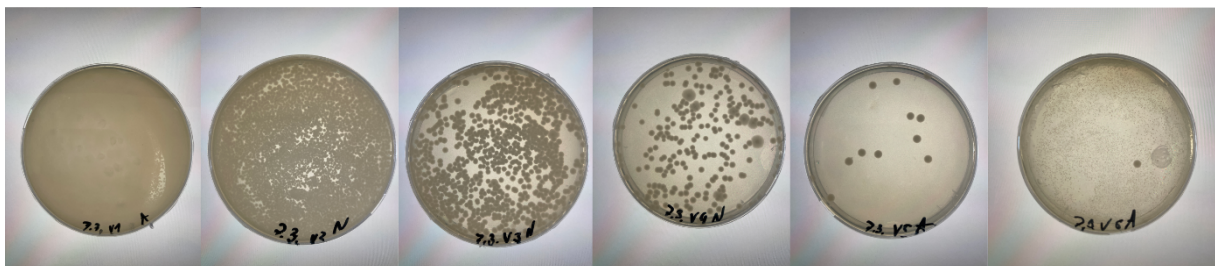
Bevor wir mit den Experimenten beginnen konnten, mussten wir bestimmen, ob unsere Petrischalen UVC durchlässig sind. Durch einen Versuch mit dem Fotometer konnten wir herausfinden, dass der für uns interessante Spektralbereich durch das Polystyrol der Petrischale herausgefiltert wird. Daher mussten wir bei jedem Experiment die Deckel abnehmen.

Aufgrund der Erkenntnisse aus vorherigen Experimenten wurde von LB Agar auf Casein-Sojapepton (CaSo) Agar umgestiegen, da dieser besonders gut geeignet für Luftkeime ist. Ein Fehler in vorherigen Experimenten war die Verwendung dreier Testkeime in einer Petrischale. Aus den vorher beschriebenen Gründen fiel die Wahl auf *E. coli* als einziger Testkeim.

Den Fehler der zu hohen Keimzahl auf den TP konnten wir dadurch eliminieren, dass wir eine Verdünnungsreihe unserer Stammkultur von  $10^{-1}$  bis  $10^{-6}$  ml erstellten. Durch Applizieren dieser Verdünnungsschritte (0,5 ml) auf jeweils eine TP konnten wir als Optimum für unser Experiment eine Verdünnung von  $10^{-4}$  ml feststellen. Bei dieser Verdünnung haben wir genügend Abstand zwischen den Kolonien, um sicher auszählen und gleichzeitig genügend Kolonien, um die Abtötungsrate berechnen zu können.

In einem zweiten Anlauf der Verdünnungsreihe haben wir kleine Faktoren geändert, wie die Verwendung von sterilem Material und weniger Flüssigkeit, um unsere vorherigen Ergebnisse zu bestätigen und die Fraktionierung noch weiter zu optimieren.

Um die zweite große Testreihe zu starten, musste der LED-Aufbau noch optimiert werden. Diesmal wurde die LED auf einem Stativ befestigt und ein Abstand von 36 mm gewählt, um eine optimale Ausleuchtung der 90 mm



TP zu erlangen. Hierdurch wurde die Bestrahlungsglocke hinfällig und ein weiterer Verschleppungsfaktor entfiel. Am Vortag haben wir für das Hauptexperiment ausreichend CaSo TP vorbereitet und inkubiert, um mögliche Kontamination während des Gießens auszuschließen. Zum Experiment fertigten wir eine Verdünnungsreihe an, um genügend Lösung mit  $c=10^{-4}$  ml zu haben.

Als der Versuchsaufbau desinfiziert war, applizierten wir 500  $\mu\text{L}$  der  $10^{-4}$  ml Lösung auf die TP und bestrahlten sie jeweils über 60, 90, 120 und 180 Sekunden. Dies wurde wieder dreimal durchgeführt und zusätzlich einmal als Kontrolle mit ausgeschalteter LED. Diesmal wurden die Bestrahlungszeiten auf Basis des ersten Experimentes gewählt. Ziel war die Abtötung einer Stufe von 1 log, also 90 %.

Nach einem Tag Inkubation konnten wir auf diese Weise feststellen, dass die vorherigen Fehler nicht erneut auftraten.

Auf unseren TP wuchsen die Kolonien sehr fragmentiert und es sind keine Verschleppungen oder Fremdkontaminationen aufgetreten. Der einzige Fehler war, dass in den Randbereichen deutlich mehr Keime wuchsen als in der Mitte. Das kann die Folge der LED Einstellung gewesen sein, da wir die Höhe des Agars nicht bedacht hatten, wodurch der Rand wahrscheinlich unzureichend bestrahlt wurde. Ein anderer Grund könnten die Kapillarkräfte gewesen sein, welche die Keimsuspension in den Zwischenraum von Agar und Petrischale sogten und dadurch die Keimdichte erhöhten.

Bestrahlungszeit in Sekunden	Abtötungsfaktor in % (Mittelwert)	Errechnete Bestrahlungsdosis J/m <sup>2</sup>
0	0	0
60	98,27	51,87
90	98,77	77,85
120	99,27	103,8
180	99,71	155,61

Das bedeutete wiederum auch, dass der Abtötungsfaktor durch eine Optimierung der LED-Einstellungen und einer gleichmäßigeren Verteilung der Keime noch besser wäre. Im Vergleich zur Kontroll-TP konnten wir eine deutliche Reduktion der Keime feststellen.

Wir konnten bestätigen, dass ab 120 Sekunden Bestrahlungszeit mit einer LED die Keimlast um 99,27 % reduziert wurde und somit eine Desinfektion der Stufe 2 log stattfand.

#### 4.4.1 Erkenntnisgewinn für die Weiterentwicklung

Nachdem die Funktion unserer LEDs durch die Analyse der vorherigen Bestrahlungstests bestätigt wurde, wollten wir genauere physikalische Daten der LEDs bekommen. Dazu wollten wir die genaue Wellenlänge der LEDs sowie ihren optischen Output herausfinden. Dieser Output sollte zudem unter verschiedenen Temperaturen der LED analysiert werden. In Zusammenarbeit mit Heraeus Noblelight konnten wir Versuche in einem kalibrierten Rahmen ausführen, welcher belastbare Ergebnisse lieferten. Mithilfe einer Ulbricht-Kugel konnten wir alle relevanten Parameter analysieren.

## 5 Temperatur-Regel-Messmodul (TRM)

Um eine präzise Vorstellung davon zu bekommen, wie sich die UVC-LEDs, genauer gesagt ihr Spektrum, bei Temperaturänderung verhalten, nutzen wir ein Peltierelement. Das Peltierelement kann rein technisch die darauf befestigte LED heizen (+70 °C) oder kühlen (-30 °C). So konnten wir simulieren, wie sich das Spektrum bei zunehmender Betriebstemperatur verändert. Um die LEDs nicht zu zerstören, variierten wir die Temperatur allerdings nur zwischen +10 °C und +65 °C . Zudem sind diese Daten wertvoll, da sie realistischen Temperaturschwankungen unter Realbedingungen widerspiegeln. Zur Messung der Ist-Temperatur wurde ein Thermistor zwischen Peltierelement und LED geklebt; der Sollwert der Temperatur wird über die Konsole eingegeben. Mithilfe des Proportional-Integral-Differential (PID) Reglers kann unter Einbeziehung des Soll- und Ist-Wertes die Soll-Temperatur schnellstmöglich erreicht werden.



Abbildung 8: LED-Aufbau an Dosimeter und Ulbricht-Kugel

Mithilfe einer Ulbricht-Kugel konnte das Spektrum unter der jeweils simulierten Situation ermittelt werden. Die UVC-LED wird an die Öffnung der Ulbricht-Kugel angebracht, sodass diese das gesamte von der UVC-LED emittierte Licht auf einen Sensor bündeln kann. Dieser Sensor ermöglicht die präzise elektronische Auswertung des Spektrums.

### 5.1 Materialien

1. TRM zum Kühlen und Heizen der UVC-LEDs, um während der Messung reale Einsatzbedingungen zu simulieren



2. Thermometer zur Kontrolle der Ausgabe des Peltierelements
3. UVC Dosimeter
4. Ulbricht-Kugel
5. Pen-Ray Hg-Röhre mit bekannter Wellenlänge zur Kalibrierung der Ulbricht-Kugel

## 5.2 Versuchsaufbau:

Das TRM mit der LED wird auf einem Stativ vor der Öffnung der Ulbricht-Kugel platziert und eingeschaltet. Die emittierte Strahlung wird von dem Detektor aufgefangen und an den Computer zur Auswertung weitergeleitet.

## 5.3 Vorbereitung

Die Ulbricht-Kugel wurde mit einer Pen-Ray Hg-Röhre mit bekannter Wellenlänge kalibriert, um Messfehler auszuschließen. Dann wurde eine UVC-LED auf dem TRM befestigt und an der Öffnung der Ulbricht-Kugel so ausgerichtet, dass die gesamte Strahlung in die Ulbricht-Kugel emittiert wird. Vermessen wurden LED Nr. 1 und LED Nr. 4, da diese die besten Werte haben und LED 4 auch im Prototyp verbaut sind.

## 5.4 Versuche LEDs

### 5.4.1 UVC LED Nr. 1

UVC LED Nr. 1 wurde ohne Einsatz des TRM mithilfe der Ulbricht-Kugel vermessen. Ziel war es, die vom Hersteller angegebene Wellenlänge zu überprüfen sowie Spektrum, Leistung und Gesamt-Lichtstrom zu ermitteln.

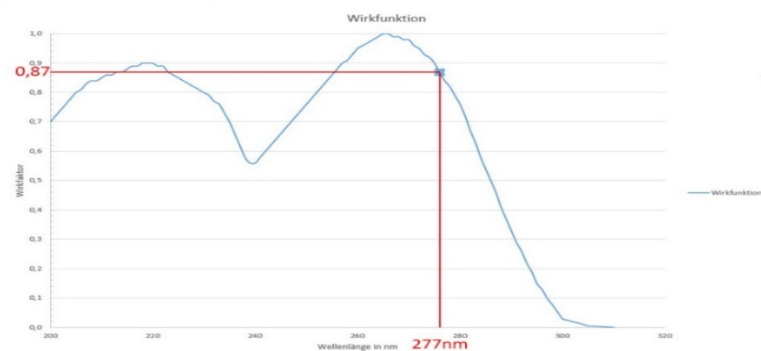


Abbildung 9: Wirkfunktion aus Überlagerung der Absorptionskurve von RNA und DNA. Bereitgestellt von Heraeus Noblelight

### 5.4.2 UVC LED Nr. 4

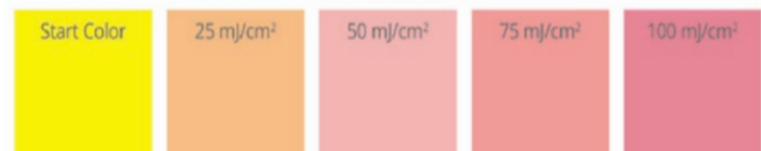
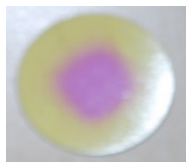


Abbildung 11: LED 4    Abbildung 12: LED 1

Abbildung 10: Referenztafel zur Auswertung der Dosimeter<sup>[4]</sup>

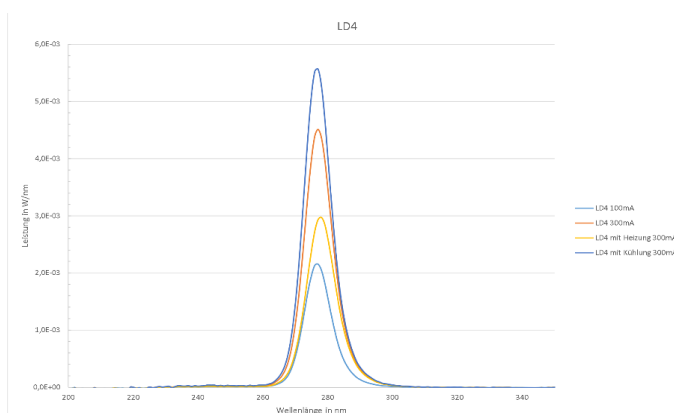


Abbildung 13: Graph der Leistungspeaks bei unterschiedlichen

UVC LED Nr. 4 wurde zunächst ohne Einsatz des TRM in der Ulbricht-Kugel vermessen. Festgestellt wurde dabei eine Wellenlänge von 277 nm bei LED 4.

Zur Desinfektion von Viren, Bakterien und Pilzen, welche Erbgut in sich tragen, beträgt die optimale Wellenlänge 265 nm. Damit ließe sich 100%ige Effektivität bei der Desinfektion erreichen.

Mithilfe der nebenstehenden Wirkfunktion lässt sich feststellen, dass bei einer Wellenlänge von 277 nm diese Effektivität auf 87 % sinkt. Diese Eigenschaft beruht darauf, dass das Erbgut je nach Wellenlänge

unterschiedlich stark UVC-Licht absorbiert. Diese Wirkfunktion gilt auch für die Experimente in 5.4.1, da dort eine Wellenlänge von 254 nm verwendet wurde. Bei 254 nm beträgt die Effektivität 84 %. Somit sind unsere LEDs hinsichtlich der Effektivität in etwa vergleichbar mit den verwendeten Lampen aus <sup>[27]</sup>

Außerdem wurde die Abstrahlcharakteristik mithilfe eines UVC-Dosimeters festgestellt (vgl. 15&16). Die festgestellte Abstrahlcharakteristik ist optimal. Zusätzlich wurde UVC LED Nr. 4 bei ca. 60 °C bis 65 °C vermessen. Erhitzt wurde sie mithilfe des TRM und die vordefinierte Temperatur mit dem Thermometer bestätigt. Ziel dessen war es zu ermitteln, wie sich Peak und Spektrum bei Temperaturschwankungen ändern. Abschließend wurde die LED auf 10 °C heruntergekühlt und vermessen. Basierend auf den Messungen konnten wir ermitteln, dass sich der Leistungspeak bei Heizung (2,931 mW/nm) im Vergleich zu Kühlung (5,569 mW/nm) fast halbiert hat. Wir konnten ebenfalls feststellen, dass sich die Peak-Wellenlänge vernachlässigbar wenig verschiebt (bei Heizung: 278 nm; bei Kühlung keine Veränderung).

## 6 Bau des zweiten Prototyps

Da der Prototyp unseres Luftreinigungsgerätes einige Optimierungspotenziale offenbarte, entschlossen wir uns, durch ein neues Produktdesign die Funktionalität zu erhöhen. Da der Aufbau kein Potenzial aufwies, entschlossen wir uns, einen komplett neuen Prototyp anzufertigen. Von außen nach innen betrachtet fällt zuerst das weiße Hochglanzgehäuse mit Logo auf. Dieses röhrenförmige Design ermöglicht die einfache Wartung durch Herausziehen des technischen Kerns. Zudem ermöglicht die innen liegende Verspiegelung den Lichtverlust des Gerätes zu minimieren. Des Weiteren schützt das Gehäuse die sensible Elektronik und den Anwender vor den UVC-

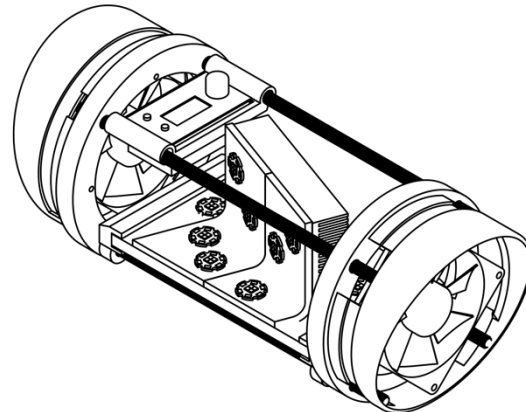


Abbildung 14 3D Modell Animation: <https://p3d.in/65tSm/spin>

Lichtquellen. Im Inneren befinden sich das 3D-gedruckte Front- und Endteil.

Zwischen diesen Spezialteilen befindet sich der modular gehaltene LED Core. Dieser besteht aus einer 10 mm dicken Aluminiumplatte, welche mit zwei gewinkelten Montageteilen den Kühlkörper trägt. Durch den gewinkelten Aufbau können wir die Erkenntnisse des ersten Prototyps aufgreifen und für Luftverwirbelungen sorgen. Laminare Luftströme können aufgebrochen werden und verhindern die gegenseitige Beschattung von Luftkeimen. Im oberen Bereich ist zudem unser Steuernetzteil für die sehr empfindlichen LEDs sowie ein Kurzschlusschalter montiert. Dieser Schalter sorgt zusammen mit der kompletten Erdung unseres Gerätes dafür, dass im lagernden Zustand keine Kriechströme unsere LED beschädigen können. Die Elektronik wird im folgenden Teil genauer beleuchtet.

### 6.1 Elektronik des zweiten Prototyps

Das Luftreinigungssystem wird über ein 12 V Power Delivery Modul betrieben. Diese bereitgestellten 12 V versorgen die Lüfter und den Spannungsregler für die UVC-LEDs parallel. Mit einem Step Down Modul wird die Spannung von 12 V auf 5 V herunterreguliert. Dies ist nötig, da die übrigen elektronischen Komponenten 5 V Betriebsspannung benötigen.

Im Luftreinigungsgerät ist als zentrale Recheneinheit eine NodeMCU mit einem ESP8266 (Wi-Fi Development Board) verbaut. Der Vorteil der NodeMCU ist die hohe Rechenleistung für solch einen Chip, die native WLAN-Unterstützung und der geringe Stromverbrauch. An der NodeMCU sind die Sensoren angeschlossen. Ein Thermistor ist in einem eingebohrten Kanal im Kühlkörper mit Wärmeleitkleber hinter einer LED eingeklebt, um so die Betriebstemperatur zu überwachen und Überhitzung zu erkennen. Relevant ist auch die Luftfeuchtigkeit für das Luftdesinfektionsgerät, da bei einer Luftfeuchtigkeit unter 40 % die Ansteckungsgefahr durch Tröpfcheninfektionen wie zum Beispiel SARS-CoV-2 steigt. <sup>[15][19]</sup>

Um die UVC-LEDs ein- und auszuschalten, benutzen wir ein 5 V Relay mit Optokoppler. Hier nutzen wir ein "High Level Trigger", was bedeutet, dass die UVC-LEDs nur eingeschaltet sind, wenn die NodeMCU ein Signal an das Relais sendet. Dies ist wichtig, da bei einem Absturz der NodeMCU die UVC-LEDs so nicht leuchten können. Als weitere Sicherheitsmaßnahme benutzen wir einen digitalen Hall-Effekt-Sensor (HES), welcher über den Digitalausgang über einen bistabilen Stromkreis in der Nähe eines starken Magnetfelds die Spannung auf einen Schwellenwert hebt. Der Hall-Effekt-Sensor ist integriert in der Schaltungsleitung für das Relais.

Dadurch ist bei geschlossenem Luftreinigungsgerät der Hall-Effekt-Sensor offen, womit die UVC-LEDs geschaltet werden können. Bei einem offenen Gerät ist dies nicht möglich.

Als letztes elektronisches Bauteil ist ein WS2812B-Strip verbaut. Dies ist ein LED-Strip, welcher gesondert ansteuerbar ist. Dieser leuchtet indirekt gegen den sichtbaren Teil des Gehäuses des Desinfektionsgerätes und neben der Optik dient er auch als Statusanzeige. Ein pulsierendes Gelb signalisiert zum Beispiel, dass die NodeMCU nicht mit dem Server verbunden ist, ein dunkles Rot, dass das Gerät nicht geschlossen ist und Orange, dass die Luftqualität im Raum einen kritischen Wert unterschritten hat.

## 6.2 Validierung der Funktionalität des zweiten Prototyps

Nachdem wir die Funktionalität unserer individuellen LEDs ausreichend durch unsere Agar Tests bestätigt hatten, haben wir uns vorgenommen, die Effizienz unseres selbst gebauten Luftreinigers zu messen. Hierzu mussten wir uns einen Aufbau überlegen, welcher gezielt Luftkeime emittiert und, nachdem sie unser Gerät passiert haben, detektiert.

Die schwerste Aufgabe war das Finden einer geeigneten Luftkeimquelle. Hierbei griffen wir auf einen handelsüblichen Luftbefeuchter auf Ultraschall-Basis zurück. Diese Technik saugt durch die Kapillarwirkung die Flüssigkeit auf ein Ultraschall Piezo Element, welches die Flüssigkeit in winzige Tröpfchen zerstäubt. Durch diesen mechanischen Aufbau schneidet der Ultraschallbefeuchter in Verbrauchertests schlechter ab als ein Verdampfer-Luftbefeuchter. Diesen Nachteil der hohen Keimexpression durch die Ultraschalltechnik machen wir uns als Vorteil zunutze. In den Vorratstank wird eine definierte E.-coli-Lösung eingefüllt, welche über ein definiertes Zeitintervall ausgestoßen wird.

Nachdem die Keime in die Luft ausgestoßen wurden, sollten diese über ein ebenso definiertes Zeitintervall durch unser Luftdesinfektionsgerät laufen. Anschließend wird das gesamte Luftvolumen der PCR Station durch einen Luftkeimsammler auf eine CaSo Agarplatte gesaugt, um später eine quantitative Auswertung zu ermöglichen. Der CaSo Agar hat den entscheidenden Vorteil, dass er ein üppiges Wachstum auch für anspruchsvollere Organismen gewährleistet. Dieser sehr nährstoffreiche Agar ist dadurch sehr sensibel für Verunreinigungen und lässt bei sachgemäßer Verwendung ein eindeutiges Ergebnis zu. Aus Gründen der Sicherheit und Auswertbarkeit haben wir dieses Experiment innerhalb unserer PCR Station (Herolab), welche über ein verschließbares Acryl Gehäuse mit 111 L Volumen verfügt, durchgeführt. Hierin kann weder ein Keim heraus, noch hereinkommen. Dadurch haben wir nur die Keime, welche wir exprimiert haben und keine verfälschenden Einflüsse.

Zur Vorbereitung muss die Bakterienlösung angesetzt und der Vernebler befüllt werden. Durch eine Vorlaufzeit des Verneblers kann eine zuverlässige Expiration gewährleistet werden. Nun kann die PCR Station desinfiziert und der Versuch aufgebaut werden.

### 6.2.1 Ablauf des Experimentes

Zu Beginn wird der Vernebler und Luftkeimsammler mit CaSo Agar (N-Startverzögerung) und das Luftdesinfektionsgerät aktiviert. Fortan findet das Experiment in der geschlossenen PCR Station statt, um eine Personengefahr oder die Verunreinigung der Proben auszuschließen. Nachdem der Vernebler abgeschaltet wurde und der Luftkeimsammler sein Programm beendet hat, kann der Aufbau wieder desinfiziert werden. Nachdem der Versuch mit verschiedenen Parametern durchgeführt wurde, kann nach 24 h die Auszählung beginnen und die Abtötungsrate berechnet werden.

### 6.2.2 Ergebnis:

Parameter	
Keimexpression (Luftvernebler)	60 Sekunden
E.-coli-Lösung	1 ml Stammkultur + 300 ml Wasser
Anschaltverzögerung (Luftkeimsammler)	1, 2, 3 min
Angesaugtes Luftvolumen	111 L
Spannung Lüfter	12 V
Spannung LEDs	12 V
Strom LEDs	3,116 A
Leistung	37,39 W
Effizienz LED	Datenblatt: 1,6 % Real: 0,132 %
Lichtfluss in W	Datenblatt: 0,598 W Real: 0,0495 W
Inkubationszeit	24 h
Aktivierung des revolutionAIR	1, 2, 3 min
Verwendeter Agar	Casein-Soja-Pepton-Agar

Dekontamination Herolab	1 min
Wasserverbrauch Vernebler dauerhaft	1,25 ml/min
Wasserverbrauch Vernebler pulsierend	0,5 ml/min

Die ersten zwei Durchgänge des Experimentes dienten zur Findung folgender Parameter für den Versuchsaufbau: Anhand dieser Parameter konnten wir das finale Experiment durchführen. Um unsere Daten zu validieren, haben wir eine K0-Keime (K0-KK) Kontrolle eingebaut, welche ohne UVC Licht und exprimierte Keime untersucht wurde. Dadurch können wir sichergehen, dass die PCR Station komplett frei von Fremdkeimen ist. In einer weiteren K0 Probe wurden Keime exprimiert, jedoch das UVC-Licht nicht aktiviert. Diese diente als Referenzwert, wie viele Keime durch den Vernebler in die Luft gelangten. Im Folgenden testeten wir den Unterschied, wenn der Luftkeimsammler erst nach 1,2 oder 3 min anfang zu sammeln. Dadurch könnten wir den exakten Timer im Luftkeimsammler verwenden, welcher gleichzeitig die Bestrahlungszeit des Luftreinigers definierte. Hierbei ergaben sich folgende Werte:

Delay Einstellung	Veränderung der Keimanzahl im Vergleich zur K0	Strahlendosis
60 s	+86,4 %	44,1 J/m <sup>2</sup>
120 s	-16,2 %	88,3 J/m <sup>2</sup>
180 s	-66,1 %	133,23 J/m <sup>3</sup>

#### Diskussion:

Zu Beginn fällt der Zuwachs bei einem Delay von 60 s auf. Dies liegt daran, dass der Vernebler 60 s lang Keime in die Luft bringt. Diese werden anschließend direkt durch den Luftkeimsammler eingesaugt, ohne sich vorher im Raum zu verteilen. Dadurch wird die konzentrierte Keimwolke direkt auf die TP gesogen und es gibt kein 3-minütiges Delay, wie bei der K0. Aufgrund dieser Gegebenheiten ist die Keimanzahl höher als bei der K0-Referenzplatte.

### 6.3 Messung des Luftstroms und Berechnung der Strahlendosis

Anhand dieser Daten können wir berechnen, wie oft die Luft das Gerät durchlaufen muss, bis mehr als 50 % der Keime abgetötet wurden. Hierzu verwenden wir die Strömungsgeschwindigkeit der Luft, gemessen an unserem Gerät (1,7 m/s). Diese 1,7 m/s multiplizieren wir mit dem Querschnitt unseres Geräts (0,018 m<sup>2</sup>), um den Luftdurchsatz (30,375 l/s) zu berechnen.

Multiplizieren wir den Luftdurchsatz mit der Dauer, die das Gerät eingeschaltet war (180 s), so bekommen wir heraus, dass unser Gerät 5.467,5 Liter Luft dekontaminiert hat. Somit hat das Gerät rechnerisch die Luft im Herolab 49 Mal umgewälzt. Anhand der Daten des Agar-Bestrahlungstests konnten wir ableiten, dass die Keimabtötung linear proportional zur Bestrahlungszeit ist. Aufgrund dieser Erkenntnis können wir errechnen, dass pro Luftdurchlauf im Gerät 1,35 % der Keime reduziert werden.

Unter Realbedingungen eines 50 m<sup>3</sup> großen Raumes bräuchte unser Gerät für ca. 66,2 %ige Dekontamination der Raumluft etwa 58 Minuten. Da im Optimalfall die Luft jedoch dreimal pro Stunde desinfiziert werden sollte, bräuchten wir ein 3x leistungsfähigeres Gerät.

Mit der Verweilzeit der Luft im Gerät ( $\frac{0,27 \text{ m}}{1,7 \text{ m/s}} = 0,16 \text{ s}$ ), dem bestrahlten zylindrischen Halbraum (0,067 m<sup>2</sup>) und der Leistung der LEDs (0,0495 W) kann in unserem Fall eine Strahlendosis von 133,23 J/m<sup>2</sup> errechnet werden, um eine Reduktion der Keime von -66,1 % zu erlangen. Nicht nur die LED Leistung, sondern auch der Luftdurchsatz müssen skaliert werden, um ein praktisch einsetzbares Gerät zu erhalten.

### 6.4 Temperaturanalyse des Gerätes

Die Effektivität unserer Kühlkörper sowie die Wärme des Gerätes konnten wir nur mithilfe einer Wärmebildkamera untersuchen.

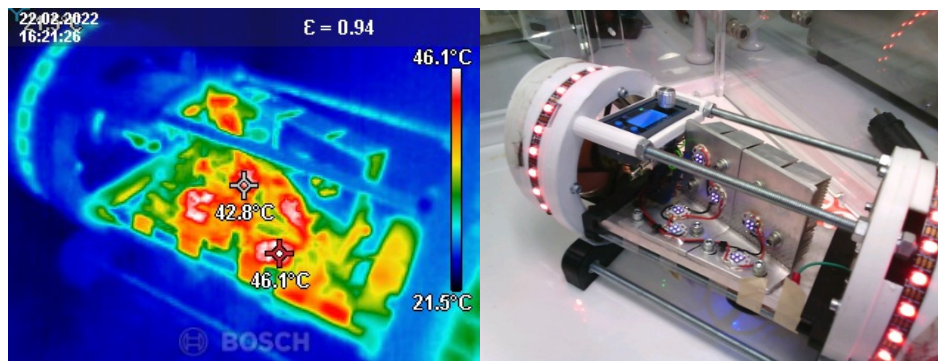


Abbildung 15 Wärmebildaufnahme des Prototypens

Auf den Bildern ist zu erkennen, dass die Temperatur der LEDs selbst unter Vollast unter 50 °C bleibt. Obwohl eine kühlere LED effizienter arbeitet, sind diese Temperaturen noch vertretbar. Sehr gut zu erkennen ist jedoch auch, dass der Wärmetransport von der Bodenplatte nicht so gut ist wie in dem stehenden Teil. Dazu kommt, dass unser LED-Netzteil stellenweise bis zu 80 °C erreicht hat, was wir im nächsten Projekt unbedingt ändern müssen. Durch ein besseres Kühlungskonzept und ein anderes Netzteil könnte die Effektivität des Gerätes um einiges gesteigert werden.

## 7 Informatik

### 7.1 Ziel des Geräts und der Sensorik

Das Luftreinigungssystem soll effizient und langlebig sein, weshalb die Zuständigkeit der Sensorik darin liegt, einen möglichst geringen Stromverbrauch und eine möglichst geringe Materialabnutzung zu erzielen. Um einen niedrigen Stromverbrauch zu erreichen, muss das Luftreinigungsgerät optimal vorausschauend auf die Umwelt reagieren und nur mit der minimal benötigten Leistung arbeiten. Des Weiteren ist es auch wichtig, dass keine hohen Leistungspeaks entstehen, wodurch die Temperatur in der LED zu stark ansteigen könnte, wodurch sich wiederum der Wirkungsgrad verringert und die Lebensdauer abnimmt. Die Temperatur bei den LEDs ist wichtig, da bei einer Zunahme von nur 10 °C die Lebensdauer der LEDs um 50 % reduziert wird (Herleitung <sup>[25]</sup>). Bei der Auswahl der Komponenten wurden lediglich stromsparende, passive Bauteile ausgewählt.

### 7.2 Datenschutzproblematik

Da Bilder und Videos im öffentlichen Raum aufzuzeichnen, bei vielen Datenschützern auf Ablehnung stößt, konnten wir keine Personenerkennung auf Kamerabasis verwenden. Trotz dessen, dass unsere Bilderkennung die Daten lokal innerhalb des Gerätes zu nicht personenbezogenen Metadaten umrechnet, ist das System in vielen Einsatzzwecken so nicht einsetzbar. Nur durch eine Zertifizierung, dass wirklich keine Datenschutzbedenken bestehen, lässt sich so ein Gerät im öffentlichen Raum einsetzen. Da wir dieses Problem auch lösen wollen, haben wir im letzten Jahr ein Gebrauchsmuster zu dieser Thematik angemeldet. Um jetzt schon auf Personendaten zurückgreifen zu können, verwendeten wir eine alternative Auswertungsstrategie, welche einige Vorteile gegenüber der Kameralösung bietet. Dadurch können wir unser Gerät jetzt schon intelligent steuern.

### 7.3 Alternative Auswertungsstrategie

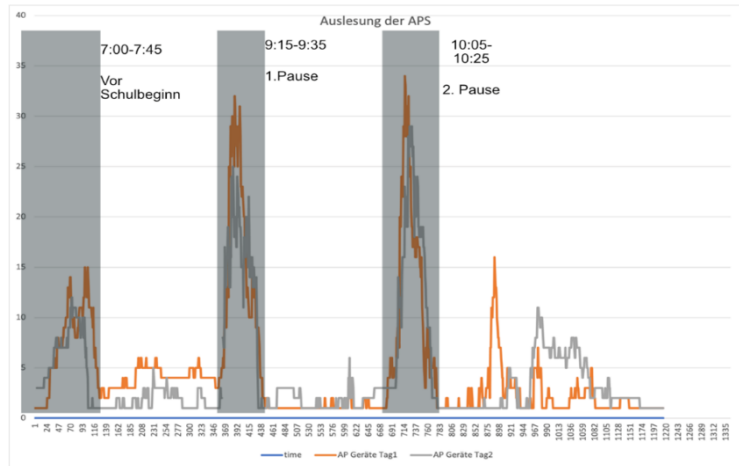
Da mittlerweile fast jeder ein Smartphone mit sich trägt, können wir über eine schuleigene API auslesen, wie viele drahtlose Endgeräte an einem Access Point eingeloggt sind. Um diese API auszulesen, haben wir ein kleines Programm geschrieben, welches jede Minute die Anzahl der eingeloggten Clients in den Access Points abfragt und diese mit dem passenden Zeitstempel loggt. Sobald ein flächendeckendes Netzwerk vorhanden ist, können ohne den Kauf von neuer Technik wertvolle Nutzungsdaten gewonnen werden. Die Voraussetzung ist dabei, dass jede Person ein Gerät mit sich trägt, welches in das Netzwerk eingeloggt ist. Nur so sind wir in der Lage, dieses verbundene Endgerät als Person zu interpretieren. Ungenauigkeiten könnten auftreten, wenn eine Person mit mehreren Geräten eingeloggt ist. Das könnte beispielsweise passieren, sobald jemand Laptop, Smartphone und Tablet nutzt. Unter Einbeziehung von weiteren Daten, wie angemeldete Accounts der Geräte, können auch mehrere Geräte einer Person zugeordnet werden und so auch dieses Problem gelöst werden. Die einzige

Schwäche zeigt sich, sobald jemand kein Netzwerkgerät bei sich trägt, da dadurch die Person nicht erkannt wird. In unserer heutigen Zeit ist die Anzahl solcher Personen so marginal, dass sie keinen messbaren Einfluss hätten und daher die Daten nicht erheblich verändern würden.

## 7.4 Durchführung und Auswertung

Da dieses Projekt von der Schule genehmigt wurde, haben wir mehrere Tage lang die Aktivität in der Schulcafeteria über die API der Access Points geloggt.

In dem obigen Graph ist die Nutzungsdauer der Access Points in der Aula verteilt über einen Schultag zu erkennen. Der orange Graph zeigt die Nutzung für den ersten Tag der Auswertung, der graue Graph die des zweiten Tages. Die Zeiteinheit 1 bis 116 entspricht etwa der Uhrzeit 7:00 bis 7:45. Um 7:45 Uhr fängt die erste Stunde an, weshalb alle Schüler, die früher gekommen sind und sich in die Aula gesetzt haben, in den Unterricht gehen.



Bis auf ein paar einzelne Schüler, welche vielleicht Entfall haben, und die Mitarbeiter der Mensa sind nun nicht mehr viele dort. Zwischen Zeiteinheit 346 (9:13 Uhr) bis 438 (9:37 Uhr), was ziemlich genau die Dauer der ersten Pause darstellt, sieht man, wie viele Schüler in die Schulcafeteria gehen, um sich etwas zu essen zu holen oder sich an die Tische zu setzen. Was man hier beachten muss, ist, dass die Logs zur Corona-Zeit stattfanden, in der die Sitzplätze um über  $\frac{3}{4}$  reduziert sind. Wäre normaler Schulbetrieb, wäre diese Kurve deutlich volatiler. Peaks sind, wenn möglich, zu vermeiden. Wie man jedoch an der Auswertung der Access Points sehen kann, sind dort enorme Peaks. Daher müssen wir schon vor der Entstehung dieser Peaks wissen, dass diese entstehen, um so die Leistung des Luftreinigungsgeräts anzupassen.

## 7.5 Serverkommunikation

Um eine smarte und bequeme Steuerung des Prototyps zu gewährleisten, nutzen wir das in der IoT-Welt etablierte Protokoll MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT ist in unserem Fall sinnvoll, da es nicht nur sehr schlank ist, sondern auch eine einfache Implementierung von Verschlüsselung bietet und auch mit instabilen und bandbreitearmen Netzwerken klarkommt. Auch die unterstützte bidirektionale Verbindung ist sinnvoll, um sowohl Steuerbefehle an den Prototyp zu senden als auch Sensordaten empfangen zu können.

## 7.6 APP Entwicklung

Um dem User eine bequeme Steuerung des Prototyps zu ermöglichen, haben wir eine mobile App entwickelt. Mithilfe des Flutter Frameworks (in Dart) war es uns möglich, die App gleichzeitig für Android, IOS und Web zu entwickeln. Auch konnten wir dank Flutter sehr viel Zeit und Aufwand sparen, was Layout und Responsivität betrifft. Mit der App lässt sich das Gerät an- und ausschalten, die Rotationsgeschwindigkeit der Lüfter variieren und Farbeffekte für die LED-Status-Leisten festzulegen.

## 8 Expiratorischer Filter:

Unser aktueller Ansatz der Weiterentwicklung beschäftigt sich mit einem konkreten Einsatzgebiet.



Abbildung 16:  
Screenshot der App

Auf Intensivstationen im Krankenhaus wird derzeit viel künstlich beatmet, wodurch neue Probleme auftauchen. Über ein Beatmungsgerät wird frische, gefilterte Luft in die Lunge des Patienten gepumpt und verbrauchte Luft wieder herausbefördert. Durch den Kontakt zu Krankenhauspersonal erfuhren wir, dass sämtliches Beatmungsmaterial wie Schläuche, Masken und Luftfilter Einwegmaterial sind. Um an diesem Problem anzusetzen, fokussierten wir uns auf Mehrweg-Filtertechniken. Die meisten verwendeten Filter sind Inspirationsfilter (Einatmung) und selten Expirationsfilter (Ausatmung). Diese Expiration geschieht durch einen



Abbildung 18: Verhinderung der Schattenbildung durch beidseitige Bestrahlung

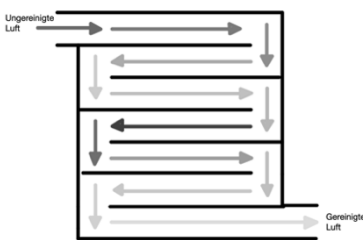


Abbildung 17: Konzeptzeichnung Blenden-Filter System



Schlauch und kann dadurch besser desinfiziert werden als die Aerosole, welche beim Husten im Alltag entstehen. Die kontaminierten Aerosole sind nämlich nur in einem kleinem Volumen komprimiert. Der Aufbau ersetzt den bisherig verbauten HEPA Filter. Da in diesem Fall der Luftdurchsatz nicht durch Lüfter gesteuert werden kann, griffen wir auf die verspiegelten Lamellen des ersten Prototypens zurück. An beiden Seiten wurden insgesamt 16 blaue LEDs montiert, welche als Platzhalter für echte UVC LEDs vorgesehen sind. Durch die schnelle Entwicklung der UVC LEDs werden die Spezifikationen immer besser. Im Januar 2022 hat die Firma Osram neue LEDs mit einer Leistung von 42mW pro Stück vorgestellt, welche somit 7,5x Stärker sind als die von uns im 2. Prototypen verbauten. Mit dem derzeitigen Aufbau und den potentiellen neuen LEDs könnten wir eine Bestrahlungsintensität eines Ausathmens von 67,2 J/m<sup>2</sup> erreichen.

Abbildung 19 Erster Prototyp des Dräger Expressionsfilters

## 9 Zusammenfassung/ Fazit

„Entwicklung eines effizienten Luftreinigungssystems auf Basis von UV-LEDs“ ist das Thema dieser Projektarbeit. Begonnen hat es mit der Vision, eine Marktneuheit zu schaffen. Über die Entwicklungszeit hinweg sind immer mehr Geräte mit ähnlichen Spezifikationen auf den Markt gekommen. Deshalb haben wir unser Ziel dahingehend geändert, ein effizienteres, besseres und intelligenteres System zu bauen als die bestehenden. Den Anfang machte unser erster Prototyp, welcher uns Aufschlüsse über den Airflow innerhalb des Gerätes gab. Nachdem eine LED ausgewählt war, untersuchten wir diese mikrobiologisch. Diese Versuche brachten zwar kein belastbares Ergebnis, die gelernten Parameter halfen uns jedoch bei den nachfolgenden Experimenten enorm. Mit der Erkenntnis, dass das Laborbakterium *E. coli* in etwa ähnliche UVC-Resistenz wie das SARS-CoV-2 Virus aufweist, konnten wir die Leistung unseres Gerätes theoretisch mit den Realbedingungen vergleichen. Da alle unsere LEDs aus chinesischer Herkunft stammen, konnten wir uns nicht auf die unvollständigen mitgelieferten Datenblätter verlassen. Deshalb untersuchten wir im Labor von Heraeus Noblelight unsere LEDs auf ihren optischen Output, ihre Wellenlänge und wie sie sich unter Temperaturänderungen verhalten. Die bisher gesammelten Erkenntnisse flossen in den Bau des zweiten Prototyps ein. Um nicht nur die Funktion der LEDs bestätigen zu können, sondern auch die desinfizierende Wirkung auf Luftkeime, entwickelten wir einen passenden Versuchsaufbau. Unter Berücksichtigung des Luftdurchsatzes sowie der Ergebnisse des Experiments konnten wir die Bestrahlungsdosis des Systems errechnen und die Funktionalität unseres Gerätes beweisen. Mithilfe einer Wärmebildkamera konnten wertvolle Erkenntnisse zu unserem physischen Aufbau unseres Gerätes gesammelt werden.

Zusammen mit einer intelligenten Möglichkeit, ohne Datenschutzproblem die Personenzahlen in Räumen und Gebäuden zu erfassen, konnten wir eine passende App entwickeln. Diese verbindet sich drahtlos mit unserem Luftdesinfektionsgerät und kann so alle wichtigen Parameter komfortabel steuern.

## 10 Ausblick

Ein großes Ziel des Projekts war es, ein marktreifes Gerät zu entwickeln, welches in vielen Situationen Einsatz finden kann. Dieser Wunsch bleibt auch nach wie vor auf unserer Agenda, auch wenn es bis dahin noch ein anstrengender Weg wird. Da wir davon ausgehen, dass wir noch nicht die optimale LED gefunden haben, ist der Plan, LEDs neuester Entwicklung zu kaufen und größere, noch aussagekräftigere Testreihen durchzuführen. Da evtl. die Leuchtdiode nicht der richtige Weg in Zukunft sein wird, Luft zu desinfizieren, kam die Idee auf, Laserdioden zu verwenden. Diese könnten eine „Wand“ aus Licht erzeugen, welche jedes Luftmolekül und jeder Luftkeim passieren muss. Zur Durchführung des Projektes mit Laserdioden kam es bisher nicht, da einzelne Dioden mehrere Hundert Euro kosten. Bis diese günstiger werden, ist nur eine Frage der Zeit. Während der Testreihen ist vermehrt der Wunsch aufgekommen, selbst zu erforschen, was nun wirklich im Inneren der Bakterien passiert. Hierfür kam die Idee, ein ELISA Kit zur Aufspürung von Thymin Dimeren zu verwenden. Dieses Analysetool kann die Anzahl der Thymin Dimere in der Probe anhand von Farbveränderungen aufzeigen und so die Wirkweise von UVC-Licht bestätigen. Durch den geringen Bedarf solcher Testkits war der Preis entsprechend hoch, was unser Budget weit gesprengt hätte.<sup>[9]</sup> Zudem wäre eine Analyse mit einem Elektronenmikroskop sehr spannend, um zu sehen, ob es eventuell sichtbare Veränderungen an den Bakterien gibt. Auch interessant wäre eine Testreihe mit echten COVID-19-Erregern in einem entsprechenden Labor. Durch solch ein Experiment könnten wir sichergehen, dass die Literatur stimmt und E. coli wirklich mit COVID-19 vergleichbar ist.

In Zukunft sehen wir auch einen Verwendungszweck der UVC-LEDs in anderen Anwendungen außerhalb unseres Systems. Durch intensive Nutzung von lernenden Algorithmen (KI), können aus mehreren dezentralen Sensoreinheiten Daten gesammelt und diese in ein Pattern Recognition Algorithmus eingespeist werden. Die gesammelten und aufbereiteten Daten können wir in einem ansprechenden und benutzerfreundlichen Frontend anzeigen, welches den vollen Funktionsumfang unserer Entwicklung nutzbar macht. Zusätzlich würden wir gerne einen Bakterien-Sensor entwickeln, welcher im Zusammenspiel mit einer Temperaturüberwachung der einzelnen LEDs für die größtmögliche Sicherheit und Langlebigkeit des Gerätes sorgt.

Durch solch eine Integration unserer Technik in ein bestehendes Spezialprodukt wie dem Expressionsfilter kann die LED ihre Vorteile komplett ausspielen. Da der erste Prototyp rechnerisch eine zu geringe Bestrahlungsintensität erreicht, planen wir einen zweiten Aufbau. Dieser soll eine weitaus höhere Strahlendosis, mehr als  $200 \text{ J/m}^2$ , bei gleichbleibendem Formfaktor erzielen. Eine weitere Idee ist es das Volumen der Bestrahlungseinheit so zu erhöhen, dass eine komplette Exhalation bis zur erneuten Exhalation im Inneren verbleibt. Dadurch verlängert sich die Verweildauer im Filtermodul enorm und es müssen weniger LEDs verbaut werden. Durch solch eine Mehrweglösung können Kosten gespart, Müll verhindert und auch der Schutz der Personen im Krankenhaus verbessert werden.



— Bundesrepublik Deutschland —

# Urkunde

über die Eintragung des  
Gebrauchsmusters Nr. 20 2021 001 194

**Bezeichnung:**

Technisches System zur anonymisierten Erkennung und Zählung von  
Personen, um Lüftungssysteme zu optimieren

**IPC:**

F24F 11/00

**Inhaber/Inhaberin:**

Filip, Jaro Antonin Josef, 63477 Maintal, DE  
Hein, Dominik, 63773 Goldbach, DE  
Pfannkuch, Maximilian Julius, 63589 Linsengericht, DE

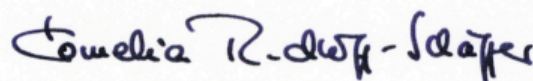
**Tag der Anmeldung:**

30.03.2021

**Tag der Eintragung:**

10.11.2021

Die Präsidentin des Deutschen Patent- und Markenamts



Cornelia Rudloff-Schäffer

München, 10.11.2021



Die Voraussetzungen der Schutzfähigkeit werden bei der Eintragung eines Gebrauchsmusters nicht geprüft.  
Den aktuellen Rechtsstand und Schutzzumfang entnehmen Sie bitte dem DPMAregister unter [www.dpma.de](http://www.dpma.de).

## 11 Quellen- und Literaturverzeichnis

### 11.1 Informationsquellen:

- [1] [A.Born, Biologie Oberstufe - Hessen und Nordrhein-Westfalen: Qualifikationsphase – Schülerbuch, 2010, Seite 56]
- [2] [A.Born, Biologie Oberstufe - Hessen und Nordrhein-Westfalen: Qualifikationsphase – Schülerbuch, 2010, Seite 133]
- [3] [A.Renzel, (2016), Desinfektion mit UVC, <https://docplayer.org/amp/7438939-Desinfektion-mit-uv-c.html>]
- [4] [ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, <https://www.acgih.org/publications/>]
- [5] [Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, (2013) Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit Biologischen Arbeitsstoffen, [https://www.gesetze-im-internet.de/biostoffv\\_2013/\\_3.html](https://www.gesetze-im-internet.de/biostoffv_2013/_3.html)]
- [6] [C.Nockenmann, UV-Lampen in der Praxis, <https://www.mineralium.de/mineralien-blog/uv-lampen-in-der-praxis>]
- [7] [Europäische Kommission, (2017), UVC-Lampen: Können diese keimtötenden Geräte auch für den Menschen schädlich sein?, [https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific\\_committees/scheer/docs/citizens\\_uvc\\_de.pdf](https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific_committees/scheer/docs/citizens_uvc_de.pdf)]
- [8] [H. Drexler, Umweltrelevante Einwirkungspfade, ecomed Medizin, [https://mediendb.ecomed-storck.de/ecomedMedizin/texte/leseprobe/9783609105628\\_leseprobe\\_09.pdf](https://mediendb.ecomed-storck.de/ecomedMedizin/texte/leseprobe/9783609105628_leseprobe_09.pdf)] abgerufen: 3.12.2020
- [9] [Hölzel Diagnostika, (2018), Hoch sensitive ELISA für UV-induzierte DNA-Schäden, <https://blog.hoelzel-biotech.com/2018/04/24/hs-elisa-fuer-uv-induzierte-dna-schaeden/>]
- [10] [K. Brieden, (2005), Tödlicher Sonnenbrand für Keime, [https://www.heraeus.com/media/media/hng/doc\\_hng/industries\\_and\\_applications\\_1/uv\\_technology\\_1/pdfs\\_1/Artikel\\_Packstoffentkeimung.pdf](https://www.heraeus.com/media/media/hng/doc_hng/industries_and_applications_1/uv_technology_1/pdfs_1/Artikel_Packstoffentkeimung.pdf)] abgerufen: 10.12.2020
- [11] [L.P.Petersson, (2017), Dekontamination von Oberflächen durch UV-Licht, [https://mhh-publikationsserver.gbv.de/servlets/MCRFileNodeServlet/mhh\\_derivate\\_00000835/diss-petersson\\_a.pdf](https://mhh-publikationsserver.gbv.de/servlets/MCRFileNodeServlet/mhh_derivate_00000835/diss-petersson_a.pdf)] abgerufen: 5.8.2020
- [12] [LUMITRONICS, UVC LED Module 275 nm, (2020), <https://lumstatic.com/un/g1/XcOpLtDmlKDdku3QNNQ.pdf>] abgerufen 15.1.2021
- [13] [M. Waßmann, (2007), Untersuchungen zur molekularen Anpassungsfähigkeit von Bacillus subtilis an eine erhöhte biologisch wirksame UV-Bestrahlung, <https://elib.dlr.de/51695/>] abgerufen: 10.12.2020
- [14] [Matthias Müller (2011), Strahlungsquellen der Zukunft– AlGaN UV-LEDs, FH Münster, [https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/AlGaN\\_UV-LEDs\\_MatthiasMueller\\_.pdf](https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/AlGaN_UV-LEDs_MatthiasMueller_.pdf)] abgerufen: 3.12.2020
- [15] [Mouser Electronics, BME680, <https://www.mouser.de/ProductDetail/Bosch-Sensortec/BME680/?qs=v271MhAjFHjo0yA%2FC4OnDQ%3D%3D>] abgerufen: 15.1.2021
- [16] [N. Hüber, Advanced UV for Life, UV-LEDs, <https://www.advanced-uv.de/uv-wissensbasis/uv-leds-und-hg-strahler-im-vergleich>]
- [17] [Neumüller, UV-LEDs, -Lampen & -Röhren im Vergleich, <https://www.leds-uv.de/unterschied-uv-led-lampe-roehre/>]
- [18] [P. Immerz, (2018), Stand der Technik und Trends bei UV-Leuchtdioden – ICULTA-2018, <https://www.adlershof.de/news/stand-der-technik-und-trends-bei-uv-leuchtdioden-iculta-2018/>]
- [19] [Robert Koch Institut, COVID-19 (Coronavirus SARS-CoV-2), [https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges\\_Coronavirus/nCoV.html](https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/nCoV.html)] abgerufen 14.1.2021
- [20] [S. Luber, Was ist Data Mining?, (2016), <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-data-mining-a-593421/>] abgerufen: 15.1.2021
- [21] [T. Arnhold, (2020), Coronavirus SARS-CoV-2 breitet sich bei niedriger Luftfeuchtigkeit in Innenräumen stärker aus, <https://idw-online.de/de/news752794>]

- [22] [T. Katz, WIE STARK IST DAS UV-LICHT SCHÄDLICH FÜR DIE AUGEN?, CareVision, <https://www.care-vision.de/blog/wie-gefaehrlich-ist-das-uv-licht-fuer-die-augen/>] abgerufen: 3.12.2020
- [23] [Thermo Fischer Scientific, Thermo Scientific™ GENESYS™ 140/150 VIS- und UV/VIS-Spektrofotometer, <https://www.fishersci.de/shop/products/genesys-140-150-vis-uv-vis-spectrophotometers/15830002>] abgerufen 14.01.2022
- [24] [UV-Klaerer, Die Erfindung der Quecksilberdampflampe, <https://uv-klaerer.de/grundlagen/uv-klarere-etwas-geschichte/die-entdeckung-der-quecksilberdampflampe/#:~:text=Die%20Entdeckung%20der%20Quecksilberdampflampe%20leistete,unter%20der%20Bezeichnung%20Aronssche%20R%C3%B6hre.&text=Jahrhunderts%2C%20nach%20der%20Entdeckung%20der%20DNA>] abgerufen 14.01.2022
- [25] [W. Wilcoxon, Does a 10 °C Increase in Temperature Really Reduce the Life of Electronics by Half?, <https://www.electronics-cooling.com/2017/08/10c-increase-temperature-really-reduce-life-electronics-half/>] abgerufen: 6.3.2021
- [26] [Rapid, dose-dependent and efficient inactivation of surface dried SARS-CoV-2 by 254 nm UV-C irradiation, S.5, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8532508/pdf/eurosurv-26-42-3.pdf>] abgerufen 14.6.2022)
- [27] [Molecular Photobiology. Inactivation and Recovery, 1969, S.6, <https://www.sciencedirect.com/book/9781483197425/molecular-photobiology>] abgerufen 14.6.2022

## 11.2 Bildquellen:

- [1] Streifen Titelbild: [Luminale Frankfurt, Bureau Sandra Doeller, <https://www.luminale.de/startseite/>] abgerufen: 10.1.2021
- [2] Design Logo&Deckblatt [Maximilian Pfannkuch, 10.1.2021]
- [3] Das macht SARS-CoV-2 aus, Stoffliche Eigenschaften: Das macht SARS-CoV-2 aus | PZ – Pharmazeutische Zeitung (pharmazeutische-zeitung.de)
- [4] Bakterienzelle, Struktur und Funktion, Bakterienzelle, Struktur und Funktion (u-helmich.de)
- [5] [UVC Dosimeters, <https://insights.regencylighting.com/hs-fs/hubfs/Dosimeter%20dot%20%26%20reference%20card.jpg?width=900&name=Dosimeter%20dot%20%26%20reference%20card.jpg>] abgerufen 11.03.2022

## 12 Wir danken!

*Ein großes Dankeschön an alle, die uns während unserer Arbeit unterstützt haben.*

Janine Christians, Diplom-Biologin, hat uns im Thema PCR und Analytik beraten und Fragen zum ELISA Kit beantwortet.

Marianne Demuth-Birkert, Diplom-Biologin, hat uns mikrobiologische Fragen beantwortet und mit Mikroorganismen versorgt.

Martin Bachsteffel, technischer Support bei Thermo Fischer Scientific GmbH, hat uns technische Rückfragen zu unserem Fotometer beantwortet.

Mirko Birkenstock, Kundenberater, Dräger Medical Deutschland GmbH, hat uns die Infinity Expirationsfilter zur Verfügung gestellt.

Nico Pfeifer, Johanna Heck, Heraeus Noblelight, haben uns in der Woche nach dem Regionalwettbewerb 2021 Informationen zum Stand der Forschung gegeben.

Petra Neumann, Chemie, gab unseren Informatikern die notwendige Sicherheitseinweisung und stand uns bei der Verwendung des Fotometers zur Seite.

Dr. Susanne Peters, Field Sales Specialist Biomonitoring, Merck Milipore, Lab Central Europe, hat uns die Nutzung des Luftkeimsammler-Demogeräts ermöglicht.

Susanne Schadt, M. Sc Physik, Hanau, Heraeus Noblelight, hat uns bei der fotometrischen Untersuchung begleitet.

## Authentizitätserklärung

Hiermit erklären wir,

Maximilian Pfannkuch,

Jaro Filip,

Dominik Hein,

dass wir die hier vorgelegte Arbeit mit dem folgenden Titel

[revolutionAIR] - Entwicklung eines effizienten Luftreinigungssystems auf Basis von UV-LEDs

selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen, insbesondere dem Internet, entnommen sind, sind als solche eindeutig und wiederauffindbar kenntlich gemacht. Alle diese Quellen sind vollständig und abschließend in einem Literaturverzeichnis angegeben. Die vorliegende Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht veröffentlicht.

Hanau, 16.04.2023

*M. Pfannkuch Jaro Filip Dominik Hein*