

UV-LEDs in der Abluftreinigung

Prof. Dr.-Ing. Claus Schuster, Dipl.-Wirt.-Ing. Bastian Obertegger,
Fachhochschule Südwestfalen, Lindenstraße 53, 59872 Meschede

Abstract

Das Labor für Umweltverfahrenstechnik der Fachhochschule Südwestfalen entwickelte und erforschte gemeinsam mit Partnern aus der Industrie im Rahmen des Forschungsprojekts „Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur Abluftbehandlung mit UV-Strahlung aus LEDs“, ein neuartiges Anlagenkonzept zur Abluftbehandlung. Dieses Verfahren kombiniert die in der Abluftreinigung bisher üblichen Technologien der Photooxidation mit neuartigen UV-LEDs.

Bei Photooxidationsanlagen zur Abluft-Reinigung und Desinfektion wird die Abluft mit Hilfe von UV-Strahlung gereinigt und desinfiziert. Die hierbei wichtigen Strahlungsbereiche liegen bei einer Wellenlänge von 250 nm bis 280 nm sowie bei einer Wellenlänge von 180 nm bis 200 nm. Bisher werden für derartige Abluftbehandlungsanlagen Amalgamlampen zur Erzeugung der UV-Strahlung eingesetzt. Bei diesen Lampen beträgt die UV-Ausbeute lediglich etwa 7 %, die übrige Energie wird in Form von Wärme und Licht abgegeben. Außerdem sind Amalgamlampen nicht regelbar und häufige Schaltzyklen verringern die Lebensdauer.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der Untersuchungen mit UV-LEDs mit einer auf Basis der Voruntersuchungen konzipierten Laboranlage zusammen und zeigt künftige Einsatzmöglichkeiten für diese LEDs auf. Die Ergebnisse der Untersuchungen führten zur Entwicklung und dem Bau eines Prototypen, der sowohl mit Amalgamlampen als auch mit UV-LEDs betrieben werden kann.

Basierend auf einem Universalmodul kann der Prototyp mit unterschiedlichen Reinigungsstufen und Verfahren ausgestattet werden. Die Reinigungsleistung dieser Anlage liegt bei bis zu 6.000 m³ Abluft/h. Mit Hilfe dieses Prototypens soll die Leistungsfähigkeit des Verfahrens an weiteren Anwendungsfällen untersucht werden. Weiterhin dient er als Basis zur Untersuchung der wirtschaftlichen Einsatzfähigkeit von UV-LEDs unter Berücksichtigung der weiteren Kostenreduktion und Leistungssteigerung dieser.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 17046X10 gefördert.

1. Grundlagen der Photooxidation

Bei Photooxidationsanlagen zur Abluft-Reinigung und Desinfektion wird die Abluft mit Hilfe von UV-Strahlung gereinigt und desinfiziert. Die hierbei wichtigen Strahlungsbereiche liegen bei einer Wellenlänge von 250 nm bis 280 nm sowie bei einer Wellenlänge von 180 nm bis 200 nm.

Bei einer UV-Strahlung mit Wellenlängen zwischen 200 nm bis 280 nm (vgl. Bild 1) werden Bakterien, Viren, Sporen und andere Mikroorganismen unschädlich gemacht. Hierbei schädigt die UV-Strahlung die DNA der Erreger. Allerdings sind bei höheren, mehrzelligen Lebensformen mit einer entsprechend dicken Außenhülle die sehr kurzwellige UV-Strahlung nicht mehr in der Lage, die Hülle zu durchdringen. Hier müssen andere Reinigungsverfahren die Desinfektion mit UV-Strahlung unterstützen.

Seit einiger Zeit sind UV-LEDs, welche in dem Wellenlängen-Bereich von 250 nm bis 280 nm Strahlung emittieren, auf dem Markt erhältlich. LEDs haben den Vorteil, dass diese in ihrer Leistung, mit einer entsprechenden Elektronik ausgestattet, regelbar sind und auch gepulst werden können. Da bei einer LED hauptsächlich die Wärmezeugung der Lebensdauer limitierende Faktor ist, kann durch ein Pulsen der LED die Leistung erhöht werden. So kann die Steigerung der Leistungsaufnahme, je nach LED, beim Pulsen um den Faktor 8 betragen, ohne dass es durch die höhere Leistungsaufnahme zu einer erhöhten Wärmeentwicklung und damit zu einer Verringerung der LED-Lebensdauer kommt.

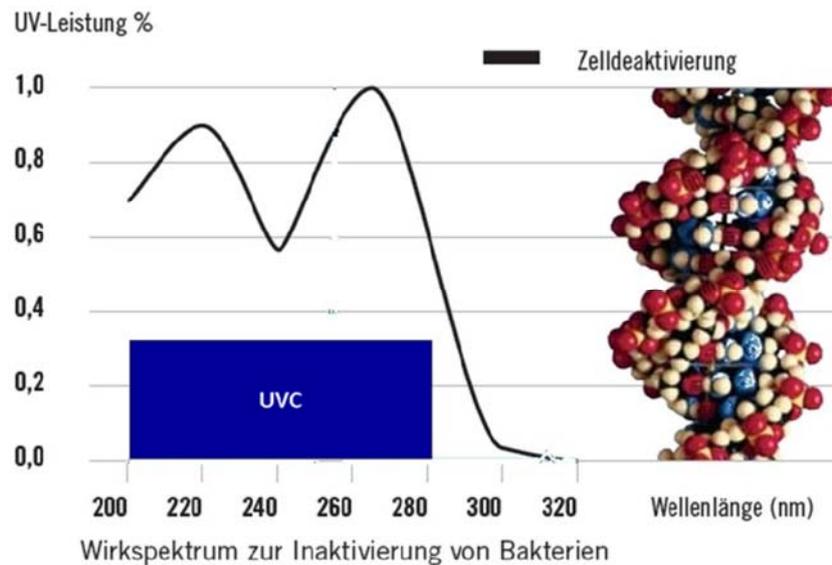


Bild 1: Wirkungsspektrum zur Inaktivierung von Bakterien

Quelle: Sedlmeier, Katrin. Seminarvortrag SS2008 „Wasseraufbereitung mit UV-LEDs“ TU Berlin, Fakultät II, Institut für Festkörperphysik. [Online] http://www.ifkp.tu-berlin.de/fileadmin/i1/Kneissl/IS08_UV-LED_KS.pdf

Bei einer UV-Strahlung unterhalb einer Wellenlänge von 200 nm werden durch Photooxidationsprozesse Molekülverbindungen „oxidiert“. Das heißt, dass unerwünschte langkettige Moleküle in der Abluft reduziert und damit unschädlich gemacht werden. Darüber hinaus finden auch Photodissoziationen statt. Hierbei wird unter anderem Ozon erzeugt. Dies geschieht bei der Bestrahlung der Sauerstoffmoleküle in der behandelten Luft. Die Sauerstoffmoleküle (O_2) werden durch die UV-Strahlung in einzelne Sauerstoffatome aufgespalten (O), welche sich anschließend mit noch vorhandenen Sauerstoffmolekülen (O_2) zu Ozon (O_3) vereinigen. Ozon wirkt auf die in der Luft vorhandenen Molekülverbindungen ebenfalls stark oxidieren und desinfizierend. Es eignet sich somit ebenfalls hervorragend für die Abluftbehandlung. Durch das starke Oxidations- und Gefährdungspotential von Ozon sollte so wenig Restozon wie möglich mit der gereinigten Abluft an die Umgebungsluft abgegeben werden. Als Restozon wird hier Ozon bezeichnet, welches bei der Abluftbehandlung nicht mit den Verunreinigungen in der Abluft reagiert und somit nicht abgebaut wird. Zum Schutz der Umwelt sind daher maximale Ozon-Konzentrationen gemäß DIN 18869-7 von $20 \text{ mg/m}^3_{i.N.}$ in der Abluft für Deutschland vorgeschrieben.

Ozon ist darüber hinaus sehr instabil und zerfällt wieder sehr zügig. Dieser Zerfall kann durch die Bestrahlung mit längerwelligem UV-Licht beschleunigt werden.

Abluftbehandlungsanlagen für die Behandlung von Abluft mit UV-Strahlung werden je nach Einsatzgebiet mit UV-Strahlungsquellen ausgestattet, welche in einer der zwei beschriebenen Wellenlängenbereiche Strahlung emittieren.

1. Nicht Ozon erzeugenden Lampen. Diese Lampen emittieren Strahlungen mit einer Wellenlänge von größer 200 nm. Diese werden in der Abluftdesinfektion eingesetzt, wobei die gängigen UV-Lampen im Bereich größer 250 nm arbeiten.
2. Ozon erzeugende Lampen. Diese Lampen emittieren Strahlungen mit einer Wellenlänge von unter 200 nm. Diese Lampen werden in der Abluftreinigung eingesetzt.

Bei den in der Abluftreinigung eingesetzten UV-Strahlern handelt es sich in der Regel um Mittel- und Niederdruck-Amalgamlampen. Diese Amalgamlampen werden mit einem Vorschaltgerät gestartet und sind in ihrer Leistung nicht regelbar. Das heißt, dass diese Lampen nicht an eine schwankende Abluftintensität angepasst werden können. Die Lebensdauer dieser Lampen liegt zwischen 6.000 und 16.000 Std. Bei Amalgamlampen, welchen in dem ozonerzeugenden Bereich, in der Regel bei 185 nm arbeiten, liegt die abgegebene Strahlung in einem Wirkungsbereich von 6 - 9 % der Ausgangsleistung. Das Bild 2 zeigt beispielhaft das Verfahrensschema einer typischen Photooxidationsanlage.

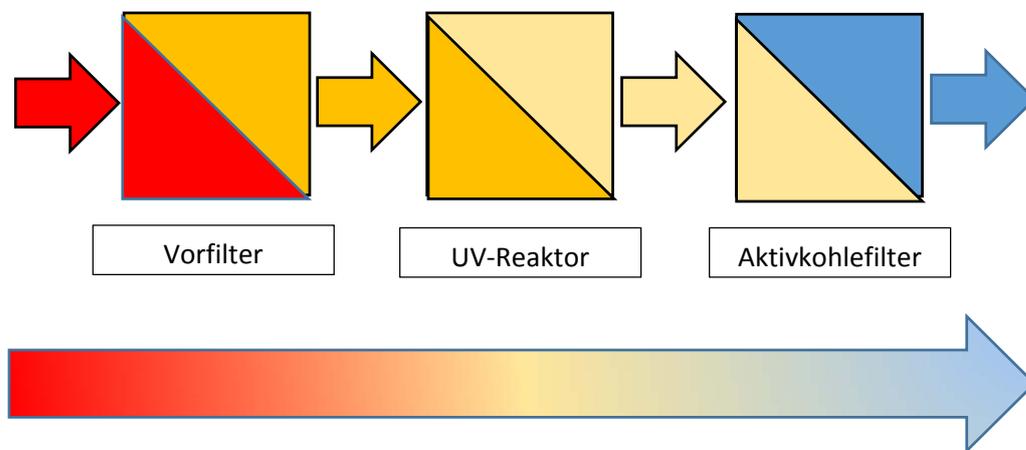


Bild 2: Verfahrensschema einer Photooxidationsanlage

Wie aus Bild 2 ersichtlich, wird die zu behandelnde Abluft mit einem Vorfilter von Partikeln und Aerosolen gereinigt. Diese partikelfreie Abluft wird dann in dem UV-Reaktor mit UV-Strahlung bei einer Wellenlänge von 185 nm behandelt. Nach der Photooxidation werden alle noch verbliebenen Verunreinigungen unter Einsatz eines Aktivkohlefilters aus der Abluft gefiltert.

2. Entwicklung

Zum Zeitpunkt des Forschungsprojektes waren die ersten UV-LEDs, welche in dem Wellenlängenbereich von 250 nm bis 280 nm Strahlung emittieren, auf dem Markt erhältlich. LEDs haben den Vorteil, dass diese in ihrer Leistung, mit einer entsprechenden Elektronik ausgestattet, regelbar sind und auch gepulst werden können. Da bei einer LED hauptsächlich die Wärmeerzeugung der Lebensdauer limitierende Faktor ist, kann durch ein Pulsen der LED die Leistung erhöht werden. So kann die Steigerung der Leistungsaufnahme, je nach LED, beim Pulsen um den Faktor 8 betragen, ohne dass es durch die höhere Leistungsaufnahme zu einer erhöhten Wärmeentwicklung und damit zu einer Verringerung der LED-Lebensdauer kommt.

Es wurde von der Fachhochschule Südwestfalen ein Verfahrenskonzept zur Abluftreinigung entwickelt, bei welchen die oben beschriebenen UV-LEDs zum Einsatz kommen. Bei diesem Verfahrenskonzept wurde besonderer Wert auf Flexibilität gelegt. So sollte auch die auf dem Verfahrenskonzept resultierende Anlage möglichst vielen Aspekten der Abluftreinigung entsprechen. Von vorn herein

wurde bei dem grundsätzlichen Anlagendesign verschiedene System-Module definiert. Diese Unterteilung erfolgte wie folgt:

1. System-Modul mechanische Reinigung
2. System-Modul UV-Reaktor 1, ozonerzeugend
3. System-Modul UV-Reaktor 2, desinfizierend und ozonreduzierend
4. System-Modul chemisch/physikalische Reinigung

Bei der Entwicklung der System-Module wurde darauf geachtet, dass diese ohne Anpassungsmaßnahmen untereinander kombinierbar sind. Hierdurch wird es möglich, aus den System-Modulen ein genau auf die jeweilige Anforderung abgestimmtes Anlagengesamtsystem zusammenzustellen.

Dies kann von einer einfachen Ausbaustufe der Anlage zur Staubabscheidung bis hin zu der komplexen Ausbaustufe der Anlage zur Elimination von langkettigen Kohlenstoffverbindungen unter Verwendung von ozonerzeugender UV-Strahlung, chemisch/physikalischer und mechanischer Reinigung sowie Restozon-Elimination durch UV-Strahlung reichen.

In Voruntersuchungen zur Bestimmung der Strahlungsintensität wurde im Labor für Licht- und Solartechnik der Fachhochschule Südwestfalen das in Bild 3 dargestellte Spektrum der untersuchten UV-LEDs gemessen. Wie man erkennt, liegt das emittierte Lichtspektrum der LEDs sehr eng beieinander im Bereich 275 nm bis 295 nm und besitzt dort eine Intensität von 85 bis 100 % bezogen auf die emittierte UV-Strahlung. Allerdings beträgt der Anteil der UV-Strahlung an der Gesamtleistung der LEDs nur etwa 10 %. Dies hat zur Folge, dass bei spezifischen Kosten von etwa 200 bis 300 € eine wirtschaftliche Abluftbehandlung mit LEDs alleine noch nicht möglich ist. So wurde der UV-Reaktor zur Abluftbehandlung zunächst mit einer Amalgamlampe ausgestattet.

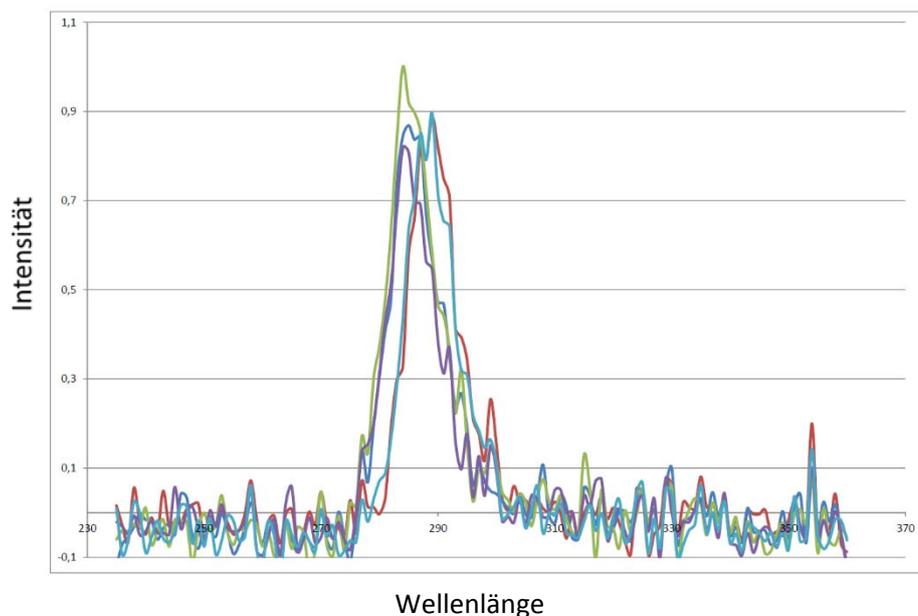


Bild 3: Emissionsspektrum der verwendeten UV-LEDs

Quelle: Labor für Licht- und Solartechnik, Prof. Kuipers

Für die Versuchsdurchführung wurde eine Laborversuchsanlage gemäß den ausgearbeiteten Systemmodulen aufgebaut. Die Versuchsdurchführung erfolgte mit verschiedenen, gesundheitlich unbedenklichen Abluftarten aus der Lebensmittelindustrie. Diese wurde bewusst so gewählt, da die Versuchsdurchführung auch olfaktometrische Messungen umfassen konnte. Die komplexen Versuchsaluftarten bestanden unter anderem aus unterschiedlichen Fettsäuren mit Kohlenstoffketten, welche zwischen 4 bis 24 C Atome aufwiesen. Im Verlauf der Verfahrenserprobung unter realen Bedingungen konnte die Wirksamkeit des Verfahrens und der einzelnen Systemmodule in Langzeittests ausgiebig untersucht und erprobt werden.

Ein Kernelement des Forschungsprojektes war die Erforschung und Entwicklung eines UV-Reaktors, welcher mit UV-LEDs als Strahlungsquelle ausgestattet werden sollte.

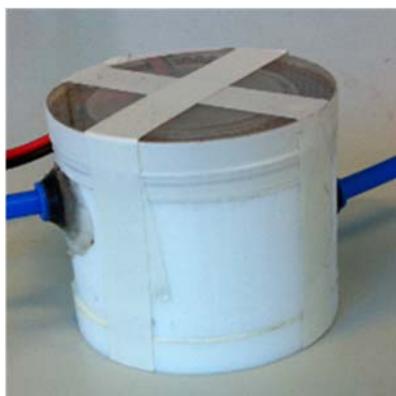


Bild 4: LED-Strahlungsreaktor

Bild 4 zeigt einen UV-LED-Reaktor bei entsprechenden Laborversuchen. Der UV-LED-Reaktor stellt gleichzeitig ein Alleinstellungsmerkmal des Verfahrenskonzeptes dar und grenzt es gegenüber anderen auf dem Markt befindlichen Verfahren ab. Ein Forschungsschwerpunkt stellte hierbei die Reduzierung des Restozon-Gehaltes der gereinigten Abluft unter Verwendung der UV-Strahlung aus den UV-LEDs dar. Restozon ist Ozon, welches in einem vorherigen Verfahrensschritt zur Behandlung der Schmutz- und Schadstoffe mit einer UV-Lampe erzeugt und noch nicht abgebaut wurde. Da diese UV-Lampen nicht regelbar sind, wird bei geringeren Schadstoffbelastungen zu viel Ozon produziert. Dies ist zum Beispiel bei stark schwankenden Produktionszyklen

mit einer einhergehenden stark schwankenden Abluftbelastung der Fall. Dieses Restozon würde ohne eine Nachbehandlung mit der behandelten Abluft an die Umgebungsluft abgegeben. Üblicherweise werden für die Ozonelimination Aktivkohlefilter verwendet. Aktivkohlefilter haben den Nachteil, dass Sie sich sättigen. Hierdurch verlieren sie kontinuierlich an Reinigungsleistung, bis diese nicht mehr ausreicht und der Aktivkohlefilter getauscht oder regeneriert werden muss. Eine mögliche Ozon-Nachbehandlung mit herkömmlichen UV-Lampen ist aufgrund des hohen Energieaufwandes nicht wirtschaftlich. LEDs werden in ihrer Einsatzzeit nur durch ihre Lebensdauer begrenzt und ermöglichen so sehr hohe Standzeiten und zeichnen sich durch ihren allgemein geringen Energieverbrauch aus. Bild 5 zeigt das Verfahrensschema mit einer Ozonreduktion mittels UV-Strahlung.

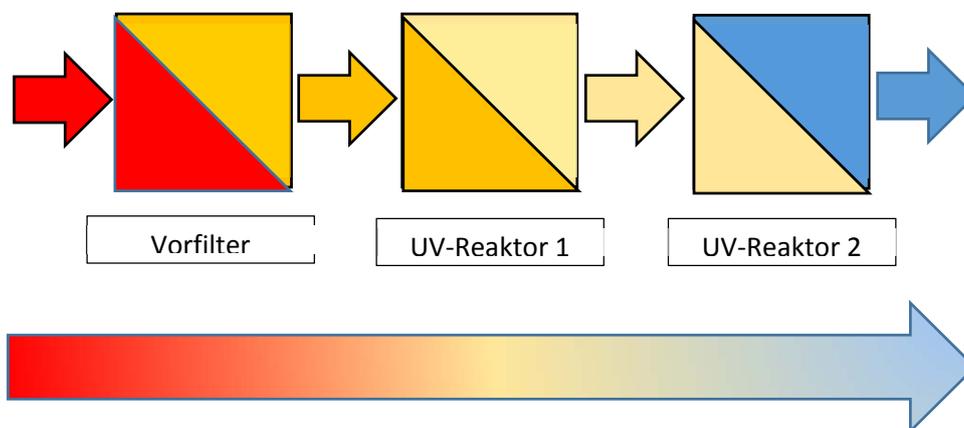


Bild 5: Verfahrensschema der Photooxidationsanlage mit 2. UV-Reaktor zur Ozonreduzierung

Wie man in Bild 5 erkennt, werden Staub und Aerosole in dem Vorfilter aus der Abluft herausgefiltert. Anschließend werden im UV-Reaktor 1 die Kohlenstoff-Molekülketten in der Abluft mit UV-Strahlung bei einer Wellenlänge von 185 nm und dem bei dieser Wellenlänge entstehenden Ozon oxidiert. Abschließend wird das Restozon im UV-Reaktor 2 ebenfalls wieder zu zweiwertigem Sauerstoff aufgespalten. Die Ozonreduktion wird bei der Versuchsdurchführung kontinuierlich gemessen.

3. Ergebnisse

Die Untersuchungen mit einer auf Basis der Voruntersuchungen konzipierten Laboranlage zeigen, dass mit dem entwickelten Verfahren eine Reinigungsleistung von 80 bis 100 % erzielt werden kann. Auch bei der Ozonreduktion mittels UV-LEDs konnten positive Ergebnisse erzielt werden. Da die zum Zeitpunkt des Forschungsprojektes auf dem Markt erhältlichen UV-LEDs noch eine sehr geringe Leistungsfähigkeit und bedingt durch die geringen Stückzahlen auch sehr hohe Stückkosten aufweisen, konnte noch keine Marktreife bei dem UV-LED-Reaktor erlangt werden. Hier wird die Entwicklung des UV-LED-Systemmoduls bei Erscheinen entsprechend leistungsstärkerer LEDs von der Fachhochschule Südwestfalen auch nach dem Projektende weitergeführt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen führten zur Entwicklung und dem Bau eines Prototypen, der sowohl mit Amalgamlampen als auch mit UV-LEDs betrieben werden kann.

Basierend auf einem Universalmodul, das in Bild 6 dargestellt ist, kann der Prototyp mit unterschiedlichen Reinigungsstufen und -verfahren ausgestattet werden. Die Reinigungsleistung dieser Anlage liegt bei bis zu 6.000 m³ Abluft/h.

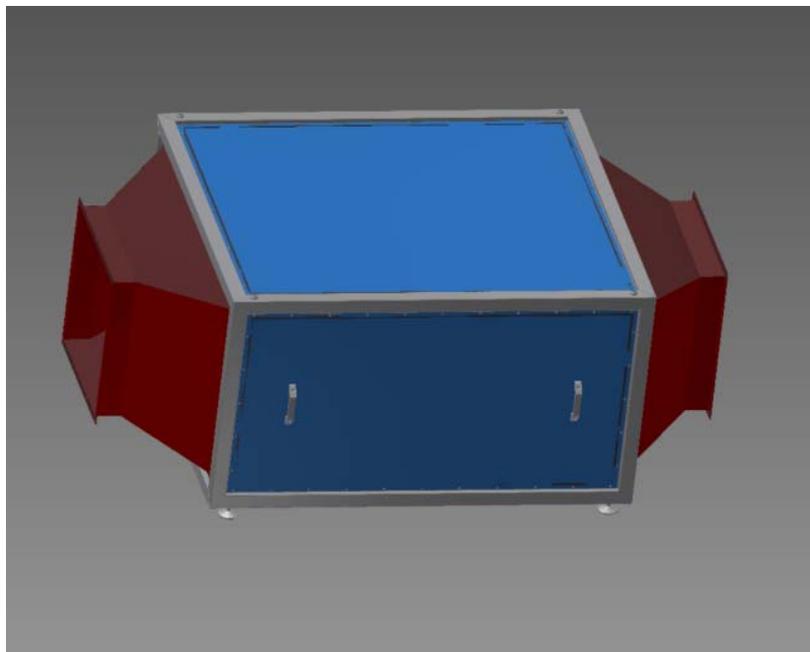


Bild 6: Universalmodul der Abluftbehandlungsanlage

Mit Hilfe dieses Prototypens soll die Leistungsfähigkeit des Verfahrens an weiteren Anwendungsfällen untersucht werden. Weiterhin dient er als Basis zur Untersuchung der wirtschaftlichen Einsatzfähigkeit von UV-LEDs unter Berücksichtigung der weiteren Kostenreduktion und Leistungssteigerung dieser.