

# ANSATZ ZUR OPTIMIERTEN POSITIONIERUNG VON BLAULICHTQUELLEN ZUR EFFEKTIVEN OBERFLÄCHENDEKONTAMINATION IN EINER FLUGZEUGKABINE

I. Talai\*, M. Fuchs\*, J. Biedermann\*, B. Nagel\*

\* DLR e.V., Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt, Hein-Saß-Weg 22, 21129 Hamburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Der Ausbruch der globalen SARS-Cov2-Pandemie hat den Luftverkehr stark beeinträchtigt und die Notwendigkeit effizienterer Dekontaminationsverfahren in Flugzeugkabinen verdeutlicht. Dies hat gezeigt, dass neue Technologien gebraucht werden, um die Dekontaminationsverfahren zur Keimreduzierung in der Kabine effizienter zu gestalten. Die Integration dieser Technologien in der Kabine ist von Bedeutung, um das Sicherheitsgefühl und die Gesundheit der Passagiere zu verbessern, insbesondere im Hinblick auf zukünftige Epidemien oder Pandemien. Während die Luftübertragung von Keimen und damit Infektionen während des Fluges durch High-Efficiency Particulate Air Filter (HEPA-Filter) teilweise reduziert wird, wird die Kontaktinfektion durch die Systeme und Materialien im Flugzeug kaum verhindert. Üblicherweise werden Oberflächenkeime in Flugzeugkabinen durch die manuelle Anwendung chemischer Dekontaminationsmittel reduziert. Aufgrund des umfangreichen Ausmaßes der Kabinenoberfläche sowie der begrenzten Turnaroundzeit von Passagierflugzeugen ist jedoch nur eine unzureichende Dekontamination möglich. Um dennoch eine keimreduzierte Flugzeugkabine im täglichen Betrieb zu gewährleisten, ist eine Automatisierung der Dekontaminationsprozesse gefordert. In diesem Zusammenhang bietet der Einsatz von antiseptischem blauem Licht eine vielversprechende Lösung. Durch eine regelmäßige Bestrahlung der Oberflächen werden Keime inaktiviert und somit das Risiko einer Infektionsübertragung auf die Passagiere minimiert. Die Wirksamkeit der Bestrahlung ist von Faktoren wie der Dauer und der Distanz zwischen den Lichtquellen und den Oberflächen abhängig. Daher wird in dieser Arbeit eine Ray-Tracing-basierte Methode erforscht, um die Positionen der Lichtquellen zur Bestrahlung der Kabinenoberflächen einer Flugzeugkabine wie Tray Tables zu analysieren und zu optimieren, unter Berücksichtigung der Kabinenkonfiguration, der Lichtausbreitung und der zur Keiminaktivierung erforderlichen Strahlungsintensität. Die Simulation ermöglicht ausgehend von der benötigten Strahlungsintensität auf den Oberflächen der Flugzeugkabinenkomponenten eine gezielte Verfolgung der Lichtstrahlen, um die notwendige Anzahl der Lichtquellen und die geeigneten Positionen zu ermitteln und dafür ein Optimum zu finden, damit das Gesamtsystem der Blaulichtdekontamination in zukünftigen Kabinenkonfigurationen integriert und berücksichtigt werden kann. Auf diese Weise können die Bestrahlungsdauer sowie die Anzahl der Lichtquellen und dadurch das Zusatzgewicht im Flugzeug minimiert und gleichzeitig eine ausreichende Dekontamination der Oberflächen für eine keimreduzierte Flugzeugkabine gewährleistet werden. Zudem führt dies zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit einer Infektion für Passagiere in der Flugzeugkabine, auch während Perioden mit erhöhter Krankheitslast, und trägt zu einem erhöhten Sicherheitsgefühl bei Flügen bei.

## Keywords

Flugzeugkabine; Keimreduzierung; Dekontamination; Ray-Tracing; Oberflächendekontamination

## 1. EINLEITUNG

In der modernen Luftfahrt ist die Gewährleistung von Hygiene und Gesundheit an Bord von Flugzeugen von großer Bedeutung. Die Flugzeugkabine ist ein dicht besiedelter Raum, in dem Passagiere über längere Zeiträume auf engem Raum zusammen sind [1], [2]. Diese Bedingungen führen zu einer erhöhten Anfälligkeit für die Verbreitung von Krankheitserregern, was das Risiko von Infektionen in Flugzeugen erhöhen kann [2]. Keime können über die Luft, durch direkten Kontakt oder über kontaminierte Oberflächen als wesentliche Übertragungswege von

Person zu Person übertragen werden. [3]. Daher ist die Keimreduzierung in der Kabine wichtig, um die Krankheitsübertragung zu minimieren und die Gesundheit der Passagiere und Besatzungsmitglieder zu schützen.

Besonders in Zeiten globaler Gesundheitskrisen, wie der COVID-19-Pandemie, hat sich gezeigt, wie sich Krankheitserreger in geschlossenen Räumen wie Flugzeugkabinen ausbreiten können [4]. Infektionen können insbesondere während Pandemien und Epidemien nicht nur die Gesundheit der Reisenden beeinträchtigen, sondern auch das Vertrauen in die

Sicherheit des Luftverkehrs beeinflussen und potenziell wirtschaftliche Auswirkungen haben. Daher ist es von Bedeutung, effiziente und zuverlässige Methoden zur Keimreduzierung zu entwickeln und zu implementieren.

Obwohl die Reduzierung der Luftübertragung von Keimen durch den Einsatz von High-Efficiency Particulate Air Filtern (HEPA-Filtern) bereits zum Teil erforscht ist [5], [6], [7] und die Luftübertragung unter bestimmten Umständen, insbesondere für weiter entfernte Passagiere, kontrolliert wird [7], [8], [9], bleibt die Kontamination von Oberflächen eine Herausforderung [10]. Passagiere und Besatzungsmitglieder kommen häufig mit verschiedenen Oberflächen in der Kabine in Berührung, wie z.B. Sitze, Tische, Türgriffe und Toiletten. Diese Oberflächen können als Träger für die Übertragung von Krankheitserregern dienen, wenn sie nicht ordnungsgemäß dekontaminiert werden. Eine manuelle Reinigung aller relevanten Kabinenoberflächen ist jedoch mit großem Zeitaufwand verbunden. Dadurch bleibt während der typischerweise kurzen Turnaroundzeiten kaum Zeit, um eine gründliche Dekontamination durchzuführen. Automatisierte Dekontaminationsmethoden bieten eine vielversprechende Lösung, um die mikrobiellen Belastungen auf Oberflächen in kürzerer Zeit zu reduzieren. Durch den Einsatz von Blaulichtlampen mit antiseptischer Wirkung kann die Strahlung auf kontaminierte Oberflächen gerichtet werden, um eine gezielte sowie automatische Dekontaminationswirkung zu erzielen. Diese Technologie ermöglicht eine präzise und effiziente Keimreduktion und könnte die herkömmlichen Reinigungsverfahren nennenswert ergänzen.

Dieses Paper stellt einen Ansatz für eine optimierte Positionierung von dekontaminierenden Blaulichtquellen als eine automatisierte Dekontaminationsmethode in einer Flugzeugkabine vor und zeigt dies anhand eines Anwendungsfalls. Durch die Optimierung der hygienischen Bedingungen in der Luftfahrt können nicht nur die Gesundheit der Reisenden verbessert, sondern auch das Vertrauen in die Sicherheit des Luftverkehrs gestärkt werden. Dies trägt zum Wohlbefinden der Passagiere bei und unterstützt einen ganzheitlichen Flugzeugentwurf, der die Gesundheit der Passagiere berücksichtigt.

## 2. BLAUES LICHT ALS DEKONTAMINATIONS-METHODE

Blaues Licht umfasst den Wellenbereich des sichtbaren Lichts zwischen 400 und 480 nm und hat in der mikrobiellen Inaktivierung ein großes Potenzial. Besonders relevant für die Dekontamination scheint das blaue Licht bei 405 nm zu sein, da es nahe am ultravioletten Spektrum liegt und damit eine höhere Wirksamkeit zur Inaktivierung von Mikroorganismen aufweist. Diese Wellenlänge ist in der Lage, bestimmte Moleküle in den Zellen zu aktivieren, die Mikroorganismen abtöten können. [11]

Der Einsatz von Strahlungstechniken, wie UV-Strahlung, hat sich als wirksam erwiesen, um Mikroorganismen abzutöten [12]. Im Vergleich zu UV-Strahlung bietet blaues Licht einige Vorteile. Während UV-Licht ebenfalls in der mikrobiellen Inaktivierung eingesetzt wird, kann eine längere Exposition gegenüber UV-Licht zu schweren Gesundheitsproblemen wie Hautkrebs führen [11]. Blaues Licht wirkt selektiver auf Mikroorganismen, ohne gesunde Zellen signifikant zu schädigen, was es zu einer sichereren Option für die Desinfektion von Oberflächen macht [11]. Zudem ist die Nutzung von Light-emitting diodes (LEDs), die blaues Licht emittieren, energieeffizienter und langlebiger als herkömmliche UV-Lampen, da sie eine Betriebsdauer von über 100.000 Stunden erreichen [11].

## 3. STRAHLENAUSBREITUNG UND -INTENSITÄT

In dieser Arbeit wird der Einsatz von Blaulichtlampen in Flugzeugkabinen untersucht, wobei das zentrale Ziel darin besteht, einerseits eine ausreichende Lichtmenge für die Dekontamination der Oberflächen bereitzustellen und andererseits die Anzahl der eingesetzten Lampen auf ein Minimum zu beschränken. Dadurch soll die zusätzliche Masse, die durch die Lampen für die Dekontamination entsteht, so gering wie möglich gehalten werden.

Um die benötigte Lichtmenge an den relevanten Oberflächen zu gewährleisten, muss die Lichtausbreitung in der Kabine untersucht werden. Eine herkömmliche Betrachtungsweise würde die Lichtquellen ohne Berücksichtigung einer optimalen Verteilung platzieren und die Lichtstrahlen direkt von der Quelle ausgehend verfolgen, was theoretisch dazu führen könnte, dass zur Sicherstellung einer ausreichenden Dekontamination eine übermäßige Anzahl an Blaulichtlampen installiert werden muss. Diese Vorgehensweise widerspricht jedoch dem Ziel, die Masse der Lampen in der Kabine zu minimieren. Um optimierte Positionen der Blaulichtlampen zu ermitteln, wird anstelle der herkömmlichen Betrachtungsweise, die die Lichtstrahlen von der Quelle ausgehend verfolgt, eine inverse Methodik für die Strahlungsverfolgung entwickelt. Dabei wird die gewünschte Lichtverteilung auf den Oberflächen als Ausgangspunkt genommen und von dort rückwärts auf mögliche Lampenpositionen geschlossen. Durch diese Methodik lassen sich optimierte Positionen für die Blaulichtlampen bestimmen, die eine ausreichende Dekontamination gewährleisten, während die Anzahl und damit die Gesamtmasse der Lampen so gering wie möglich bleiben.

In diesem Kapitel wird zunächst im Unterkapitel 3.1 die Vorgehensweise der Methodik zur Positionsbestimmung der Blaulichtlampen sowie der erste Schritt der Vorgehensweise, die Punktnetz-Erstellung, beschrieben. Die darauf folgenden Unterkapitel bieten einen Überblick über die erforderliche Strahlungsintensität für die zu bestrahlenden Flächen, die

Lichtausbreitung und die Ermittlung der Strahlungsintensität auf den bestrahlten Flächen.

### 3.1. Vorgehensweise der Methodik und Punktnetz-Erstellung

Die Vorgehensweise der Methodik, welche in der Programmiersprache Python implementiert ist, gliedert sich in fünf Phasen, die in Bild 1 in weißer Schrift dargestellt sind. Die einzelnen Schritte finden an verschiedenen Orten statt, wie den bestrahlten Flächen (z. B. den Sitzflächen) oder den bestrahlenden Flächen (z. B. dem Hatrack, an dem die Lichtquellen installiert werden sollen), die im genannten Bild in schwarzer Schrift zu sehen sind. Zunächst werden an den bestrahlten Oberflächen die Startpositionen generiert, von denen aus die Strahlen in sphärische Richtungen ausgebreitet werden. Im nächsten Schritt werden an den bestrahlenden Flächen die Intersektionen der Strahlen sowie die jeweilige Intensität der Strahlung bestimmt. Abschließend werden mithilfe einer Optimierungsmethode die Positionen der Blaulichtlampen ermittelt. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitten detaillierter erläutert. Um die optimale Position der Lichtquellen zu bestimmen, wird die Strahlungsausbreitung in umgekehrter Richtung betrachtet. Das bedeutet, dass ausgehend von den Flächen, die bestrahlt werden sollen, eine geeignete Position für die Lichtquelle ermittelt wird. Beginnend mit der Generierung der Startpositionen werden sogenannte Startpunkte auf der Zieloberfläche definiert, die bestrahlt werden soll. Diese Punkte sollten über die Fläche verteilt sein, um eine möglichst gleichmäßige Bestrahlung zu gewährleisten. Ziel ist es, eine effektive Platzierung und Intensität von Lichtquellen zu ermitteln, um eine ausreichende Bestrahlungsdosis auf allen relevanten Oberflächen zu gewährleisten. Dabei werden Geometrien für das Anwendungsbeispiel dieser Arbeit genutzt, die mithilfe des wissensbasierten Werkzeuges Fuselage Geometry Assembler (FUGA) [13] generiert wurden. Diese wissensbasierte Entwurfsmethodik ermöglicht den Entwurf unterschiedlicher Flugzeugelemente auf Basis des Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS) [13], wie die Hatracks in Grün, die Seitenwände in Gelbgrün und die Sitzreihen in Blau, wie in Bild 2 gezeigt. Die zugehörigen CAD-Daten werden im Rahmen der Methodik verwendet, um die Positionen der betrachteten Geometrien zu bestimmen und mithilfe der Flächen die Intersektionen zu ermitteln. Nach der Erstellung eines Punktnetzes auf den bestrahlten Oberflächen werden von den Startpunkten aus Strahlen in verschiedenen Richtungen erzeugt, die die Oberflächen treffen und Intersektionen erzeugen. An diesen Intersektionen werden die Strahlungsintensitäten bestimmt, und auf Basis dieser Intersektionen werden anschließend die optimierten Positionen der Blaulichtlampen ermittelt.

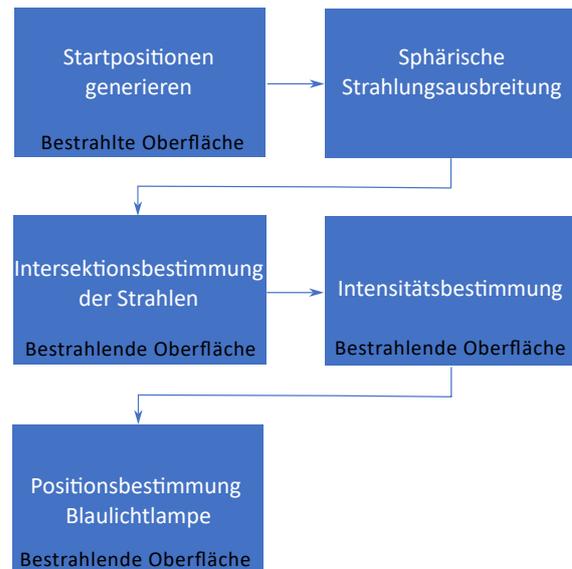


BILD 1. Vorgehensweise für die Bestimmung der Lampenpositionen

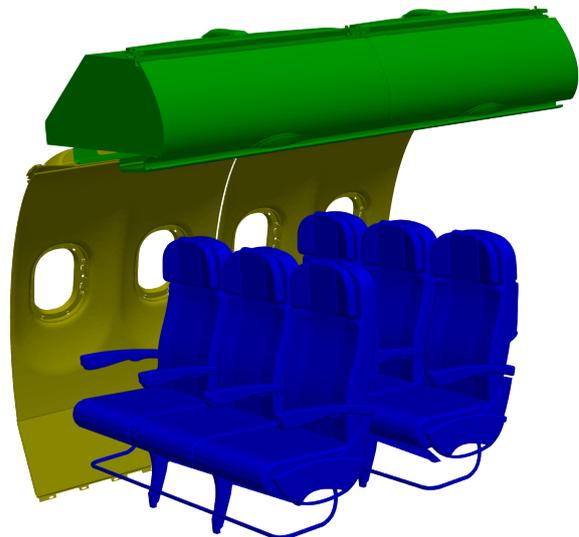


BILD 2. Darstellung des Hatracks in Grün, der Seitenwände in Gelbgrün und der Sitzreihen in Blau, erzeugt mit FUGA

### 3.2. Biologisch notwendige Strahlungsintensität

Um die Infektionsübertragung über die Oberflächen in der Flugzeugkabine zu verhindern, kann eine Dekontamination, beispielsweise mit blauem Licht, durchgeführt werden. Durch die Schädigung des Erbguts der Keime führt die Bestrahlung zu einer Inaktivierung der Keime und damit zu einer Reduzierung der Infektionswahrscheinlichkeit bei Kontakt mit den Oberflächen. Im Gegensatz zur herkömmlichen Vorstellung von Sauberkeit, die in der Regel als Abwesenheit von sichtbarem Schmutz verstanden wird, ist die mikrobielle Belastung von Oberflächen oft nicht sichtbar. Da für die Übertragung von Krankheiten eine bestimmte Infektionsdosis erforderlich ist, genügt es meist, wenn eine Oberfläche nicht vollständig keimfrei, sondern le-

diglich keimreduziert ist. Dancer [14] hat hierfür als Richtwert 2,5 koloniebildende Einheiten (Colony Forming Units, CFU) pro Quadratcentimeter für die saubere oder unbedenkliche Einstufung von Oberflächen nach einer Dekontamination vorgeschlagen. Dieser Wert wird auch in dieser Arbeit verwendet. Um diesen Schwellenwert zu erreichen, kann eine Oberfläche mit dem im Kapitel 2 eingeführten blauen Licht bestrahlt werden. Je nach Resistenz der Mikroorganismen erfordert dies aus biologischer Sicht jedoch unterschiedliche Strahlungsintensitäten. Für das hier dargestellte Anwendungsbeispiel wird eine notwendige Strahlungsintensität von  $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2$  auf den bestrahlten Flächen, in diesem Fall den Sitzflächen, angenommen.

### 3.3. Lichtausbreitung auf die bestrahlenden Flächen

Von jedem Startpunkt auf der bestrahlten Oberfläche aus werden mehrere Strahlen in unterschiedlichen Richtungen ausgesendet, die sich in sphärischer Form verbreiten. Sobald diese Strahlen auf andere Oberflächen treffen, entstehen Intersektionen, die zur Optimierung der Lichtquellenposition verwendet werden. Dabei werden nur die Strahlen berücksichtigt, die auf die bestrahlenden Flächen treffen, da nur diese Flächen von den Lampen aus die Dekontamination der bestrahlten Oberflächen durchführen können.

Da jedoch in einer Flugzeugkabine nicht alle Oberflächen für die Anbringung von Lichtquellen geeignet sind, werden nur bestimmte Flächen als potenzielle Positionen für Lichtlampen definiert. Um die Methodik zu verdeutlichen, wird ein einfaches Anwendungsbeispiel verwendet, das in Bild 3 dargestellt ist. Die Startpunkte sind in Rot und die Intersektionen in Grün zu sehen. Die Startpunkte werden auf den Sitzflächen von zwei Dreier-Sitzreihen festgelegt. Als Fläche für die Platzierung der Lichtquellen wird die Unterseite des Hatracks definiert.

Nachdem die Startpunkte auf den Sitzflächen festgelegt und die Strahlen von diesen Punkten ausgesendet wurden, werden nur die Intersektionen berücksichtigt, an denen die Strahlen auf die bestrahlenden Flächen treffen. Diese Intersektionen geben die potenziellen Positionen für die Lichtquellen an.

Im nächsten Schritt muss die Intensität der Strahlung an den Intersektionen bestimmt werden, an denen die Strahlen auf der Oberfläche aufeinandertreffen. Es gibt verschiedene Methoden zur Bestimmung der ankommenden Strahlung. In dieser Arbeit wird die Strahlungsintensität mithilfe der bekannten Formeln zur Lichtausbreitung berechnet.

Wenn sich Strahlen von einer Quelle gleichmäßig in alle Richtungen ausbreiten, ist die Intensität in einer Entfernung  $r$  von der Quelle invers proportional zu  $r^2$ . Diese Beziehung folgt direkt aus dem Prinzip der Energieerhaltung. Bei einer Ausgangsleistung  $P$  der Quelle kann die durchschnittliche Intensität  $I_1$  auf ei-

ner Sphäre mit Radius  $r_1$  und Oberfläche  $4\pi r_1^2$  mit der Formel in 1 berechnet werden. [15]

$$(1) \quad I_1 = \frac{P}{4\pi r_1^2}$$

Die gemittelte Intensität  $I_2$  durch eine Sphäre mit einem anderen Radius  $r_2$  ist durch einen ähnlichen Zusammenhang gegeben. Wenn zwischen den beiden Sphären keine Energie absorbiert wird, muss die Leistung  $P$  für beide gleich sein [15]. Mathematisch ausgedrückt:

$$(2) \quad 4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

Daraus folgt unmittelbar, dass die Intensität  $I_2$  im Verhältnis zur Intensität  $I_1$  am ersten Radius durch die folgende Beziehung beschrieben werden kann:

$$(3) \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

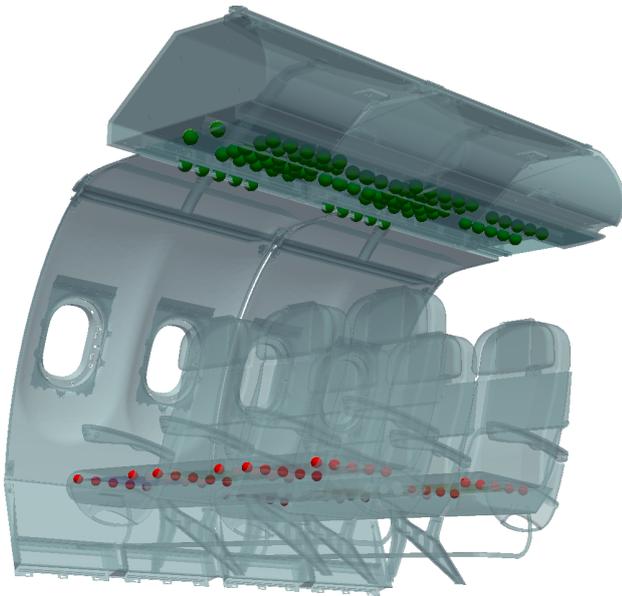
Diese Beziehung ist als das Abstandsgesetz oder als inverses Quadratgesetz bekannt und beschreibt, wie die Intensität mit wachsendem Abstand zur Quelle abnimmt [15]. Ein zentraler Bestandteil der Methodik dieser Arbeit ist jedoch die Rückverfolgung der Strahlen von den bestrahlten Flächen zu den Lichtquellen. Daher wird die Strahlungsintensität von den Startpunkten auf den bestrahlten Flächen in Richtung der bestrahlenden Flächen, den Quellen, gemäß dem Abstandsgesetz zunehmen.

$$(4) \quad I_2 = I_1 \cdot \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

### 3.4. Strahlungsintensität auf den bestrahlenden Flächen

Im nächsten Schritt der Vorgehensweise der Methodik (vgl. Bild 1) werden die berechneten Strahlungsintensitäten aller auf die bestrahlenden Flächen auftreffenden Strahlen – im Beispiel die Unterseite des Hatracks – betrachtet. Dabei wird das Prinzip der Superposition angewendet, bei dem die Intensitäten der einzelnen Strahlen, die von verschiedenen Startpunkten auf den bestrahlten Flächen (den Sitzflächen) ausgehen und auf die bestrahlenden Flächen treffen, addiert werden. Dieses Prinzip gilt für elektromagnetische Wellen wie Licht und viele andere Wellenarten [15].

Die Intensität wird dabei einerseits durch die zuvor beschriebene Abstandsregel beeinflusst, wonach die Intensität mit zunehmendem Abstand vom Startpunkt zunimmt. Andererseits wird sie auch durch die Überlagerung der Strahlen bestimmt, wobei sich die Strahlungsintensitäten verschiedener Strahlen addie-



**BILD 3. Darstellung der Startpunkte auf den Sitzflächen (bestrahlte Fläche) in Rot und die Intersektionen der Strahlen mit dem Hetrack (bestrahlende Fläche) in Grün**

ren können, wenn ihre Bereiche auf der bestrahlten Fläche zusammenfallen.

Dies wird in einem einfachen, zweidimensionalen Beispiel mit zwei Startpunkten in Bild 4 verdeutlicht. Wie in diesem Bild zu sehen, sind auf einem unteren schwarzen Balken zwei Startpunkte definiert, von denen jeweils Strahlen ausgehen. Diese Strahlen verteilen sich sphärisch, wobei sie für Darstellungszwecke eine endliche Distanz aufweisen. Die in blau markierte Intensität der Strahlung nimmt dabei gemäß dem beschriebenen Abstandsgesetz proportional zu.

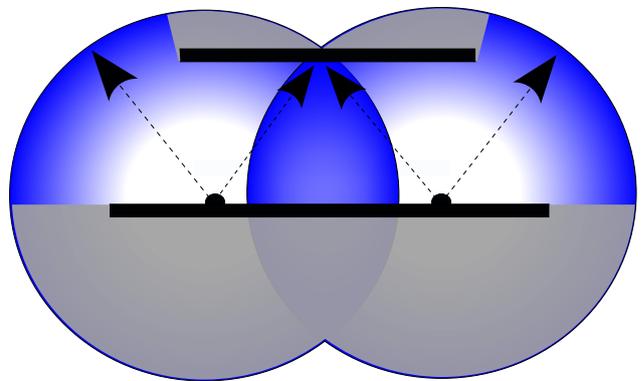
Der obere schwarze Balken stellt dabei die bestrahlende Fläche dar. Dabei wird deutlich, dass Bereiche auf der Rückseite der jeweiligen Flächen (grau markiert) aufgrund der gerichteten Ausbreitung der Strahlen nicht bestrahlt werden. Hingegen gibt es Bereiche, die aufgrund der Superposition der Strahlen eine höhere Intensität erfahren, was in der Abbildung durch die hervorgehobenen Strahlen und Pfeile deutlich wird. Diese höheren Intensitäten entstehen durch die Überlagerung der Strahlen aus den verschiedenen Startpunkten. Somit resultiert die Strahlungsintensität nicht nur aus der Distanz vom Startpunkt zu den bestrahlenden Flächen, sondern auch aus der Überlagerung und Verdeckung der Strahlen. Dies führt zu unterschiedlichen Intensitätsverteilungen, die für die Positionierung der Lichtquellen entscheidend sind. In einem dreidimensionalen Anwendungsbeispiel wird dieses Prinzip auf eine erhöhte Anzahl an Startpunkten angewendet, wodurch eine differenzierte Intensitätsverteilung erzielt wird.

Die Strahlungsintensität wird zur Berechnung des benötigten Leistungsbedarfs der Lampen verwendet. Dabei wird ein Wirkungsgrad von 20 % berücksich-

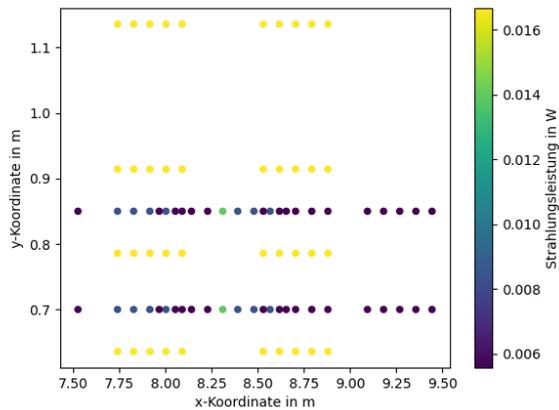
tigt, da gemäß [16] nur 20 % der zugeführten Energie in Licht umgewandelt werden, während der Rest als Wärme abgegeben wird.

In Bild 5 ist die Verteilung der Intersektionen sowie die erforderliche Lampenleistung in der Ebene der Hetrackunterseite dargestellt. Auf der x-Achse ist die Längsachse der Flugzeugkabine abgetragen, wobei die positive y-Achse in Richtung der Kabinenfenster zeigt. Es wurde festgestellt, dass die Intersektionen der Strahlen innerhalb eines begrenzten Bereichs auftreten, wobei sich diese sowohl in den niedrigeren und höheren x-Koordinaten als auch in mehreren definierten Bändern entlang der y-Richtung konzentrieren. Diese Verteilung lässt sich durch die Positionierung der Startpunkte auf den Sitzflächen der beiden Sitzreihen erklären. Insbesondere bei den y-Koordinaten von 0,7 m und 0,85 m treten Intersektionen mit geringer Strahlungsleistung auf. Im Gegensatz dazu weisen die übrigen Intersektionen, die mit einer gelben Intensitätsmarkierung versehen sind, eine Strahlungsleistung auf, die mehr als doppelt so hoch ist. Diese Differenzen können einerseits dadurch erklärt werden, dass die Strahlen bei den genannten Intersektionen längere Distanzen zurücklegen müssen, was eine höhere Strahlungsleistung an der Quelle erfordert, um dieselbe Strahlungs-dosis am Startpunkt zu erreichen. Andererseits ist anzumerken, dass vom gleichen Startpunkt weniger Strahlen die definierte Hetrack-Oberfläche treffen, wodurch die auf den Startpunkten verteilte Strahlungs-dosis auf eine geringere Anzahl von Strahlen konzentriert wird.

Darüber hinaus wurde in der Mitte zwischen den beiden Sitzreihen (bei etwa  $x = 8,3$  m und  $y = 0,7$  m sowie 0,85 m) jeweils eine Intersektion beobachtet, die mit einer Strahlungsleistung von ca. 0,015 W etwa doppelt so hoch ist wie die benachbarten Intersektionen. Diese erhöhte Strahlungsleistung lässt sich durch eine Superposition der Strahlen erklären, bei der mehrere Strahlen an diesem Punkt zusammenwirken, was zu einer höheren Intensität führt, wie bereits zuvor beschrieben.



**BILD 4. Schematische Darstellung der Strahlenintensität und der Superpositionseffekte zwischen zwei Startpunkten**



**BILD 5. Intensitätsverteilung der Strahlungsleistung an den Intersektionspunkten in der Hatrack-Ebene**

#### 4. EFFEKTIVE POSITIONIERUNG DER BLAULICHTQUELLEN ZUR DEKONTAMINATION

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Verteilung der Intersektionen und der entsprechenden Leistungsintensitäten wird in diesem Kapitel zunächst die erforderliche Mindestanzahl an Lampen für die Dekontamination der untersuchten Flächen berechnet. Anschließend wird die Positionierung der Blaulichtquellen optimiert, um eine effiziente Bestrahlung der Flächen zu gewährleisten.

##### 4.1. Lampenanzahl

Einerseits wird angestrebt, eine ausreichende Anzahl von Lampen sicherzustellen, um die Dekontamination der gewünschten Oberflächen zu gewährleisten und andererseits für den Treibstoffverbrauch des Flugzeugs eine möglichst geringe Anzahl an Blaulichtlampen einzuplanen. Zur Bestimmung der Mindestanzahl an Lampen wird deren Gesamtleistung berechnet. Hierzu wird die Summe der benötigten Strahlenleistung auf den zu bestrahlenden Flächen, wie der unteren Hatrack-Oberfläche, anhand der Leistungsintensität an den Intersektionen der Strahlen mit der Hatrack-Oberfläche ermittelt. Diese Gesamtleistung wird dann auf die Leistung jeder einzelnen Lampe verteilt, wobei davon ausgegangen wird, dass alle Blaulichtquellen eine identische Strahlungsleistung aufweisen. So wird die mindestens erforderliche Anzahl an Lampen abgeleitet.

##### 4.2. Optimierung der Lichtquellenpositionierung

Im letzten Schritt wird die Positionierung der Lichtquellen optimiert. Basierend auf den berechneten Leistungsintensitäten unter dem Hatrack und der Mindestanzahl an Lampen wird deren optimale Positionierung ermittelt. Dies erfolgt durch die heuristische Optimierung mittels des Greedy-Algorithmus [17], [18]. Dabei werden die optimalen Lampenpositionen auf Grundlage der Intersektionen der Strahlen mit der bestrahlenden Fläche, was im Anwendungsbeispiel die

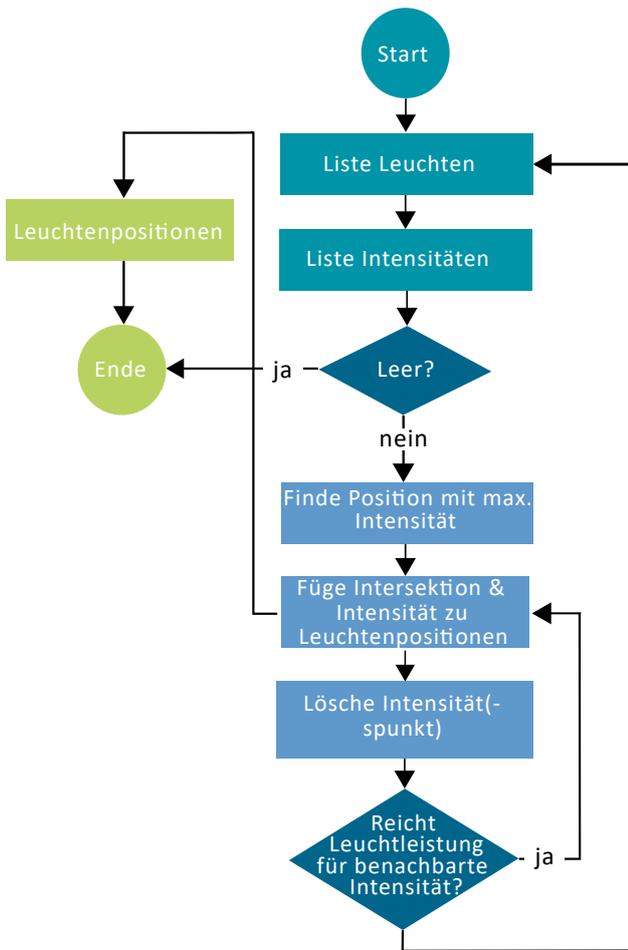
Hatrack-Oberfläche entspricht, und deren Leistungsintensitäten bestimmt.

Der strukturierte Ablauf des implementierten Greedy-Algorithmus ist in dem Flussdiagramm in Bild 6 verdeutlicht. Zunächst wird die Hatrack-Oberfläche als zu optimierender Bereich definiert, und die nötige Anzahl der Lampen wird ermittelt. Daraufhin werden Listen der Leuchten und Leistungsintensitäten befüllt, und im nächsten Schritt wird der Punkt mit der höchsten Intensität auf der Hatrack-Oberfläche ausgewählt, um dort eine Blaulichtlampe zu platzieren. Dieser Schritt basiert auf der Annahme, dass durch die Platzierung der Lampe an der Stelle mit der höchsten Intensität der größte Beitrag zur Dekontamination erfolgt. Sobald die Lampe positioniert wurde, werden benachbarte Intersektionen mit der zugehörigen Intensität überprüft. Diese erhalten jedoch eine geringere Priorität, da die neu platzierte Lampe bereits einen Teil der Beleuchtung für diese Bereiche übernimmt. Dieser Punkt wird dann durch die Platzierung einer Lampe und die Aktualisierung der verbleibenden Optionen aktualisiert. In jedem weiteren Schritt wird ein ähnliches Vorgehen angewendet, wobei die Auswahl der Lampenpositionen auf den verbleibenden, noch nicht optimal beleuchteten Bereichen basiert.

Der gesamte Ablauf folgt einem iterativen Prozess, der so lange fortgesetzt wird, bis alle Blaulichtlampen positioniert sind und alle relevanten Bereiche für die Dekontamination ausreichend beleuchtet wurden. Der Algorithmus zielt darauf ab, die optimale Position der Blaulichtlampen zu ermitteln, indem aus der inversen Strahlungsbetrachtung und den dadurch erhaltenen Intersektionen, an denen die Strahlen idealerweise ausgehen müssten, sowie der jeweiligen Leistungsintensität an diesen Intersektionen eine massen- und strahlungsoptimierte Verteilung der Lampen erreicht wird. Dies maximiert die Beleuchtung in den Bereichen mit dem höchsten Bedarf, sorgt für eine effiziente Nutzung der Ressourcen und liefert abschließend die optimierten Blaulichtlampenpositionen, basierend auf den erforderlichen Strahlungsintensitäten für die Dekontamination der bestrahlten Flächen.

Die optimierten Positionen der Blaulichtlampen für das Anwendungsbeispiel mit den zwei Sitzreihen sind in Bild 7 in Rot dargestellt, wobei die Ansicht von unten auf die Hatrack-Ebene gerichtet ist. Eine dreidimensionale Ansicht der Lampenpositionen ist in Bild 8 zu sehen.

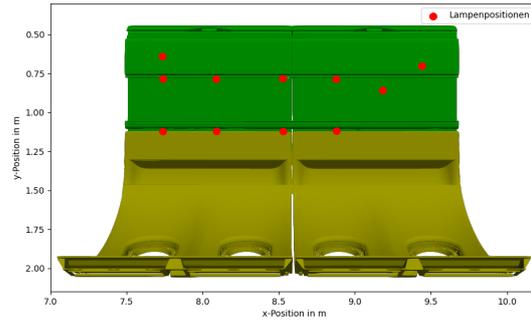
In Bild 7 ist zu erkennen, dass acht Lampen in zwei Bändern im x-Koordinatenbereich von etwa 7,75 m bis ca. 8,9 m positioniert sind. Diese Anordnung stimmt mit der in Bild 5 dargestellten Verteilung der Strahlungsleistung überein. Zudem ist ersichtlich, dass die beiden Lampenreihen jeweils zwischen zwei Reihen von Intersektionspunkten mit hoher Strahlungsleistung angeordnet sind, um diese Bereiche gezielt abzudecken. Auffällig ist auch, dass bei der x-Position von ca. 7,75 m eine zusätzliche Lampe und im Bereich von 9,15 m bis 9,45 m zwei weitere



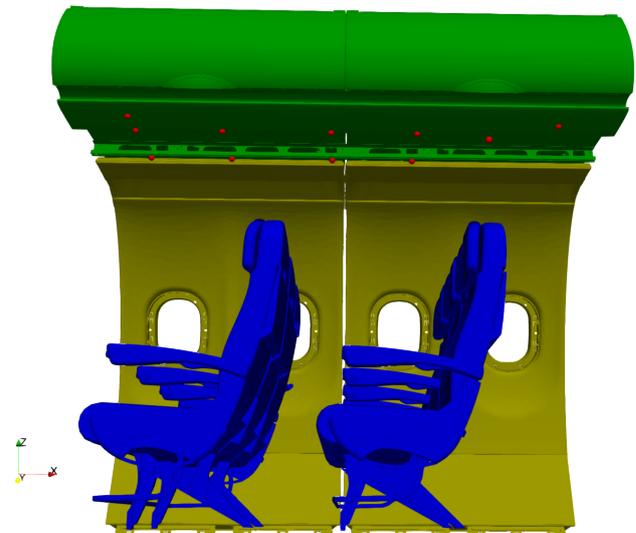
**BILD 6. Flussdiagramm des implementierten Greedy-Algorithmus**

Lampen positioniert sind. Diese Lampen ergänzen die zuvor genannten acht Lampen und decken Bereiche ab, in denen Intersektionspunkte mit geringerer Strahlungsleistung liegen. Diese Beobachtungen verdeutlichen die Vorteile der Optimierung, bei der sowohl die Position der Intersektionen als auch die Intensitätsverteilung berücksichtigt werden.

Es zeigt sich, dass für die Beleuchtung der beiden Sitzreihen insgesamt elf Lampenpositionen erforderlich sind, was eine relativ hohe Anzahl darstellt. Diese Zahl basiert auf der Annahme, dass jede Lampe mit einer einzelnen LED und einer Leistung von 0,1 Watt ausgestattet ist. Es ist jedoch auch möglich, Lampen mit höherer Leistung zu verwenden, um die Anzahl der benötigten Lampen zu reduzieren. In Abbildung 7 ist zu erkennen, dass mehrere Lampen, insbesondere bei der x-Position 7,75 m, in unmittelbarer Nähe zueinander positioniert sind. Dies weist darauf hin, dass eine Reduktion der Lampenzahl möglich sein könnte, sofern die Strahlen die Startpunkte effizient erreichen können. Daher erscheint es sinnvoll, die Lampenleistung in die Optimierungsparameter einzubeziehen, um die Anzahl der Lampen zu minimieren, ohne die Strahlungsintensität zu beeinträchtigen.



**BILD 7. Lampenpositionen (in Rot) in der Hatrack-Ebene, berechnet durch den Optimierungsalgorithmus**



**BILD 8. Durch die Optimierung erhaltene Positionen der Blaulichtlampen, in der dreidimensionalen Ansicht des Anwendungsbeispiels in Rot dargestellt**

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde mit der inversen Strahlungsverfolgung eine Methodik zur optimierten Positionierung von Lichtquellen für eine effektive Dekontamination von Oberflächen in einer Flugzeugkabine durch den Einsatz von blauem Licht entwickelt. Damit wird eine ausreichende Bestrahlung der zu dekontaminierenden Oberflächen gewährleistet und zugleich eine möglichst geringe Masse der blauen Dekontaminationslampen erreicht. Exemplarisch wurde die Methode an einem Bereich der Kabine demonstriert. Der gewählte Bereich diente dazu, die Machbarkeit des Ansatzes und die Grundprinzipien der Berechnungen darzustellen.

In zukünftigen Arbeiten wird diese Methodik auf weitere Bereiche der Flugzeugkabine ausgeweitet, um die Dekontamination in der Flugzeugkabine zu untersuchen und die Vorgehensweise zu verifizieren. Eine Ausweitung des Modells auf größere Bereiche wird dabei auch die Komplexität und Rechenanforderungen erhöhen. Zudem kann durch eine Erhöhung

der Dichte der verwendeten Startpunkte auf den bestrahlten Flächen die Genauigkeit der Ergebnisse weiter verbessert werden. Eine feinere Auflösung der Punkte könnte detailliertere Erkenntnisse über die Strahlungsverteilung und ihre Dekontaminationswirkung auf die verschiedenen Oberflächen liefern.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der in zukünftigen Arbeiten adressiert werden könnte, ist die Integrierbarkeit der Lichtquellen an den im Modell bestimmten Positionen in der Flugzeugkabine. Dies ist ein entscheidender Faktor, um die praktische Umsetzbarkeit der vorgeschlagenen Lösung zu gewährleisten. In einer weiterführenden Untersuchung könnte geprüft werden, wie die Lichtquellen in die bestehenden Systeme und Strukturen der Flugzeugkabine integriert werden können, ohne die Funktionalität oder den Komfort der Kabine zu beeinträchtigen. Hierbei könnten Aspekte wie Stromversorgung, die Platzierung und der Einfluss auf andere Bordelektronik eine Rolle spielen.

Zusammenfassend eröffnet die vorgestellte Methodik neue Möglichkeiten zur effektiven Dekontamination von Flugzeugkabinen. Durch die Systemintegration von blauem Licht könnte ein Dekontaminationsystem in den Flugzeugentwurf eingebunden werden, um die Flugzeuge besser gegen Krankheitserregern zu rüsten und damit einen Beitrag zur Gesundheit sowie zum Wohlbefinden der Passagiere im ganzheitlichen Flugzeugentwurf zu integrieren.

## 6. DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem DLR für die Förderung dieser Forschung im Rahmen der interdisziplinären Graduiertenschule „GANDALF“ zur Erforschung und Bekämpfung von aktuellen und zukünftigen pandemischen Gefahren im DLR Luftfahrt-, Raumfahrt- und Verkehrsbereich. Wir bedanken uns zudem bei Dr.rer.nat. Frank Duschek sowie Björn Prietzel vom DLR-Institut für Technische Physik für die Bereitstellung von Diodenstrahlungsmessdaten, von denen ein Messwert als Grundlage für die Berechnung der Strahlungsintensität genutzt wurde und Franca Arndt sowie Bruno Paveltic vom DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin für den Austausch zur biologischen Effektivität des blauen Lichts.

### Kontaktadresse:

[iman.talai@dlr.de](mailto:iman.talai@dlr.de)

### Literatur

- [1] J. K. Gupta, C-H Lin, and Q. Chen. Inhalation of expiratory droplets in aircraft cabins. *Indoor air*, 21(4):341–350, 2011. DOI: [10.1111/j.1600-0668.2011.00709.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00709.x).
- [2] X. Fu, M. Zhang, Y. Yuan, Y. Chen, Z. Ou, Z. Hashim, J. H. Hashim, X. Zhang, Z. Zhao, D. Norbäck, and Y. Sun. Microbial virulence factors, antimicrobial resistance genes, metabolites, and synthetic chemicals in cabins of commercial aircraft. *Metabolites*, 13(3), 2023. ISSN:2218-1989. DOI: [10.3390/metabo13030343](https://doi.org/10.3390/metabo13030343).
- [3] N. H. L. Leung. Transmissibility and transmission of respiratory viruses. *Nature reviews. Microbiology*, 19(8):528–545, 2021. DOI: [10.1038/s41579-021-00535-6](https://doi.org/10.1038/s41579-021-00535-6).
- [4] N. C. Khanh, P. Q. Thai, H.-L. Quach, N.-A. H. Thi, P. C. Dinh, T. N. Duong, T. Q. Le Mai, N. D. Nghia, T. A. Tu, N. La Quang, T. D. Quang, T.-T. Nguyen, F. Vogt, and D. D. Anh. Transmission of sars-cov 2 during long-haul flight. *Emerging infectious diseases*, 26(11):2617–2624, 2020. DOI: [10.3201/eid2611.203299](https://doi.org/10.3201/eid2611.203299).
- [5] X. Zhang, J. Liu, X. Liu, C. Liu, and Q. Chen. Hepa filters for airliner cabins: State of the art and future development. *Indoor air*, 32(9):e13103, 2022. DOI: [10.1111/ina.13103](https://doi.org/10.1111/ina.13103).
- [6] K. Leder and D. Newman. Respiratory infections during air travel. *Internal medicine journal*, 35(1):50–55, 2005. ISSN:1444-0903. DOI: [10.1111/j.1445-5994.2004.00696.x](https://doi.org/10.1111/j.1445-5994.2004.00696.x).
- [7] M. Dechow, H. Sohn, and J. Steinhanses. Concentrations of selected contaminants in cabin air of airbus aircrafts. *Chemosphere*, 35(1-2):21–31, 1997. ISSN:0045-6535. DOI: [10.1016/S0045-6535\(97\)00135-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)00135-5).
- [8] M. Bagshaw and D. J. Nicolls. Aircraft cabin environment. In *Travel Medicine*, pages 447–461. Elsevier, 2008. ISBN:9780323034531. DOI: [10.1016/B978-0-323-03453-1.10046-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-03453-1.10046-X).
- [9] H. Ueki, M. Ujie, Y. Komori, T. Kato, M. Imai, and Y. Kawaoka. Effectiveness of hepa filters at removing infectious sars-cov-2 from the air. *msphere*, 7(4):e0008622, 2022. DOI: [10.1128/msphere.00086-22](https://doi.org/10.1128/msphere.00086-22).
- [10] G. N. Sze-To, Y. Yang, J. K. C. Kwan, S. C. T. Yu, and C. Y. H. Chao. Effects of surface material, ventilation, and human behavior on indirect contact transmission risk of respiratory infection. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, 34(5):818–830, 2014. DOI: [10.1111/risa.12144](https://doi.org/10.1111/risa.12144).
- [11] A. Lena, M. Marino, M. Manzano, C. Comuzzi, and M. Maifreni. An overview of the application of blue light-emitting diodes as a non-thermic green technology for microbial inactivation in the food sector. *Food Engineering Reviews*, 16(1):59–84, 2024. ISSN:1866-7910. DOI: [10.1007/s12393-023-09355-1](https://doi.org/10.1007/s12393-023-09355-1).
- [12] L. P. Petersson, U.-V. Albrecht, L. Sedlacek, S. Gemein, J. Gebel, and R.-P. Vonberg. Portable uv light as an alternative for decontamination. *American journal*

*of infection control*, 42(12):1334–1336, 2014.  
DOI: [10.1016/j.ajic.2014.08.012](https://doi.org/10.1016/j.ajic.2014.08.012).

- [13] J.-N. Walther, C. Hesse, J. Biedermann, and B. Nagel. Extensible aircraft fuselage model generation for a multidisciplinary, multi-fidelity context, 01.09.2022. <https://elib.dlr.de/189459/>.
- [14] S. J. Dancer. Controlling hospital-acquired infection: focus on the role of the environment and new technologies for decontamination. *Clinical microbiology reviews*, 27(4):665–690, 2014.  
DOI: [10.1128/CMR.00020-14](https://doi.org/10.1128/CMR.00020-14).
- [15] H. D. Young and R. A. Friedman. *Sears and Zemansky's University physics: With modern physics*. Pearson Addison-Wesley, San Francisco, 12. ed., pearson internat. ed. edition, 2008. ISBN: 9780321501301.
- [16] F. Yuan, K. Pan, Y. Guo, and S. Chen. Study on thermal degradation of high power leds during high temperature and electrical aging. In *2013 10th China International Forum on Solid State Lighting (ChinaSSL)*, pages 150–153, 2013. DOI: [10.1109/SSLCHINA.2013.7177336](https://doi.org/10.1109/SSLCHINA.2013.7177336).
- [17] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein. *Introduction to Algorithms*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 2009. ISBN: 978-0-262-03384-8.
- [18] G. Brassard and P. Bratley. *Fundamentals of algorithmics*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1996. ISBN: 978-0133350685.