

1 Einleitung

In nahezu allen Industriebereichen ist der Trend zu sinkenden Entwicklungszeiten zu erkennen. Sie erlauben eine schnellere Reaktion auf veränderte Marktbedingungen und Kundenwünsche sowie die schnellstmögliche Nutzung neuer Technologien. Zudem erfordert auch die Sicherung der Konkurrenzfähigkeit und die Erlangung von Wettbewerbsvorteilen gegenüber Mitbewerbern die stetige Verkürzung von Entwicklungszeiten.

Insbesondere *Simulationsmethoden* ermöglichen es, die Entwicklungszeiten erheblich zu reduzieren. Sie liefern zumeist unter Zuhilfenahme von Digitalrechnern numerische Lösungen derjenigen Gleichungen, die die Eigenschaften des neu zu entwickelnden Systems beschreiben. Dadurch wird eine umfassende Analyse der Systemeigenschaften bereits in frühen Entwicklungsphasen vor der Verfügbarkeit realer Prototypen möglich (*virtual prototyping*). Notwendige Systemmodifikationen aufgrund unzureichender Systemeigenschaften können somit früh erkannt und behoben werden, was zur Reduzierung sowohl der Entwicklungszeiten als auch der -kosten beiträgt. Zudem lassen sich oftmals teure und zeitaufwändige experimentelle Analysen auf ein Mindestmaß reduzieren.



Abbildung 1.1: Kondensatbildung auf der Innenseite der Abschluss-Scheibe eines Kfz-Scheinwerfers

In dieser Arbeit besteht die Aufgabe darin, eine Simulationsmethodik zur Berechnung von *Be- und Enttauvorgängen in Kfz-Scheinwerfern* zu erarbeiten. Als *Be-* bzw. *Enttauerung* wird dabei die Bildung bzw. Rückbildung von Kondensat bezeichnet. *Be-*tauerung ist vor allem in sichtbaren Bereichen des Scheinwerfers unerwünscht. Die Abbildung 1.1 zeigt die typische Kondensatbildung in den Randbereichen der Innenseite der Abschluss-Scheibe eines Kfz-Scheinwerfers. Das Kondensat ist dort in

Gestalt der weißen Bereiche deutlich zu erkennen. Bei aufgetretener Betauung wird eine möglichst schnelle Enttauung gewünscht.

Zur Lösung der Aufgabe ist zunächst die Frage zu beantworten, durch welche Gleichungen die Be- und Enttauvorgänge beschrieben werden und wie diese Gleichungen effektiv numerisch gelöst werden können. Im Anschluss ist zu prüfen, wie gut simulierte (berechnete) und beobachtete (gemessene) Be- und Enttauvorgänge übereinstimmen. Abschließend soll demonstriert werden, wie die Simulationstechnik im Entwicklungsprozess neuer Scheinwerfer angewendet werden kann.

2 Stand der Technik und Ziele der Arbeit

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich der Be- und Enttauung in lichttechnischen Systemen beschrieben. Dazu werden im Abschnitt 2.1 zunächst die Ursachen der Betauung sowie mögliche Gegenmaßnahmen erläutert. Das Be- und Enttauvverhalten konkreter Lichtsysteme wird bislang im Wesentlichen mit Hilfe experimenteller Verfahren bewertet, von denen einige im Abschnitt 2.2 aufgeführt werden. Sowohl die Defizite solcher Verfahren als auch vermehrt auftretende Betauungsprobleme haben dazu geführt, dass theoretische Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt wurden, detaillierte Einblicke in die Betauungsvorgänge zu gewinnen. Solche Kenntnisse lassen sich verwenden, um entweder vorhandene Experimente wirksamer zu gestalten oder neue Analyse-Methoden zu entwickeln (Abschnitt 2.3). Im Abschnitt 2.4 werden schließlich die Ziele der vorliegenden Arbeit definiert, die mit der Entwicklung einer solchen neuen Methode verknüpft sind.

2.1 Be- und Enttauung in lichttechnischen Geräten

Der Begriff *Betauung* beschreibt die *Kondensation* von Wasserdampf an Oberflächen. Ihre Ursachen sind ebenso vielfältig wie die Maßnahmen, die zur Rückbildung des Kondensats – also zur *Enttauung* (*Verdunstung*) – ergriffen werden. Solche Be- und Enttauvvorgänge sind schon lange gegenwärtig. Ihre Problematik hat sich jedoch insbesondere durch die lichttechnischen Entwicklungen in den vergangenen Jahren verschärft.

Das Betauungsproblem tritt gleichermaßen in Scheinwerfern und Leuchten auf. Gegenstand dieser Arbeit ist jedoch ausschließlich die Betauungsproblematik in Kfz-Scheinwerfern.

2.1.1 Historische Entwicklung der automobilen Lichttechnik

Bis in die 80er Jahre hinein wurden in der automobilen Lichttechnik einfache *Paraboloidreflektoren* und so genannte *Streuscheiben* verwendet. Das Licht des Leuchtmittels wurde durch Reflexion am parabolischen Reflektor zunächst in ein paralleles Lichtbündel umgewandelt. Anschließend erfolgte an den Streuscheiben (Abbildung 2.1 a) durch Brechung des Lichts dessen Projektion auf die Straße. Durch die Entwicklung von *Projektionsmodulen* und *Freiformreflektoren* hat sich dies grundsätzlich geändert. Durch sie wird der Einsatz von optischen Elementen in der *Abschluss-Scheibe* überflüssig, da das Licht von ihnen bereits den gesetzlichen Vorschriften entsprechend auf die Straße projiziert wird. Die Abbildung 2.1 b zeigt ein solches Scheinwerfer-System.

Die neuen „optikfreien“ Abschluss-Scheiben erlauben einen ungehinderten Blick in das Innere der Lichtsysteme. Dadurch wurde es möglich, die Lichtsysteme wesentlich ansprechender zu gestalten und sie zu einem natürlichen Blickfang bei der Betrachtung von Fahrzeugen zu machen [HER03]. Ein makelloses Erscheinungsbild ist daher unter allen Betriebs- und Umgebungsbedingungen zu gewährleisten. Gerade dieses wird jedoch u.a. durch

- die Deformation oder Verfärbung eingesetzter Kunststoffmaterialien aufgrund unzulässig hoher Temperaturen,
- den Schmutzeintrag in den Scheinwerfer und die Ablagerung von Partikeln in sichtbaren Bereichen sowie
- eine länger anhaltende sichtbare Betauung

beeinträchtigt. Die Vermeidung solcher sichtbarer Mängel ist mittlerweile ebenso zum festen Bestandteil des Entwicklungsprozesses neuer Lichtsysteme geworden wie die Sicherstellung der geforderten Funktionalität.

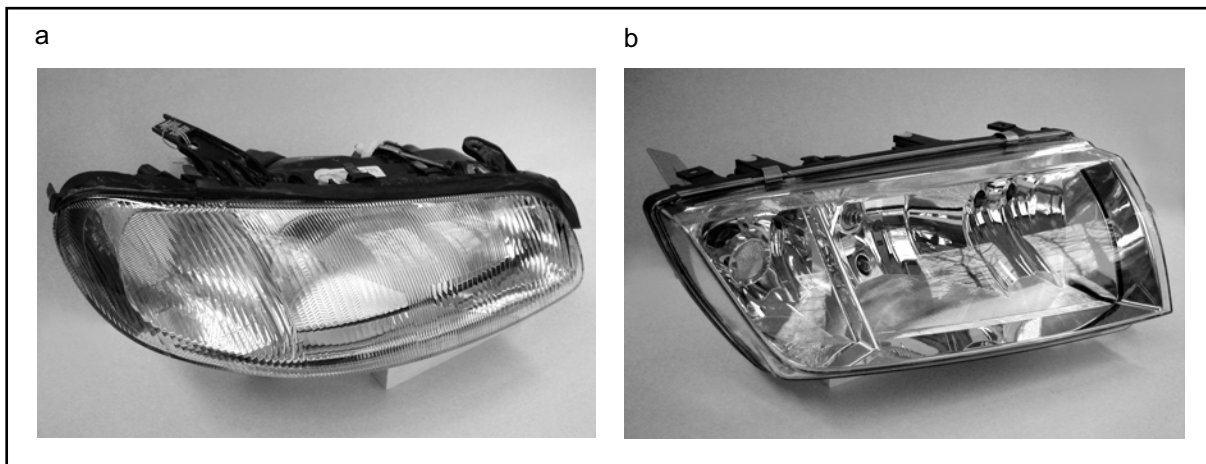


Abbildung 2.1: Scheinwerfer mit herkömmlicher Streuscheibe (a) und optikfreier Abschluss-Scheibe (b)

2.1.2 Ursachen der Betauung

Der Ausgangspunkt einer Betauung ist stets die Anwesenheit von Feuchtigkeit innerhalb des Lichtsystems. Diese kann eindringen, da Scheinwerfer offene Systeme darstellen und mit ihrer Umgebung neben Wärme auch Luft und darin enthaltene Feuchtigkeit austauschen. Ein geschlossenes System ist kostenineffizient und nur unter hohem technischen Aufwand herzustellen [BIE04]. Weiterhin bestehen die einzelnen Komponenten der Scheinwerfer wie Gehäuse, Reflektoren und Abschluss-Scheiben mittlerweile fast ausschließlich aus Kunststoffen. Dies ermöglicht zwar die Einsparung von Gewicht und ein flexibleres Design, andererseits haben die Kunststoffe

auch die Fähigkeit, Wasserdampf sowohl zu speichern als auch hindurchdiffundieren zu lassen. Alles in allem lässt sich der Eintrag von Feuchtigkeit also nicht vermeiden.

Aus diesem Grund werden Lichtsysteme bewusst als offene Systeme konzipiert, indem spezielle Mechanismen zum Feuchteausaustausch integriert werden. So werden Scheinwerfer in der Regel mit *Belüftungsöffnungen* in ihrem Gehäuse versehen, die einen Stoffaustausch mit dem Motorraum ermöglichen. Durch solche Mechanismen wird sowohl der Abtransport als auch der Eintrag von Feuchtigkeit vereinfacht. Da letzterer nach obigen Ausführungen ohnehin nicht zu verhindern ist, überwiegt der Nutzen dieser Maßnahme deutlich ihre Nachteile.

Betaugung findet statt, wenn der im System enthaltene Wasserdampf unter die so genannte *Taupunkttemperatur* abgekühlt wird, die im Abschnitt 3.2.1 definiert wird. An dieser Stelle sei lediglich vorweg genommen, dass die Taupunkttemperatur mit der Höhe des Wasserdampfanteils in der Luft steigt. Daraus folgt, dass insbesondere die Größen *Feuchtigkeit* und *Temperatur* für das Betaugungsverhalten der Lichtsysteme verantwortlich sind [FUK01].

In Scheinwerfern werden diese beiden Größen durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Beispielsweise führt ein laufender Motor zur Aufheizung der Scheinwerfer, und durch Beaufschlagung warmer Motorkomponenten mit Wasser, z.B. Regen, kann sich durch Dampfbildung ein äußerst warmes und feuchtes Motorraumklima einstellen. Je nach Betriebszustand des Scheinwerfers und der Bewegung des Fahrzeugs bilden sich im Scheinwerfer wie im Motorraum unterschiedliche Strömungen aus. Durch Umgebungseinflüsse (Sonneneinstrahlung, Außenströmung, Niederschlag) werden insbesondere die Temperaturen beeinflusst. Auch kann das Diffusions- und Speicherverhalten der Kunststoffe hinsichtlich des Wasserdampfes je nach Art der eingesetzten Kunststoffe und deren Temperatur beachtlich variieren [BIE04]. Dieses komplexe Beziehungsgeflecht ist schematisch in der Abbildung 2.2 dargestellt.

Ebenso zahlreich wie die Einflussfaktoren bezüglich Feuchtigkeit und Temperatur sind die Situationen, in denen Betaugung auftreten kann. Ein feuchtes Motorraumklima, wie es nach Niederschlägen oder bei der Wagenwäsche auftritt, führt in der Regel zu einem Anstieg der Luftfeuchte im betriebswarmen Scheinwerfer. Nach dem Ausschalten sinkt dann die Temperatur im Scheinwerfer, und es kann zu einer Unterschreitung des Taupunktes kommen [FUK01]. Ebenso kann das Abstellen des Fahrzeugs über Wasseransammlungen am Boden Betaugung hervorrufen, da feuchte Luft aufsteigen und durch die Belüftungsöffnungen in den Scheinwerfer gelangen kann. Letztlich kann selbst das reine Einschalten der Lichtsysteme dazu führen, dass in den Kunststoffen gebundene Feuchtigkeit freigesetzt wird und an kalten Stellen – vornehmlich den Abschluss-Scheiben – kondensiert [BIE04].

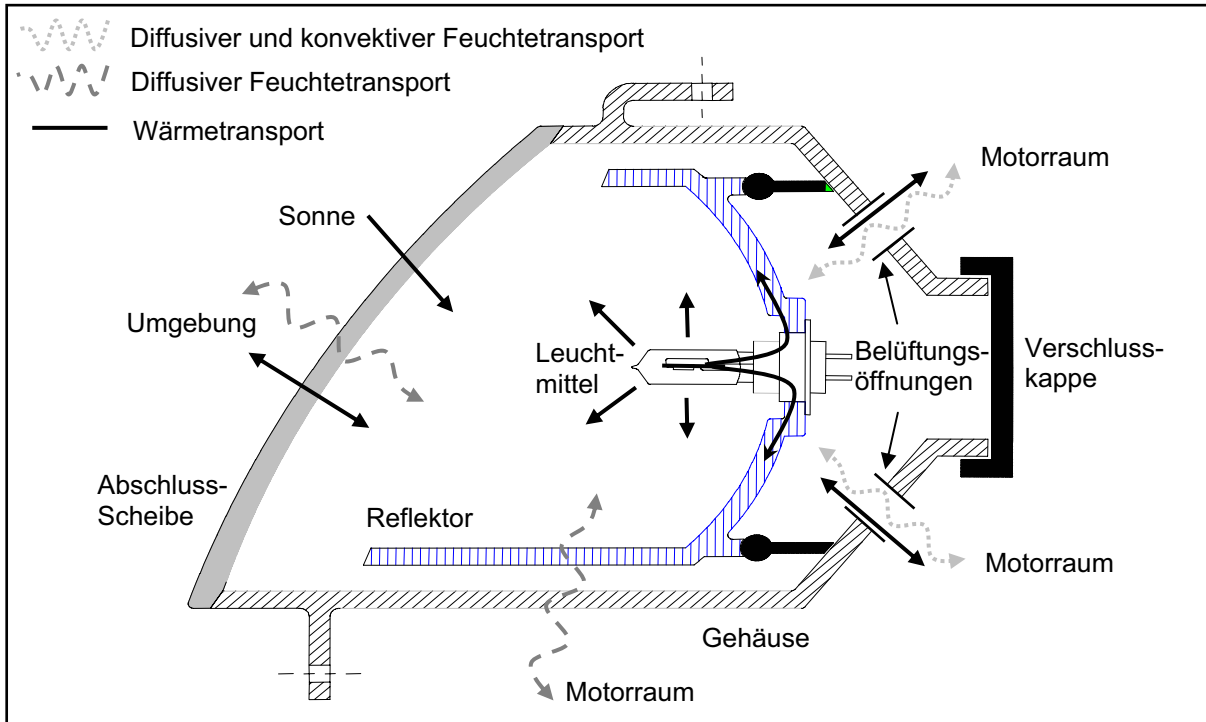


Abbildung 2.2: Beeinflussung der Temperaturen und Feuchtigkeiten im Scheinwerfer

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Betauung stets das Resultat von Klimaänderungen im Scheinwerfer ist. Nur die Beeinflussung dieses Klimas durch geeignete Maßnahmen (*Klima-Management*) kann daher die Betauung reduzieren bzw. die Enttauung beschleunigen. Solche Maßnahmen werden im folgenden Abschnitt behandelt.

2.1.3 Maßnahmen zum Klima-Management in Scheinwerfern

Die Möglichkeiten zur Reduktion der Betauung bzw. zur Beschleunigung der Enttauung sind zahlreich. Im Folgenden können daher nur einige der bekannten Maßnahmen kurz erläutert werden.

Passive Scheinwerferdurchlüftung mit Hilfe von Belüftungsöffnungen

Wie bereits oben erwähnt wurde, kann die Enttauung beschleunigt werden, indem das Scheinwerfergehäuse mit Belüftungsöffnungen zum Motorraum versehen und dadurch der Abtransport von Feuchtigkeit vereinfacht wird. Ein solcher Stoffaustausch stellt sich in der Regel dann ein, wenn zwischen den Öffnungen eine Druckdifferenz herrscht [Moo01]. Eine solche kann durch die Fahrzeugbewegung und daraus resultierende Motorraumströmungen oder auch durch temperaturbedingte Strömungen innerhalb des Motorraums oder des Scheinwerfers hervorgerufen werden.

In beiden Fällen ist die Ursache des Stoffaustausches und damit auch der Zeitpunkt der Klimaänderung im Scheinwerfer nicht kontrollierbar. Erschwerend kommt hinzu,

dass sowohl die an das Motorraumklima gekoppelten Eigenschaften als auch die Menge des ausgetauschten Stoffes nicht beeinflussbar sind. In ungünstigen Fällen kann das Motorraumklima feucht-warm sein und zudem noch Partikeln enthalten, deren Ablagerung im Scheinwerfer nach Abschnitt 2.1.1 unerwünscht ist. Weiterhin wird die Menge des ausgetauschten Stoffes beispielsweise durch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs sowie die Positionen und die Geometrien der Belüftungsöffnungen beeinflusst.

Um den Schmutzeintrag in den Scheinwerfer zu begrenzen, werden Belüftungsöffnungen in der Regel mit *Labyrinthen* oder luftdurchlässigen *Membranen* versehen, die ihrerseits allerdings auch wieder den Stoffaustausch und damit den Abtransport von Feuchtigkeit beeinträchtigen. Weiterhin muss sichergestellt werden, dass durch die Belüftungsöffnungen kein Spritzwasser in den Scheinwerfer eindringt. Auch hierzu finden Membranen oder abgewinkelte Gummikanäle, so genannte *Tüllen*, Verwendung, die auf die Belüftungsöffnungen gesteckt werden. Auch diese behindern wieder den Feuchte Austausch mit der Umgebung. Es ist daher stets ein Kompromiss zwischen der Begrenzung des Schmutz- und Spritzwassereintrags und der Förderung des Feuchte Austausches zu finden.

Trotz all dieser Nachteile ist die passive Belüftung eine sehr verbreitete Enttautungsmaßnahme. Grund dafür ist, dass sie keine Energie benötigt sowie kostengünstig und wartungsfrei ist. Zudem kann sie – anders als aktive Maßnahmen – auch während der Parkphase eines Fahrzeugs ohne Energiezufuhr wirksam sein. Dieser Vorteil ist von besonderer Bedeutung, da solche Parkphasen häufig die längste Erholungsphase nach starker Beaufschlagung mit Feuchtigkeit darstellen.

Aktive Scheinwerferbelüftung

Um insbesondere den Zeitpunkt der Klimabeeinflussung bestimmen zu können, kann von einer passiven zu einer aktiven Belüftung bei möglichst gleichzeitiger Kontrolle des ausgetauschten Stoffes gewechselt werden. Dazu bietet sich die Kopplung des Scheinwerfers über Schläuche mit der Klimaanlage oder dem Luftkanal für das Fahr- gastraumklima an, wodurch dem Scheinwerfer vergleichsweise trockene Luft zugeführt werden kann. Eine zusätzliche Filterung der Luft kann zudem den Eintrag von Schmutz verhindern oder zumindest begrenzen. Ein solcher gezielter Eingriff erfordert allerdings aktive Elemente wie beispielsweise Lüfter, die den Stoffaustausch bewirken. Dadurch entstehen Kosten für die Realisierung einer solchen Maßnahme, und zu ihrem Einsatz wird Energie benötigt. Dadurch ist insbesondere das Ausnutzen der oben genannten Parksituation zumindest nicht energiefrei möglich.

Feuchtigkeitskontrolle durch Trocknungselemente im Inneren der Scheinwerfer

Um die im Scheinwerfer vorhandene Luft zu trocknen und damit das Risiko von länger anhaltender Betauung zu reduzieren, können Trocknungselemente eingesetzt werden.

Als *passive* Trocknungselemente können *Trocknungsgele* verwendet werden. Sie binden den in der Luft enthaltenen Wasserdampf und reduzieren so die Taupunkttemperatur. Wenngleich solche Gele relativ günstig sind, besteht die Notwendigkeit des Austauschs, wenn sie ihre Aufnahmekapazität erreicht haben.

Aktive Trocknungselemente sind die so genannten *Kältefallen* oder *Peltier-Elemente*. Diese Kühlelemente basieren auf der lokalen Unterschreitung der Taupunkttemperatur, indem sie unter Energieaufwand niedrige Temperaturen erzeugen. Durch sie wird an nicht sichtbaren und damit unkritischen Stellen im Scheinwerfer Kondensation erzwungen und somit der Wasserdampfgehalt im gesamten Scheinwerfer gesenkt. Das gebildete Kondensat sollte allerdings aus dem Scheinwerfer abgeführt werden, da ansonsten nach Abschalten der Elemente das Wasser wieder verdampft und der Feuchtigkeitsanteil in der Luft schnell wieder ansteigt.

Sowohl passive als auch aktive Trocknungselemente weisen nur eine geringe Effizienz auf. Grund hierfür ist, dass sie den ständigen Transport von Wasserdampf in den Bereich der Trocknungselemente erfordern. Dieser findet oftmals nur in Form von *Diffusionsvorgängen* statt, die recht langsam verlaufen. Eine ausführliche mathematische Behandlung solcher Diffusionsvorgänge erfolgt im Abschnitt 3.1.1.

Bewertung der klimabeeinflussenden Maßnahmen

Die oben genannten aktiven Maßnahmen zum Klima-Management bieten generell bessere Kontrollmöglichkeiten als die passiven. So können sie insbesondere zu solchen Zeitpunkten aktiviert werden, in denen ein Eingriff auch notwendig ist. Allerdings ist dies in der Regel mit hohen Kosten und Energiebedarf verbunden. Passive Maßnahmen sind im Vergleich dazu oftmals weitaus kostengünstiger.

Der Kostenaspekt führt dazu, dass zumeist passive Strategien integriert werden, wenngleich sie weniger wirksam sind. Dennoch reichen solche passiven Lösungen oftmals aus, um länger anhaltende sichtbare Betauungen zu vermeiden. Zudem liefern auch aktive Maßnahmen nicht immer bessere Lösungen. Dies lässt sich nach Abschnitt 2.1.2 vor allem durch die Vielzahl der Situationen begründen, in denen Betauung auftreten kann.

2.2 Experimentelle Qualitätssicherung

Um das Be- und Enttaunungsverhalten lichttechnischer Geräte beurteilen zu können, werden diese am Ende ihres Entwicklungsprozesses unterschiedlichen experimentellen Analysen unterzogen. Dabei handelt es sich entweder um *Laborversuche*, in denen das System für sich betrachtet wird und die im Folgenden als *Stand-alone-Laborversuche* bezeichnet werden, oder um Experimente, in denen das Gerät bereits im Fahrzeug integriert ist (*Fahrversuche*).

2.2.1 Stand-alone-Laborversuche

In den Stand-alone-Laborversuchen wird das lichttechnische Gerät definierten Bedingungen ausgesetzt, um dessen Be- und Enttaunungsverhalten zu untersuchen. Oftmals handelt es sich dabei um ein zweistufiges Verfahren, indem zunächst durch geeignete Wahl der Versuchsbedingungen eine Betauung erzeugt und anschließend unter geänderten Bedingungen der Enttaunungsablauf dokumentiert wird.

Für solche Versuche existieren zahlreiche Prüfvorschriften. Neben den internationalen Prüfstandards der *Society of Automotive Engineers* oder *Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS)* kommen sowohl hersteller- als auch kundenspezifische Tests zum Einsatz. Im Folgenden wird lediglich der FMVSS-Test skizziert, um die generelle Struktur solcher Laborversuche zu verdeutlichen.

Die FMVSS-Prüfvorschrift 108 (allgemeine Bezeichnung: 49 CFR 571.108) beinhaltet unterschiedliche Anweisungen zur Durchführung von Tests an lichttechnischen und reflektierenden Geräten sowie zugehörigen Komponenten. Der Abschnitt S8.7 enthält eine Beschreibung zur Prüfung des Be- und Enttaunungsverhaltens solcher Geräte, die sich in zwei Phasen unterteilen lässt und folgende Anweisungen beinhaltet:

In Phase 1 wird das Gerät in seiner konstruktionsmäßig vorgesehenen Betriebsposition montiert. Dazu ist es an Stangen zu befestigen, die sich hinter dem Gerät befinden und einen vorgeschriebenen Mindestabstand zu diesem aufweisen. Im Anschluss erfolgen 24 gleiche Testzyklen mit einer Dauer von jeweils drei Stunden. Dabei wird der Scheinwerfer zunächst eine Stunde lang mit der höchsten Kombination von Leuchtkörperleistungen unter Zufuhr der Normleistung betrieben und anschließend für die Dauer von zwei Stunden ausgeschaltet. Dabei befindet er sich ständig in einem Umgebungsklima mit vorgeschriebener hoher Temperatur und Feuchte, wodurch auch die Feuchtigkeit im Scheinwerfer ansteigt und es insbesondere während der Ausschaltphasen zu Betauung kommen kann.

Unmittelbar an Phase 1 schließt sich Phase 2 an, in der das Gerät in einer Luftstromprüfkammer wiederum in Betriebsposition positioniert wird. Dort wird es frontal