Untersuchungen an explosionsgeschützten Leuchten

Themenbroschüre Nr. ooo8

SAMCON
Prozessleittechnik GmbH

Titel:	Untersuchungen an ex-geschützten Leuchten
Doc.-Id.	210813-PT20BAU-SS-Untersuchungen an ex.-geschützten Leuchten_rev.01.docx
Verfasser:	Dipl. – Ing. Steffen Seibert
Erstelldatum:	13.08.2021
URL:	www.samcon.eu

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4

2 Explosionsschutztechnische Parameter 4

3 Status Quo der 60079er Normenreihe 5

3.1 Allgemeine Anforderungen: IEC 60079-0:2017 5

3.2 Optische Strahlung: IEC 60079-28:2015/2019 6

3.3 Status Quo der Normenlage 6

4 Sind Ex-Scheinwerfer sicher? 7

4.1 Potentielle Zündquellen 7

4.2 Der schwarze Absorber 7

4.3 Wirkungsgrade von Leuchtmitteln 9

4.4 Überlegungen zu Ex-Halogenstrahlern 10

4.5 Überlegungen zu Ex-LED Scheinwerfern 10

4.5.1 Multi LED Arrays 11

4.5.2 Cold Spots 11

4.5.3 Hot-Spots der Gruppe 1 12

4.5.4 Hot-Spots der Gruppe 2 12

4.5.5 Korrelation der Hot-Spots zur Umgebungstemperatur 12

4.6 Weitere Überlegungen zum schwarzen Absorber 13

4.6.1 Die Absorptionsfläche 14

4.6.2 Potentielle Absorptionsflächen in der Praxis 16

5 Messreihen 17

5.1 Halogenscheinwerfer Hersteller_1 Leuchte_1 18

5.1.1 Hot-Spot Messungen am schwarzen Absorber 21

5.1.2 Unzulässiger Temperaturbereich 21

5.1.3 Hot Spots 22

5.1.4 Versuchsergebnis 23

5.2 LED Scheinwerfer Hersteller_2 Leuchte_2 23

5.2.1 Hot-Spot Messungen am schwarzen Absorber 24

5.2.2 Unzulässiger Temperaturbereich 25

5.2.3 Hot Spots 25

5.2.4 Versuchsergebnis 26

6 Fazit 27

Abbildungsverzeichnis

Bild 4-1: Leistungsverlauf und schwarzer Absorber 8
Tab 4-1: Wirkungsgrade von Leuchtmitteln 9
Bild 4-2: Leistungsverlauf an LED Scheinwerfern 10
Bild 4-3: Theoretische Positionen von „Hot-Spots“ und „Cold-Spots“ 12
Bild 4-4: PT100-Flächen in Luft 13
Bild 4-5: Versuchsabsorber mit verschiedenen Flächen 14
Bild 4-6: Schwarzer Absorber im Lichtstrahl 15
Tab 4-2: Schwarzer Absorber unterschiedlicher Flächen 15
Bild 4-7: Schwarzer Absorber unterschiedlicher Flächen 15
Bild 4-8: Staubablagerungen 16
Bild 5-1: Der schwarze Absorber 17
Bild 5-2: Schematischer Versuchsaufbau 17
Bild 5-3: Messungen an Hersteller_1 Leuchte_1dH 18
Bild 5-4: Schwarzer Absorber 19
Bild 5-5: Messung bei T_{amb}=20,5°C 19
Bild 5-6: Verbrannter „schwarzer Körper“ 20
Bild 5-7: Weiterer Messaufbau 20
Tab. 5-1: Hot-Spots am schwarzen Absorber Leuchte_1 21
Bild 5-8: T/s - Diagramm schwarzen Absorber Leuchte_1 21
Bild 5-9: Langsame Abkühlung am schwarzen Absorber bei Halogenleuchten 22
Bild 5-10: Messungen am Hersteller_2, Leuchte_2 23
Tab. 5-2: Hot-Spots am schwarzen Absorber LEUCHTE_2 24
Bild 5-11: T/s - Diagramm schwarzen Absorber LEUCHTE_2 24
Bild 5-12: Messung in 2 mm Abstand 25

1 Einleitung

Im Rahmen einer Marktrecherche über explosionsgeschützte LED Leuchten wurde festgestellt, dass unterschiedliche Hersteller, sowohl im ATEX Raum, als auch im Rahmen des IECEx Schematas, unterschiedliche Normen für deren Produkte anwenden. Dies ist zunächst keine Besonderheit, da die Explosionssicherheit mit Hilfe unterschiedlicher Schutzsysteme, deren Grundlagen die jeweiligen Normen sind, erreicht werden kann. Auffällig ist jedoch die Verwendung der „IEC/EN/DIN 60079-28: Schutz von Geräten und Übertragungssystemen, die mit optischer Strahlung arbeiten“, im weiteren Verlauf 60079-28 abgekürzt. Manche Hersteller wenden diese Norm für LED-Leuchten an, andere Hersteller hingegen nicht.

Die vorliegende Ausarbeitung geht der Frage nach, warum dies so ist. Das Anwenden bzw. das Nicht-Anwenden der 60079-28 führt offensichtlich zu unterschiedlichen Gerätestandards, was wiederum folgende Fragen aufwirft:

1. Warum wenden einige Hersteller die 60079-28 an und andere nicht?
2. Wie unterscheiden sich Ex-LED Scheinwerfer von z.B. Ex-Halogenscheinwerfern?
3. Sind Ex- Scheinwerfer, die nicht nach den Kriterien der 60079-28 bewertet wurden, sicher?

Um die erste Frage zu beantworten ist eine detaillierte Normenrecherche nötig, welcher wir in Kapitel 3 dieser Ausarbeitung nachgehen.
Die zweite sowie die dritte Frage fordert eine technische Untersuchung der auf dem Markt befindlichen Geräte. Einen ersten Versuch einer solchen Untersuchung wagen wir ab Kapitel 5.

2 Explosionsschutztechnische Parameter

Es wurden Geräte für folgende Einsatzparameter analysiert:

ATEX Gerätegruppe: IID und IIG
ATEX Kategorie:2
Geräteschutzniveau: Gb und Db
Temperaturklasse: T4 bis T6

3 Status Quo der 60079er Normenreihe

3.1 Allgemeine Anforderungen: IEC 60079-0:2017

In der Norm „Explosionsgefährdete Bereiche - Teil 0: Betriebsmittel - Allgemeine Anforderungen (IEC 60079-0:2017); Deutsche Fassung EN IEC 60079-0:2018“ steht in Kapitel „6.6.4 Laser, Leuchten und andere nichtdivergente Dauerlichtquellen“ folgender Satz:

> „Die Anforderungen für Laser, Leuchten und andere nichtdivergente Dauerlichtquellen wie LED-Leuchten, Taschenlampen und optische Lichtwellenleiterüberträger/-empfänger sind in IEC 60079-28 beschrieben.“

Auf diesen Satz beziehen sich sämtliche Firmen, welche die 60079-28 nicht anwenden. Logisch invertiert lautet die Aussage in der Norm:

> Anforderungen für … divergente Dauerlichtquellen sind nicht in der 60079-28 beschrieben.

So antworten Hersteller auf unsere diesbezügliche Anfrage:

> „…Our illuminator is not compliant with 60079-28 because this type of product does not fall under this certification. Let me explain: The 60079-28 is applied to converging light sources where the light is focused on a single point included in the classified area. In our illuminator, the EN/IEC/UL 60079-28 standard is not applied as the light beam of our spotlight is considered divergent…“

Der Argumentation folgend wird 60079-28 also für divergentes Licht nicht angewendet, was wiederum in direkter Konsequenz heißt, dass die emittierte Lichtleistung solcher Leuchten gar nicht bewertet wird. Die Zulassungsstellen der benannten Firmen sind dieser Logik gefolgt. Ob das technisch sinnvoll ist, wird in den weiteren Kapiteln dieser Ausarbeitung evaluiert.

Weiter behandelt das Kapitel „26.5 Thermische Prüfungen“ der IEC/EN/DIN 60079-0. Norm keine Vorschrift, welche eine Untersuchung der thermischen Erwärmung eines „schwarzen Absorbers“ im Lichtstrahl explosionsgeschützter Leuchten fordert.

In der DIN EN IEC 60598-1 „Leuchten - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen“ ist in Kapitel 12.4 Prüfung der Erwärmung (normaler Betrieb) folgendes beschrieben:

> „…Im normalen Betrieb dürfen weder ein Teil der Leuchte (einschließlich der Lampe) noch die Anschlussleitungen innerhalb der Leuchte oder die Befestigungsfläche eine Temperatur annehmen, die die Sicherheit beeinträchtigen würde. Außerdem dürfen Teile, die dazu bestimmt sind, von Hand berührt, angefasst, eingestellt oder umfasst zu werden, wenn die Leuchte auf Betriebstemperatur ist, für diesen Zweck nicht zu heiß werden.

> Leuchten dürfen beleuchtete Gegenstände nicht unzulässig erwärmen…“

Leider wird in der DIN EN IEC 60079-0 nicht auf die IEC EN DIN 60598 referenziert. Dies, sowie eine Konkretisierung des Begriffes „unzulässig“, wären jedoch nötig, um der Explosionsgefahr des „heißen schwarzen Absorbers“ zu begegnen.

3.2 Optische Strahlung: IEC 60079-28:2015/2019

Die Norm: „Explosionsgefährdete Bereiche - Teil 28: Schutz von Geräten und Übertragungssystemen, die mit optischer Strahlung arbeiten, (IEC 60079-28:2015); Deutsche Fassung EN 60079-28:2015“ kommt in Kapitel 1: „Anwendungsbereich“ zu folgender Festlegung:

> „… Kontinuierliche divergente LED-Lichtquellen … sind wegen der Unsicherheit möglicher Zündbedenken hinsichtlich hoher Bestrahlungsstärke nicht von der Anwendung der Norm (60079-28) ausgenommen….“

Hier wird also eine Bewertung von LED Scheinwerfern gefordert. Aufgrund dieses Widerspruches hat das IECEx Gremium im Jahr 2019 ein entsprechendes Interpretationspapier veröffentlicht.

Im Dokument: „EXPLOSIVE ATMOSPHERES – Part 28: Protection of equipment and transmission systems using optical radiation, INTERPRETATION SHEET 1“ wird folgender Frage nachgegangen:

> „…When should the requirements of IEC 60079-28 be applied to Ex Equipment, including Equipment assemblies and Ex Components that include an optical radiation source based on Subclause 6.6.4 “Lasers, luminaries, and other non-divergent continuous wave optical sources” in IEC 60079-0:2017 (Edition 7)?...“

Die Antwort darauf, gibt ganz eindeutig den Nicht-Anwendern Recht:

> „…This standard does not apply to:
> …2) divergent light sources or beams, where light is not focussed within the hazardous area…“

3.3 Status Quo der Normenlage

Stand heute ist eine Analyse der Temperatur eines schwarzen Absorbers im Lichtstrahl in die Messung und Bewertung der maximalen Oberflächentemperatur des Gerätes nicht gefordert.

Stand heute muss nach Normenlage die Lichtleistung einer Ex Leuchte nicht hinsichtlich einer potentiellen Explosionsgefahr bewertet werden.

4 Sind Ex-Scheinwerfer sicher?

Licht transportiert Leistung. Hochleistungslaser machen diese sehr deutlich. In der modernen Metallverarbeitung werden beispielsweise Laser verwendet um Stahl zu schneiden. Hierbei werden Temperaturen erreicht, welche jenseits der Zündtemperaturen von Gasen liegen und es wird sofort klar, dass ein solcher „Laserschnitt“ im Ex-Bereich eine Zündgefahr darstellt.
Weiter ist leicht zu erkennen, dass eine kleine Status-LED nicht genug Lichtleistung emittiert, um im Ex-Bereich eine Zündquelle zu generieren.

Ein Ex- Scheinwerfer ist weder ein Hochleistungslaser, noch eine kleine Status-LED. Er rangiert hinsichtlich seiner Lichtleistung sowie seines Abstrahlwinkels irgendwo zwischen diesen beiden Extremen und es ergeben sich die folgenden Fragen:

1. Wann ist die Lichtleistung eines Ex-Scheinwerfers noch sicher?
2. Wann wird diese Lichtleistung zu einer Gefahr?

4.1 Potentielle Zündquellen

Für Licht im Wellenlängenspektrum von 380nm bis 10µm definiert die IEC 60079-28 folgende Zündmechanismen in Kapitel 1 „Anwendungsbereich“:

1. „Die optische Strahlung wird von Oberflächen oder Partikeln absorbiert, welche sich dadurch erwärmen und unter bestimmten Umständen eine Temperatur annehmen können, die eine umgebende explosionsfähige Atmosphäre zünden kann.“

2. „In seltenen Spezialfällen können der direkte laserinduzierte Durchschlag eines Gases im Brennpunkt eines starken Strahles und Erzeugung von Plasma oder einer Stoßwelle möglicherweise als Zündquelle wirken. Diese Prozesse können durch einen Feststoff begünstigt werden, der sich in der Nähe des Durchschlagpunktes befindet.“

Die vorliegende Ausarbeitung untersucht lediglich den ersten Punkt. Plasmazündungen können aufgrund mangelnder Laboreinrichtungen nicht untersucht werden.

4.2 Der schwarze Absorber

Der oben beschriebene Zündmechanismus des „heißen schwarzen Absorbers“ geht von folgendem Szenario aus:
Ein Ex-Scheinwerfer wird mit elektrischer Leistung ($P_{el.}$) versorgt. Je nach verwendetem Leuchtmittel und dessen Wirkungsgrad (η) wird ein Teil der eingespeisten Leistung in Wärme umgesetzt. Diese Leistung nennt man Verlustleistung ($P_{v.}$), die verbleibende Leistung wird in Licht umgewandelt ($P_{opt.}$). In unserem Szenario trifft diese optische Leistung ($P_{opt.}$) in der Entfernung (s) zur Austrittsfläche am Strahler auf den schwarzen Absorber. Durch die Absorption wärmt sich der schwarze Absorber auf und emittiert diese Leistung

wiederum in Wärme ($P_{SA.}$). *Per definitionem* hat der schwarze Absorber einen Absorptionsgrad von 100%. Somit wird sämtliche Lichtleistung ($P_{opt.}$) in Wärme umgewandelt. In unserer ersten Annäherung definieren wir also: $P_{opt.} = P_{SA.}$ In die Praxis übertragen käme dies einer dunklen Staubschicht in der Nähe der lichtdurchlässigen Fläche des Scheinwerfers gleich.

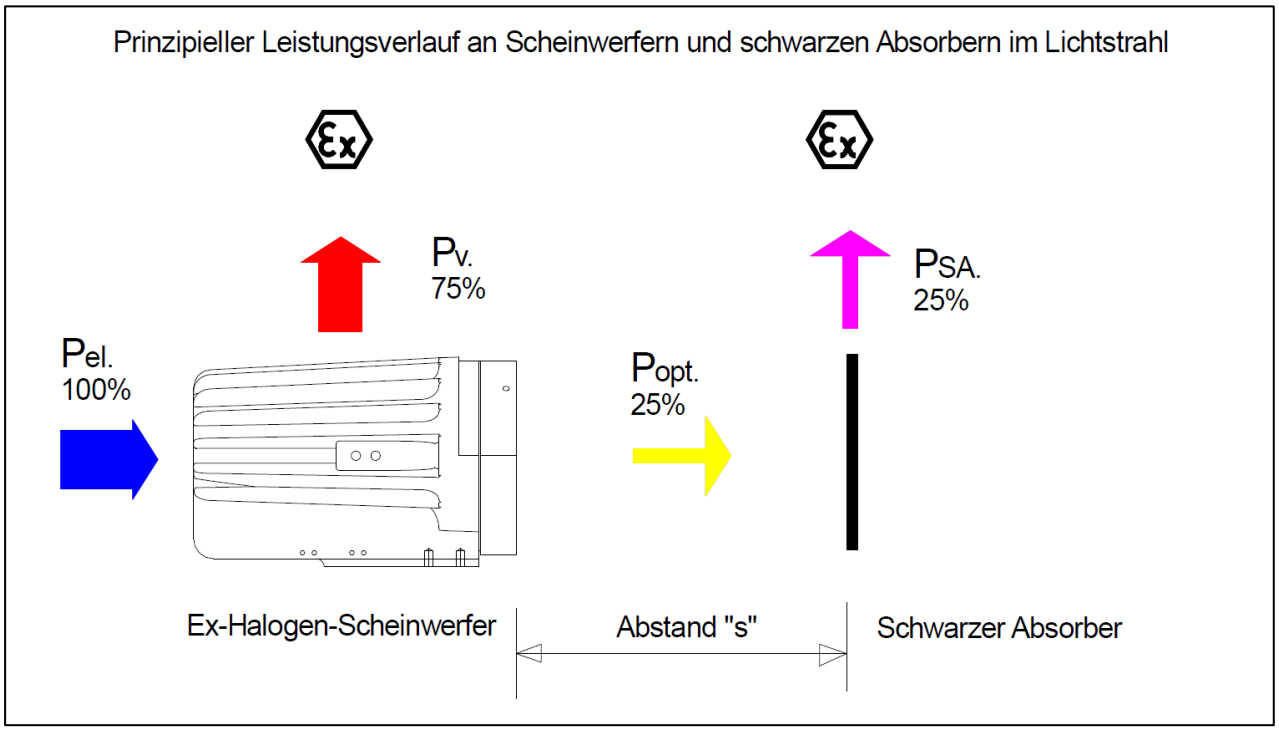

Bild 4-1: Leistungsverlauf und schwarzer Absorber

Der Wirkungsgrad des Scheinwerfers ist definiert durch:

$$\eta = \frac{Popt.}{Pel.}$$

Die Zündgefahr, sowohl des Scheinwerfers als auch des schwarzen Absorbers, resultiert aus der maximalen Oberflächentemperatur ($T_{sur.\ max.}$). Diese maximale Oberflächentemperatur ist ein klar definierter Begriff im Explosionsschutz und muss im Rahmen der Geräteprüfung nach 60079-0 ermittelt, dokumentiert und gekennzeichnet werden. Ein Anwender muss ganz klar die Temperaturklasse des Gerätes mit der Zündtemperatur der Gase in seiner Anlage abgleichen können. Gleiches gilt für Glimm- und Zündtemperaturen von brennbaren Stäuben. Die maximale Oberflächentemperatur eines Gerätes tritt bei maximal zulässiger Umgebungstemperatur ($T_{amb.\ max.}$) auf. Beispielsweise nennt ein Hersteller für eine seiner Leuchten, welche im Zuge dieser Ausarbeitung weiter untersucht wird, T6 (85°C) für Gase und $T_{sur\ max.}$ = +82°C für Stäube auf seinem Typenschild. Das „Produktversprechen“ ist sozusagen:

„Unser Scheinwerfer wird bei der Umgebungstemperatur ($T_{amb.\ max.}$) von +48°C an seinem heißesten Punkt nie heißer als $T_{sur.\ max.}$ = +82°C.“

Während die maximale Oberflächentemperatur des Scheinwerfers kritisch untersucht wird, erfolgt nach aktueller Normenlage für divergente Ex-Leuchten keine Bewertung der optischen Leistung ($P_{opt.}$) und somit auch keine Messung und Bewertung der maximalen Temperatur eines schwarzen Absorbers ($T_{SA.}$).

4.3 Wirkungsgrade von Leuchtmitteln

Der Wirkungsgrad ($\eta_{Glueh.}$) einer Glühlampe liegt bei etwa 5%. Es wird also lediglich ein Bruchteil der zugeführten Leistung ($P_{el.}$) in Licht umgewandelt, die restlichen 95% gehen als Abwärme ($P_{v.}$) in der Umgebung verloren. Glühlampen erreichen somit eine Lichtausbeute von 10 bis 15 Lumen/Watt.

Der Wirkungsgrad einer Halogenlampe ($\eta_{Hal.}$) ist mit etwa 10 % nur geringfügig besser. Auch hier geht der größte Teil von 90% der zugeführten Leistung ($P_{v.}$) als Abwärme in der Umgebung verloren und sie erreichen eine Lichtausbeute von 15 bis 20 Lumen/Watt.

Der theoretische Wirkungsgrad bei kalt-weißen LEDs liegt bei 100%, was 350 Lumen/Watt entspricht. In der Praxis wird dieser Wirkungsgrad nicht erreicht, da Vorschaltelektronik, Filter und Optiken Verlustleistung ($P_{v.}$) erzeugen. Handelsübliche LEDs kommen nichtsdestotrotz bereits heute auf einen Wirkungsgrad (η_{LED}) von 40% - mit steigender Tendenz. LEDs stellen also mit Abstand das effektivste Leuchtmittel dar.

Leuchtmittel	**Wirkungsgrad (η) in %**
Glühbirne	5
Halogenleuchte	10
LED	40

Tab 4-1: Wirkungsgrade von Leuchtmitteln

Beispielberechnung eines LED Wirkungsgrades:
Das Leuchtmittel liefert 1500 Lumen bei einer Leistungsaufnahme von 12 Watt
1500 Lumen: 12 Watt = Lichtausbeute 125 Lumen/Watt
Physikalisches Maximum (100% Wirkungsgrad): 350 Lumen/Watt
125 Lumen/Watt: 350 Lumen/Watt = 0,36 entspricht einem Wirkungsgrad von 36 Prozent.

Anmerkung:
Lediglich in den folgenden schematischen Darstellungen definieren wir zur Veranschaulichung des Problems den Wirkungsgrad von Halogenleuchten auf 25% ($\eta_{Hal.}$) = 25% sowie den Wirkungsgrad von LEDs auf (η_{LED}) = 75%. Sämtliche Messungen und Untersuchungen arbeiten mit tatsächlichen Leuchtmitteln sowie deren tatsächlichen Wirkungsgraden.

4.4 Überlegungen zu Ex-Halogenstrahlern

Bei Halogenscheinwerfern ist der Wirkungsgrad ($\eta_{Hal.}$) gegenüber dem Wirkungsgrad von LED Leuchtmitteln (η_{LED}) vergleichsweise gering. Nehmen wir für die schematische Darstellung in Bild 4-1 an, $\eta_{Hal.}$ betrage 25%.
Es folgt, dass der größte Teil der eingespeisten Leistung Verlustleistung ist. Diese wird in Form von Wärme direkt am Gerät, am Scheinwerfer abgeführt. Kurzum: Das Gerät wird an seiner Oberfläche heiß. Dies führt dazu, dass Hersteller von Ex-Halogenscheinwerfern in der Regel die Temperaturklasse T4 oder T3 angeben.

Das „Produktversprechen“ für T4 ist sozusagen:
„Unser Scheinwerfer wird bei der Umgebungstemperatur ($T_{amb.\ max.}$) an seinem heißesten Punkt nie heißer als $T_{sur.\ max.}$ = +135°C.“

Die optische Leistung beträgt in unserem schematischen Beispiel lediglich 25% der Einspeiseleistung. Dies hat zur Folge, dass nur diese vergleichsweise geringe optische Leistung ($P_{opt.}$) dem schwarzen Absorber zur Erwärmung zur Verfügung steht (P_{SA}).
Solange die Temperatur des schwarzen Absorbers kleiner als die genannte maximale Oberflächentemperatur des Gerätes ist, besteht keine Explosionsgefahr.

4.5 Überlegungen zu Ex-LED Scheinwerfern

Bei LEDs ist der Wirkungsgrad (η_{LED}) gegenüber dem Wirkungsgrad von Halogenleuchtmitteln (η_{HAL}) vergleichsweise hoch. Nehmen wir für die schematische Darstellung in Bild 4-2 an, η_{LED} betrage 75%.

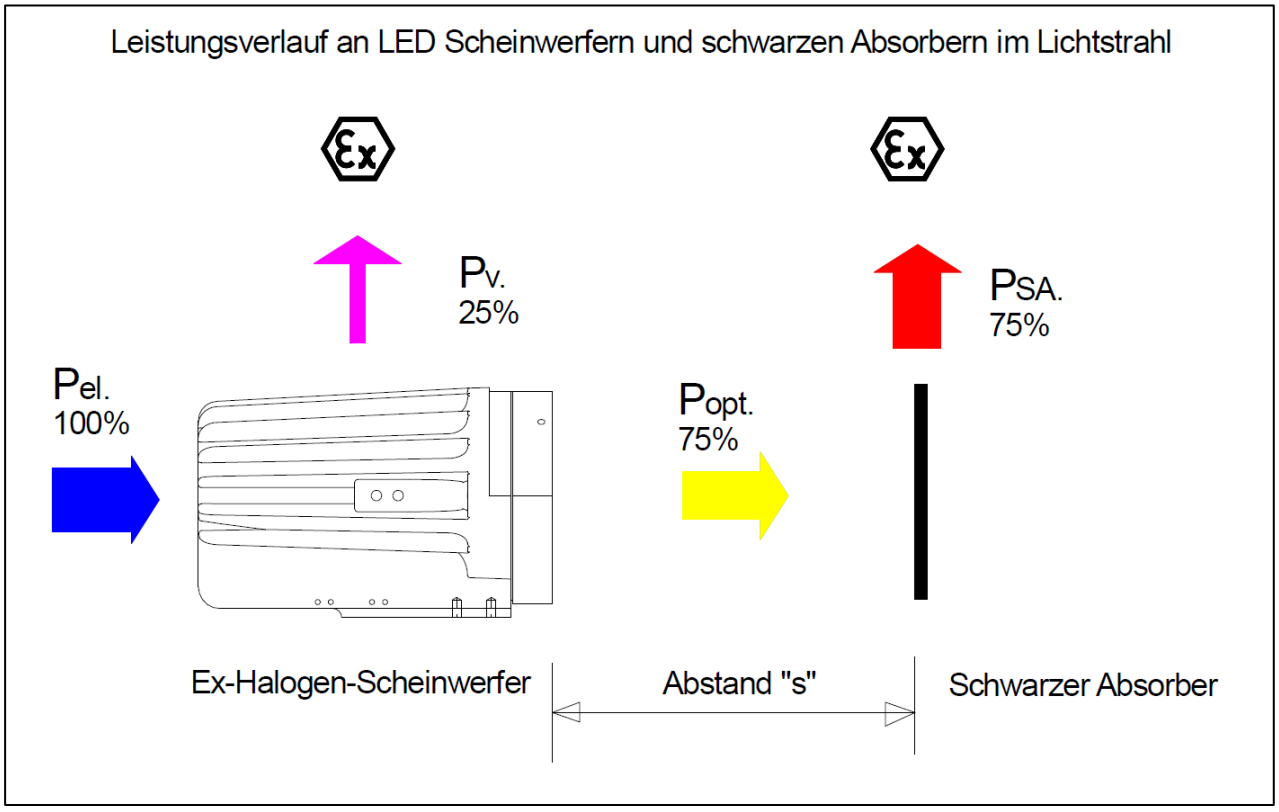

Bild 4-2: Leistungsverlauf an LED Scheinwerfern

Es folgt, dass der größte Teil der eingespeisten Leistung in Lichtleistung ($P_{opt.}$) konvertiert wird. Wird diese von einem schwarzen Körper absorbiert, so wird sie in Form von Wärmeleistung (P_{SA}) an die Umgebung abgegeben. Nur ein geringer Teil der eingespeisten Leistung verbleibt im Gehäuse und generiert dort Wärme ($P_{v.}$).
Der Scheinwerfer selbst bleibt relativ kalt Hätten LEDs einen Wirkungsgrad von 100%, so würde sich der Scheinwerfer gar nicht aufheizen. Seine maximale Oberflächentemperatur ($T_{sur.\ max.}$) entspräche der Umgebungstemperatur (T_{amb}).
Der hohe Wirkungsgrad und der relativ kalt bleibende Scheinwerfer führen dazu, dass deren Hersteller in der Regel die Temperaturklassen T5 oder T6 kennzeichnen. Im Sinne der Normen erfolgt dies zu Recht: Es wird nur die maximale Oberflächentemperatur des Gerätes, nicht aber eines schwarzen Absorbers im Lichtstrahl bewertet.

Das „Produktversprechen“ für T6 LED Scheinwerfer ist sozusagen:
„Unser Scheinwerfer wird bei der Umgebungstemperatur ($T_{amb.\ max.}$) an seinem heißesten Punkt nie heißer als $T_{sur.\ max.}$ = +85°C.“

Die optische Leistung beträgt in unserem schematischen Beispiel allerdings 75% der Einspeiseleistung und diese Leistung steht dem schwarzen Absorber zur Erwärmung zur Verfügung (P_{SA}). Der schwarze Absorber kann also bei Leuchtmitteln mit hohem Wirkungsgrad (LED) deutlich heißer sein, als die maximale Oberflächentemperatur am Gerät selbst.

Bei LED Scheinwerfern mit hohem Wirkungsgrad entsteht die maximale Oberflächentemperatur nicht am Gerät selbst, sondern am schwarzen Absorber im Lichtstrom. Dieser wird bei Ex-LED Strahlern deutlich heißer als die gemessene und gekennzeichnete Oberflächentemperatur des Gerätes. Dies wiederum ergibt eine Zündgefahr, unabhängig von der heißen Oberfläche der Ex-Leuchte, welche in der Normung momentan keine Beachtung findet.

4.5.1 Multi LED Arrays

Vereinfacht man die Geometrie von Multi-LED Anordnungen auf lediglich zwei nebeneinander befindliche LEDs, ergeben sich, z.B. für eine der von uns vermessenen Leuchten, folgende beispielhafte Maße, welche im folgenden Bild dargestellt sind:

Abstrahlwinkel der LEDs (mit Optik und/oder Reflektor): 10°
Abstand der LEDs zueinander: ca. 16 mm
Entfernung zum Schnittpunkt beider Lichtstrahlen: ca. 90 mm

4.5.2 Cold Spots

Die „Cold-Spots“ entstehen in den Bereichen, an welche kein Licht kommt. Diese „Cold-Spots“ werden nicht „bestrahlt“. Hier sind schwarze Absorber nicht in der Lage Lichtleistung in Wärmeleistung zu konvertieren, weil der Lichtstrom die schwarzen Absorber nicht erreicht.

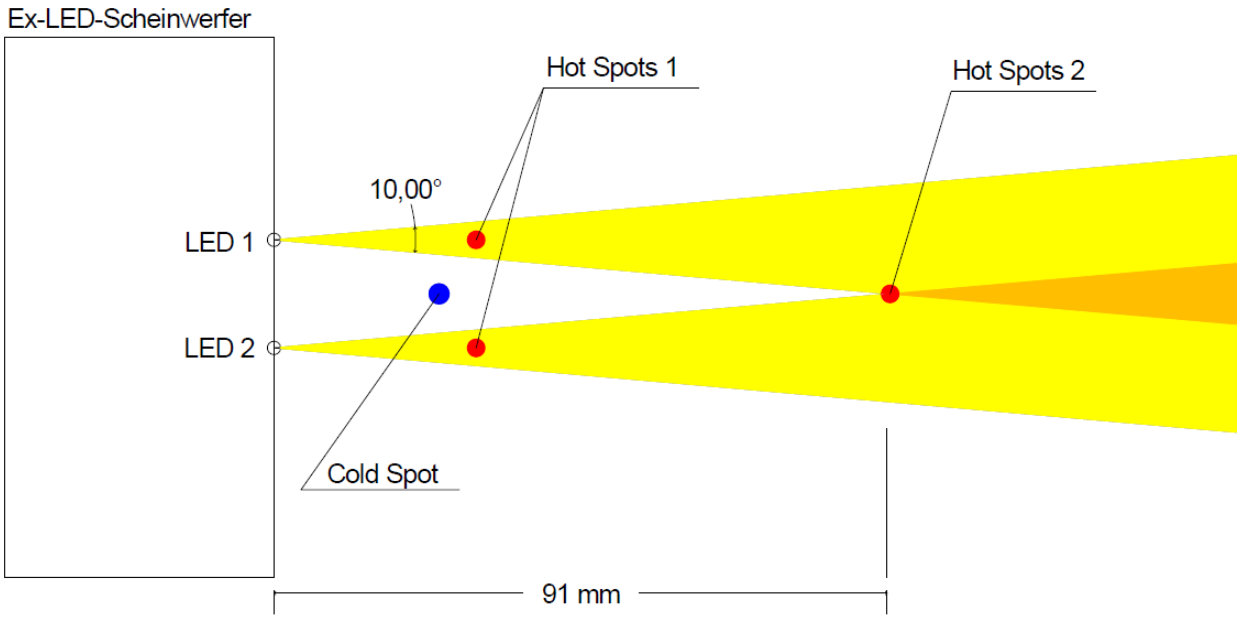

Bild 4-3: Theoretische Positionen von „Hot-Spots“ und „Cold-Spots“

4.5.3 Hot-Spots der Gruppe 1

Hot-Spots der Gruppe 1 entstehen im Mittelpunkt des Lichtstrahls einer LED, unmittelbar nach dessen Austritt aus dem Schutzgehäuse. Bei „spitzen“ Abstrahlwinkeln ist hier die Energiedichte am höchsten. Durch den divergenten Charakter des Lichtstrahls, sowie durch die Absorption der Lichtenergie durch in der Atmosphäre befindliche Partikel, nimmt die Energiedichte mit der Entfernung zum Austrittspunkt ab. In der Mitte des Strahles ist die Lichtenergie am größten.

4.5.4 Hot-Spots der Gruppe 2

Hot-Spots der Gruppe 2 entstehen, wenn mindestens zwei LEDs emittieren (in der Praxis sind dies Matrix- oder Ringanordnungen). Ab dem Schnittpunkt der Lichtstrahlen trifft die Lichtenergie beider Strahlen auf einen potentiellen Absorber. Ob der Effekt dieser Leistungsbündelung schwerer wiegt als die Verluste bis zu diesem Punkt, ergibt sich aus der Geometrie der Konstruktion; insbesondere aus dem Abstrahlwinkel. Je „stumpfer“ der Abstrahlwinkel ist, desto früher und somit verlustfreier und energiereicher treffen sich die beiden Lichtstrahlen. Hot Spots der Gruppe 2 können, abweichend zur Gruppe 1, auch erst hinter dem Schutzgehäuse auftreten.

4.5.5 Korrelation der Hot-Spots zur Umgebungstemperatur

Weder Hot-Spots der Gruppe 1, noch Hot-Spots der Gruppe 2 sind theoretisch abhängig von deren Umgebungstemperatur. Die Lichtenergie wird in Wärmeenergie konvertiert. Somit ist die Temperatur am schwarzen Absorber lediglich abhängig von der Lichtenergie und somit von der Leistung der LED und deren temperaturabhängigem Wirkungsgrad.
Im Vakuum und bei kleinem schwarzen Körper gilt:

P_{licht} ist proportional zu T_{SA}

In der Praxis haben wir weder Vakuum noch kleine schwarze Absorber. Wir konnten die Gesetzmäßigkeit trotzdem nachweisen, indem wir den schwarzen Körper auf die maximal zulässige Umgebungstemperatur des Gerätes aufgeheizt haben, und die LEDs gekühlt und ungekühlt zugeschaltet haben: Kalte LEDs heizen die schwarzen Absorber mehr auf als warme LEDs, da deren Wirkungsgrad bei kälteren Temperaturen höher ist.

4.6 Weitere Überlegungen zum schwarzen Absorber

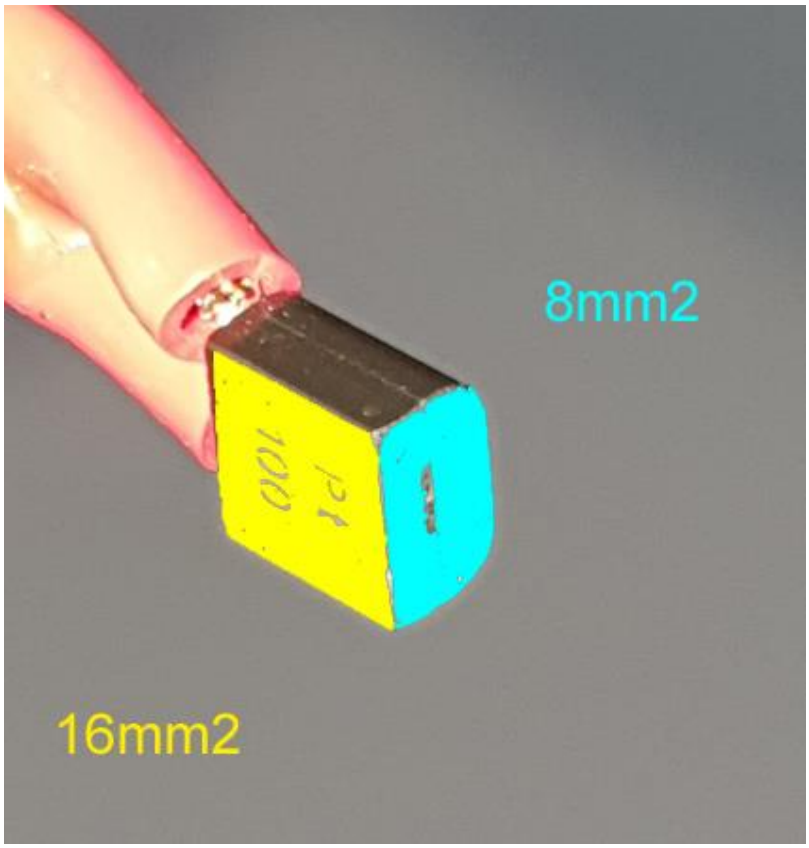

Bild 4-4: PT100-Flächen in Luft

Bei Versuchen mit den oben abgebildeten PT100 Fühlern in Luft wurde festgestellt, dass die Absorptionstemperatur des Fühlers abhängig davon war, ob dessen Stirnseite mit einer Fläche von 8 mm^2 oder dessen Unterseite mit deiner Fläche von 16 mm^2 bestrahlt wurde. Die Messergebnisse bei einer Absorptionsfläche von 16 mm^2 lagen deutlich über den Temperaturen, die bei einer Absorptionsfläche von 8 mm^2 gemessen werden konnten.

Diese Beobachtung warf folgende Fragen auf:

1. Welche Beziehung besteht zwischen der „Art des Lichtstrahles“, der schwarzen Absorptionsfläche und dessen Temperatur?
2. Welche potentiellen Absorptionsflächen finden sich in der Praxis?
3. Spielt die Wärmeleitfähigkeit des schwarzen Absorbers eine Rolle?
4. Wie können eine oder mehrere „Worst-case“ Messungen erfolgen?

4.6.1 Die Absorptionsfläche

Zunächst liegt die Vermutung nahe, dass je größer die Absorptionsfläche ist, desto höhere auch deren Temperatur ist. Betrachtet man den homogenen und in erster Annäherung parallelen Lichtstrahl, so ist diese Vermutung zutreffend: Mehr Fläche heißt mehr Lichtenergie, welche absorbiert werden kann, wie man an der Auswertung unten sehen kann. Diese „Je-Größer-desto-Heißer“ These ist jedoch nicht ohne Einschränkung gültig. Hat die Absorptionsfläche gute Wärmeleiteigenschaften, so können sich bei größeren Flächen Temperaturmittelwerte einstellen. Dies passiert zum Beispiel, wenn die Absorptionsfläche auf einer Ebene mit Cold-Spots liegt (siehe Bild 4-3). Im Fall von Multi-LED Arrays messen kleine, thermisch isolierte schwarze Absorber deutlich höhere Temperaturen, als ein großer wärmeleitfähiger Absorber der sich auf der Ebene der Cold-Spots befindet. Gleiches gilt für Scheinwerfer mit Reflektoren wo es partiell zu einer Strahlbündelung kommen kann.

Folgende Versuchsabsorber wurden konstruiert:

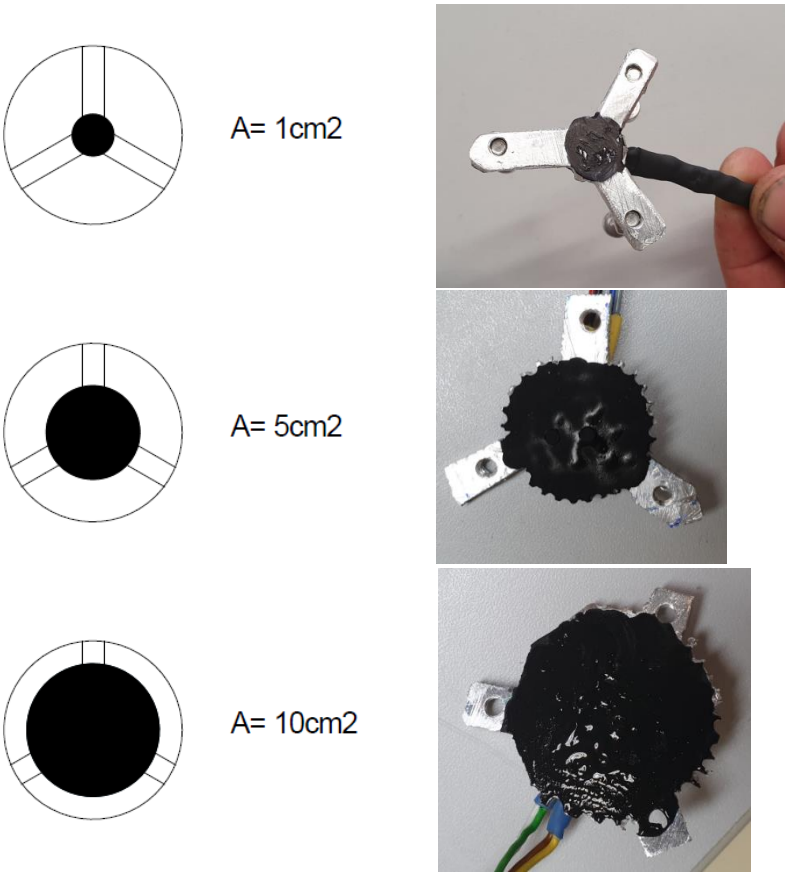

Bild 4-5: Versuchsabsorber mit verschiedenen Flächen

Als Material wurde wärmeleitfähiges Aluminium verwendet welches auf der Absorptionsfläche mit schwarzer matter Farbe lackiert wurde. Die schwarzen Absorber wurden in den Lichtstrahl eingebracht und die Entfernung zur Lichtquelle variiert:

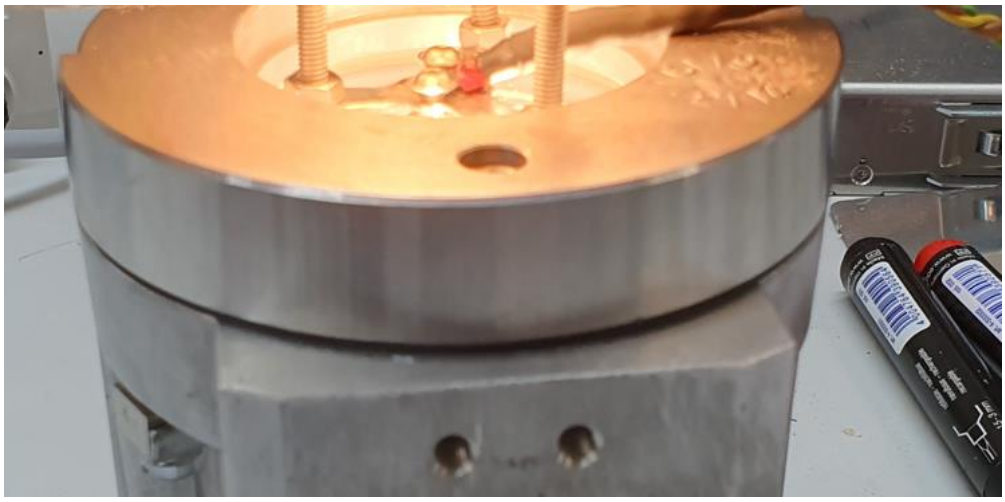

Bild 4-6: Schwarzer Absorber im Lichtstrahl

Abstand/mm	**Maximale Tamb in °C**	**Maximale Tsur in °C**	**Schwarzkörper-temperatur 1qcm in C°**	**Schwarzkörper-temperatur 5qcm in C°**	**Schwarzkörper-temperatur 10qcm in C°**
0	40	200	209,0	228,0	229,8
4	40	200	199,0	227,0	223,4
7	40	200	198,0	232,0	238,4
12	40	200	190,0	238,2	234,1
18	40	200	207,8	238,5	239,4
34	40	200	180,0	205,6	213,4
46	40	200	169,0	177,1	189,0

Tab 4-2: Schwarzer Absorber unterschiedlicher Flächen

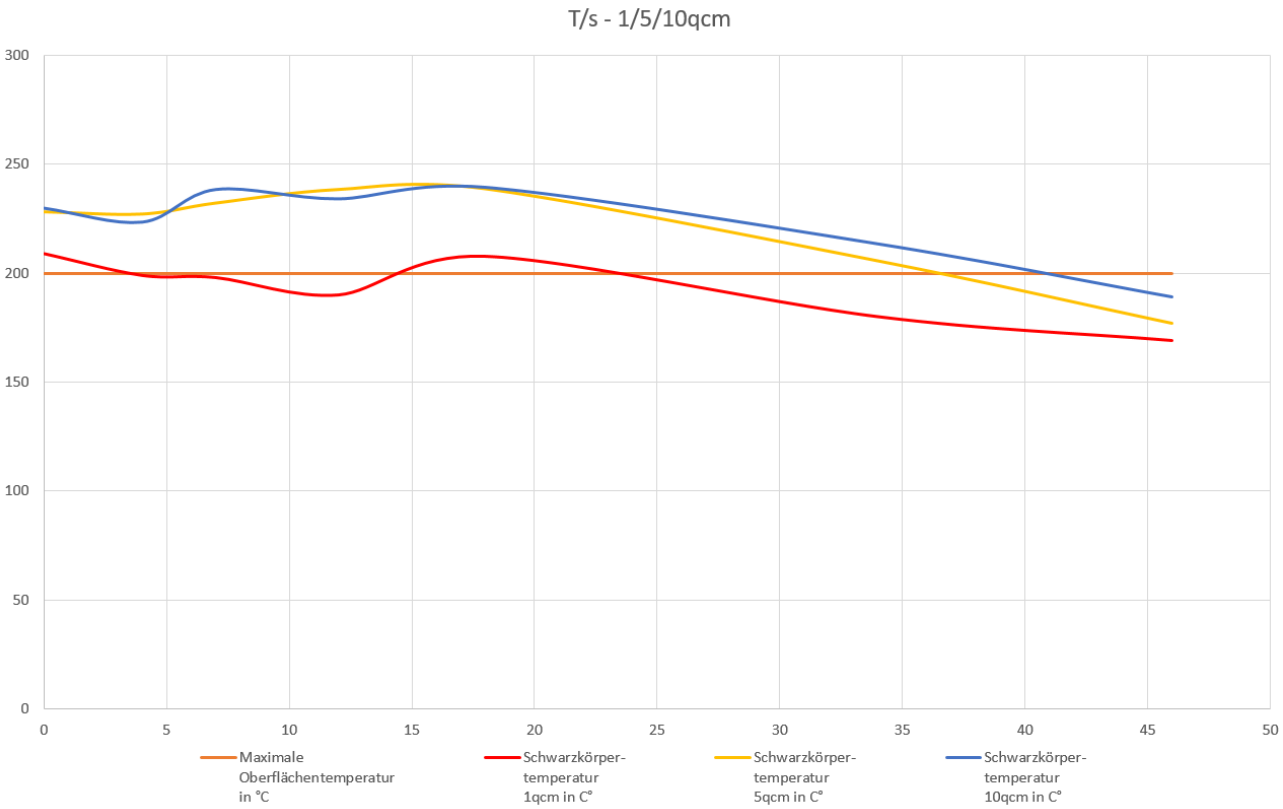

Bild 4-7: Schwarzer Absorber unterschiedlicher Flächen

Die eben aufgeworfene Frage: „Welche Beziehung besteht zwischen der Art des Lichtstrahles, der schwarzen Absorptionsfläche und dessen Temperatur?“ kann anhand der Versuchsergebnisse wie folgt beantwortet werden:

1. Im homogenen, leicht divergenten und parallelen Lichtstrahl, welcher die Absorptionsfläche des schwarzen Absorbers voll ausleuchtet, gilt:
   Je größer die Fläche des schwarzen Absorbers, desto größer ist dessen Oberflächentemperatur

2. Bei Reflektorleuchten und Multi-LED Anordnungen, heizen sich zudem kleine und thermisch isolierte schwarze Absorber stark auf.

Die maximale Temperatur des schwarzen Absorbers ist folglich abhängig von der Leistung und der Art des Lichtstrahls oder der Lichtstrahlen, der Wärmeleitfähigkeit, der Fläche sowie der Position des schwarzen Absorbers.

4.6.2 Potentielle Absorptionsflächen in der Praxis

In der Praxis kann es zu folgenden Absorptionsereignissen kommen:

1. Leitfähige dunkele Schmierschicht auf der Scheibe, z.B. Öl.
2. Isolierende dunkele Schmierschicht auf der Scheibe, z.B. Kunststoff
3. Leitfähige dunkele Staubschicht/Schmutzschicht auf der Scheibe
4. Isolierende dunkele Staubschicht/Schmutzschicht auf der Scheibe
5. Frei schwebender Partikel im Lichtstrahl

In der Praxis kommen die Szenarien 3 und 4 sicher am häufigsten vor.

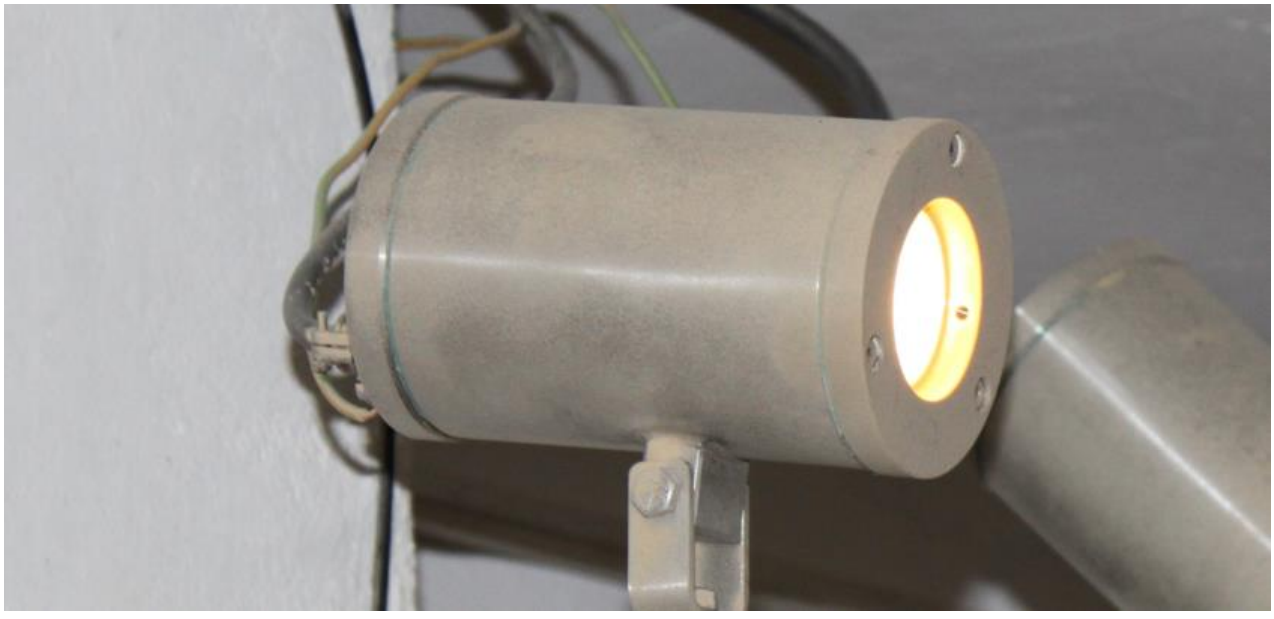

Bild 4-8: Staubablagerungen

5 Messreihen

An einer Serie von Scheinwerfern mit Halogen- und LED-Leuchtmitteln soll die tatsächliche Temperatur an einem schwarzen Absorber gemessen werden. Der Messaufbau besteht aus dem Scheinwerfer sowie einem schwarzen Absorber, in welchem sechs PT100 Temperaturfühler eingelassen sind. Der Abstand (s) zwischen der lichtdurchlässigen Öffnung des Scheinwerfers sowie des schwarzen Absorbers wird variiert. Die erste Messung findet unmittelbar an der lichtdurchlässigen Öffnung des Scheinwerfers statt. Dann wird der Abstand (s) zwischen dem Scheinwerfer und dem schwarzen Absorber erhöht, bis die Schwarzkörpertemperatur einen stabilen Wert erreicht hat.

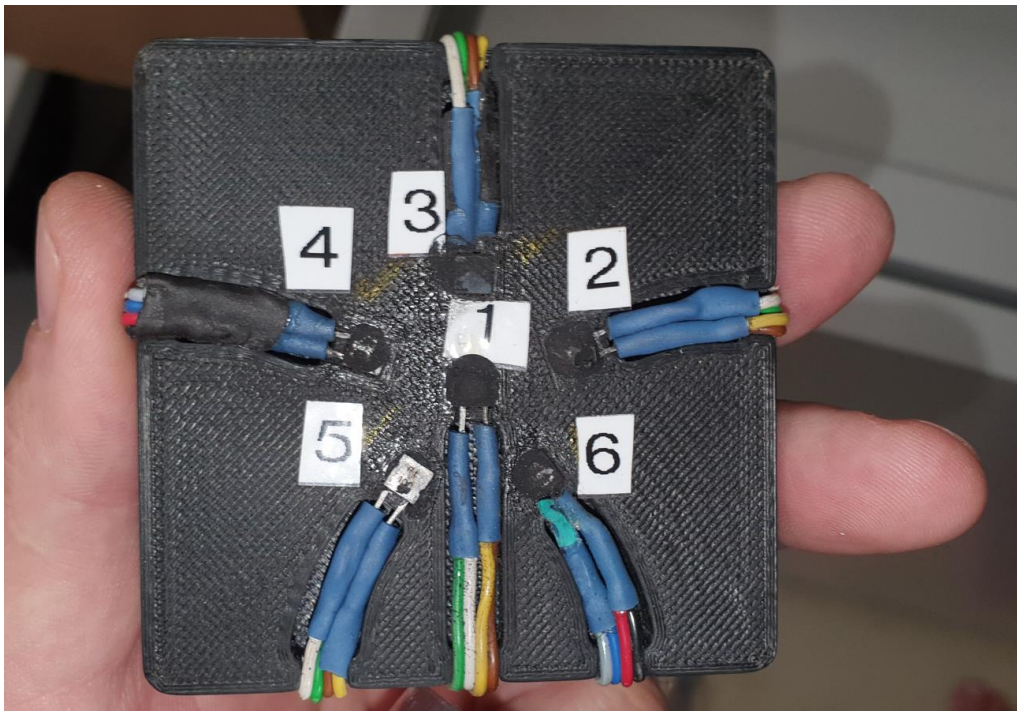

Bild 5-1: Der schwarze Absorber

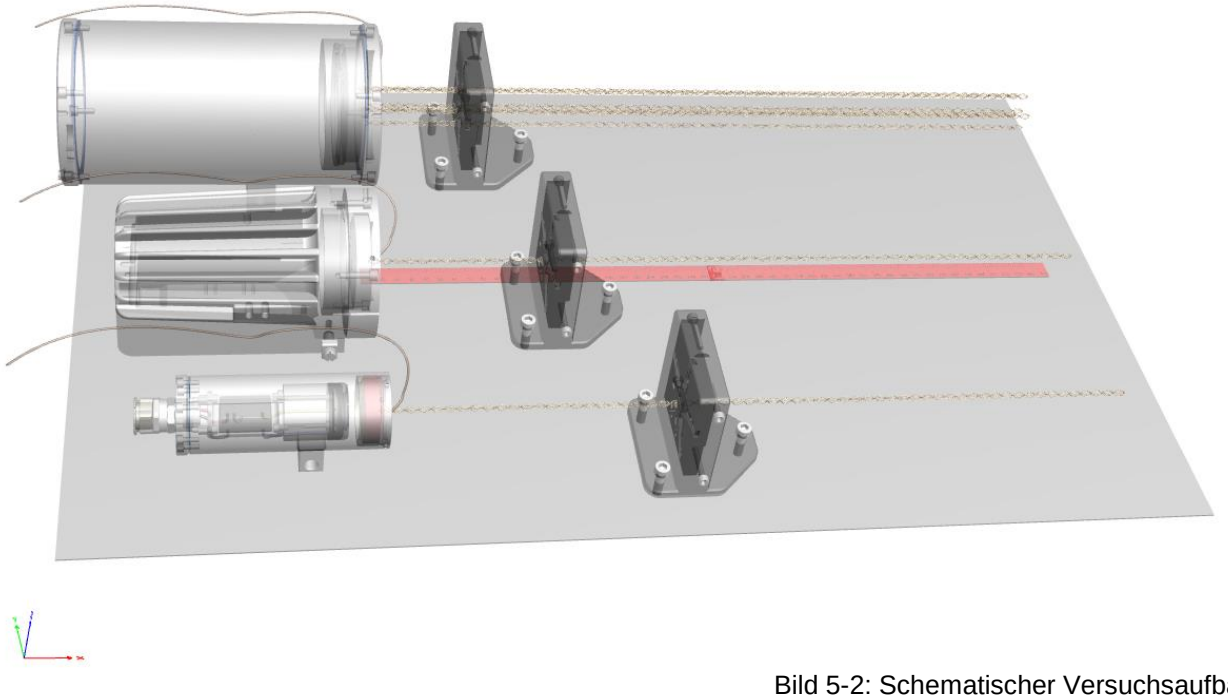

Bild 5-2: Schematischer Versuchsaufbau

Die Leitfragen der Versuche lauten:

1. Überschreitet die gemessene Schwarzkörpertemperatur die angegebene Temperaturklasse (Gas oder Staub) des Scheinwerfers (Ex-Gerätes)?

2. Wie und wann wirkt sich der divergente Lichtstrahlverlauf auf die gemessene Schwarzkörpertemperatur aus?

3. Wie wirken sich die unterschiedlichen Wirkungsgrade (η) auf das Verhältnis zwischen Schwarzkörpertemperatur und maximaler Oberflächentemperatur des Gerätes aus?

4. Steht die Schwarzkörpertemperatur in Relation zur Umgebungstemperatur des Gerätes (Scheinwerfers)?

5.1 Halogenscheinwerfer Hersteller_1 Leuchte_1

Der Halogenscheinwerfer hat folgende technischen sowie explosionsschutztechnischen Daten:

Hersteller:	Hersteller_1
Typ:	Leuchte_1dH
Bauart:	Halogenstrahler mit Reflektor
Spannungsversorgung:	24VDC
Leistungsaufnahme:	50W
ATEX Bescheinigung	LCIE xx ATEX xxxx
IECEx Bescheinigung	n.a.
Ex Kennzeichnung GAS	Ex d IIC T4
Ex Kennzeichnung STAUB	Ex tD A21 IP65 130°C
Zulässige Umgebungstemperatur	-20°C <Tamb< +40°C

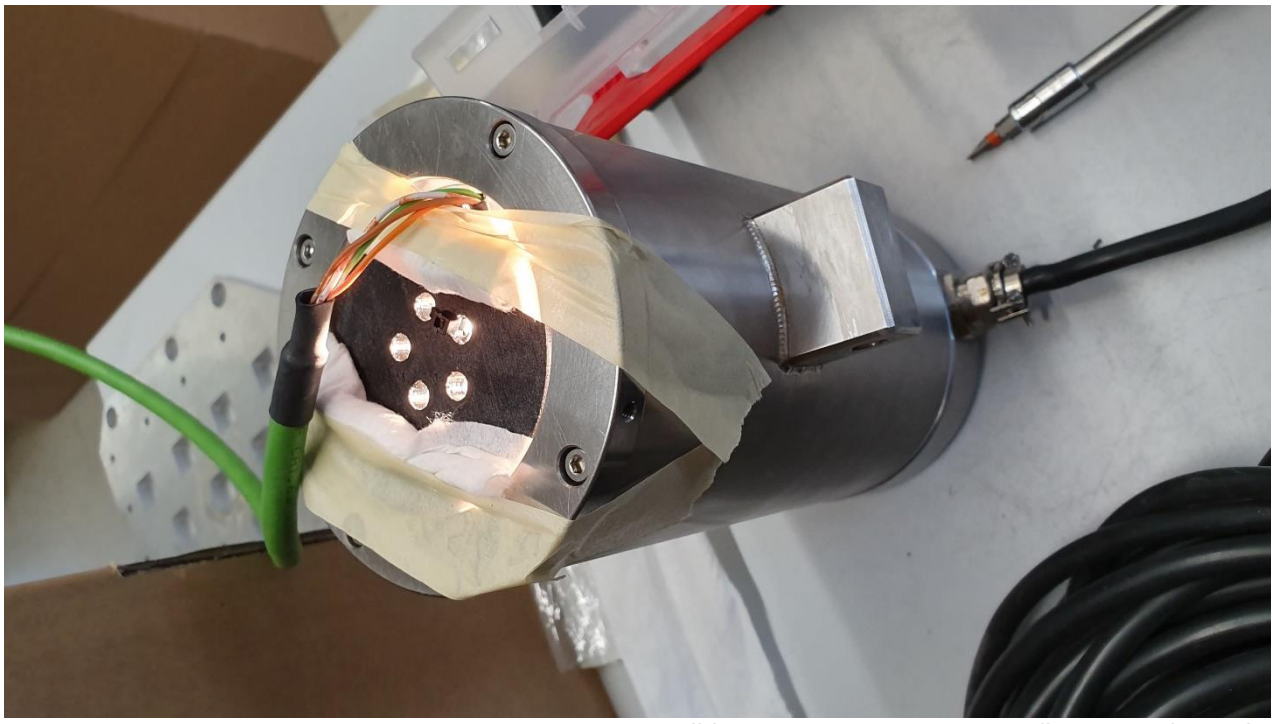

Bild 5-3: Messungen an Hersteller_1 Leuchte_1dH

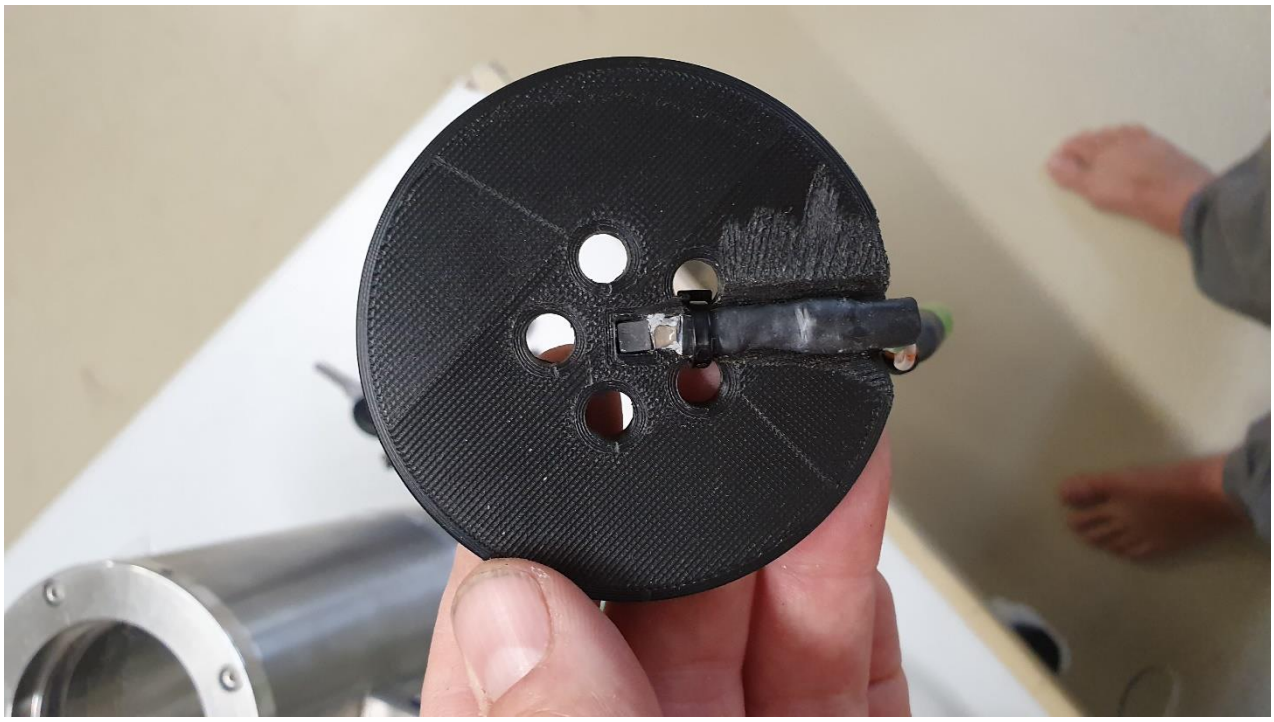

Bild 5-4: Schwarzer Absorber

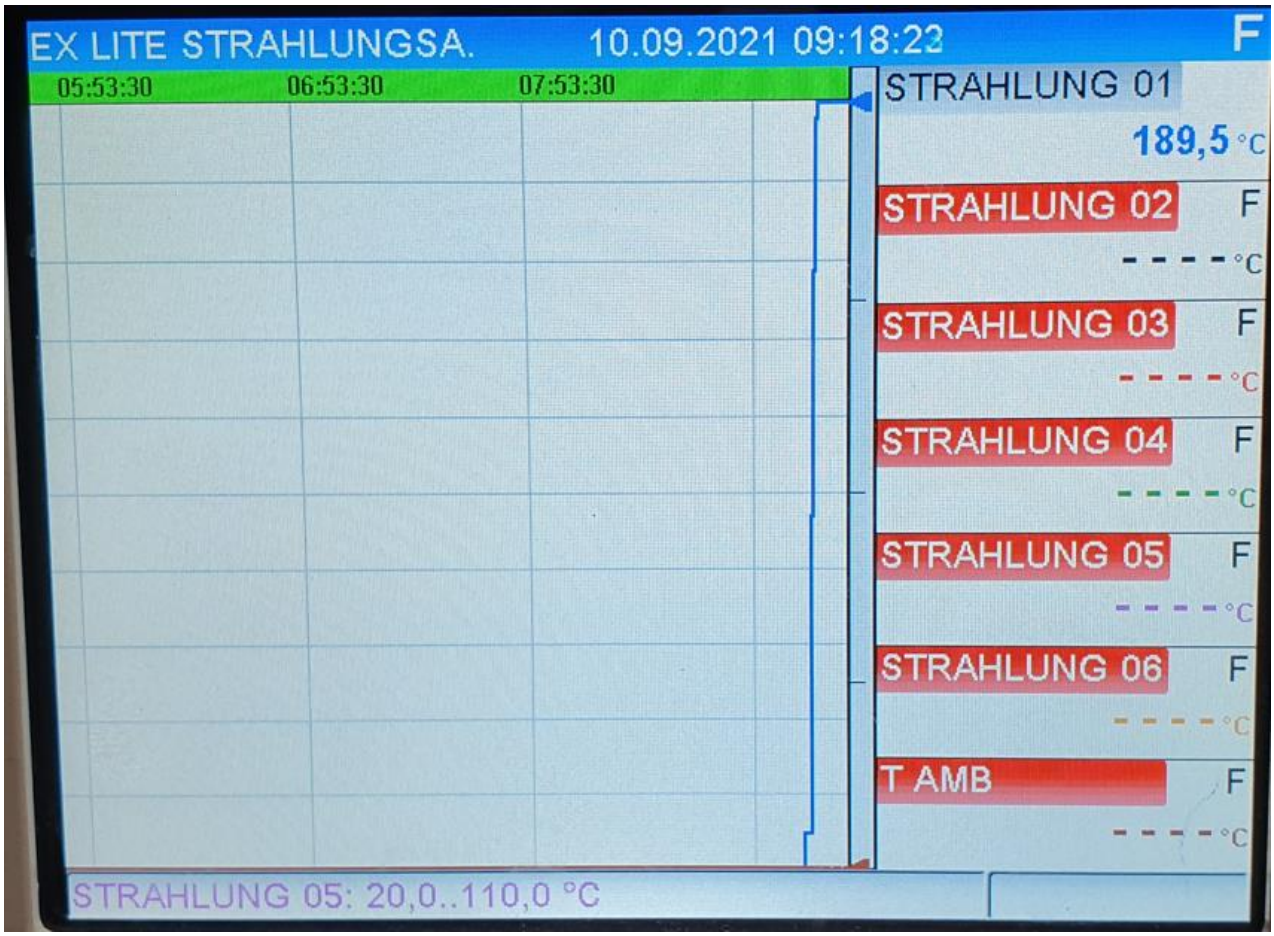

Bild 5-5: Messung bei T_{amb}=20,5°C

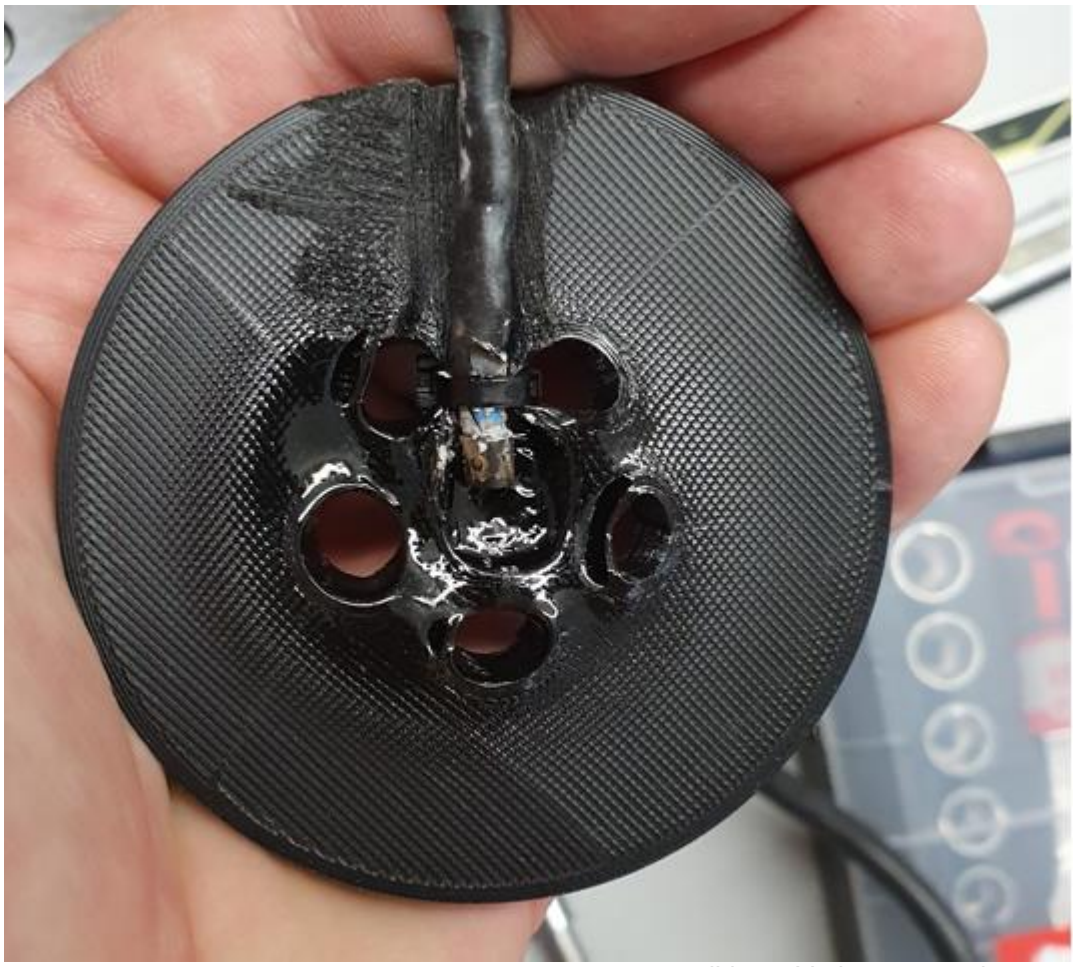

Bild 5-6: Verbrannter „schwarzer Körper“

Aufgrund der sehr hohen Temperaturen am schwarzen Absorber wurden sämtliche Messungen bei Raumtemperatur (20°C) durchgeführt. Auf die Messwerte wurden dann 20K Temperaturdifferenz addiert, um die Verhältnisse bei $T_{amb\ max.}$ = 40°C darzustellen. Uns ist bewusst, dass diese Vereinfachung einer groben Näherung entspricht. Dies ist akzeptabel, da es sich hier um eine qualitative Messung handelt. +/- 10K spielen bei den unten ermittelten Ergebnissen lediglich eine untergeordnete Rolle.

Bild 5-7: Weiterer Messaufbau

5.1.1 Hot-Spot Messungen am schwarzen Absorber

Folgende Temperaturen wurden am schwarzen Absorber in Abhängigkeit von der Entfernung zum Gerät gemessen:

Abstand in mm	Max. Umgebungstemperatur in °C	Max. Oberflächentemperatur in °C	Schwarzkörpertemp. in °C
0	40	130	210,0
18	40	130	173,6
23	40	130	147,4
30	40	130	139,6
36	40	130	129,9
41	40	130	118,9
58	40	130	113,0
67	40	130	109,8
72	40	130	101,1
90	40	130	98,2
116	40	130	92,1
160	40	130	85,9
310	40	130	72,5
450	40	130	65,0

Tab. 5-1: Hot-Spots am schwarzen Absorber Leuchte_1

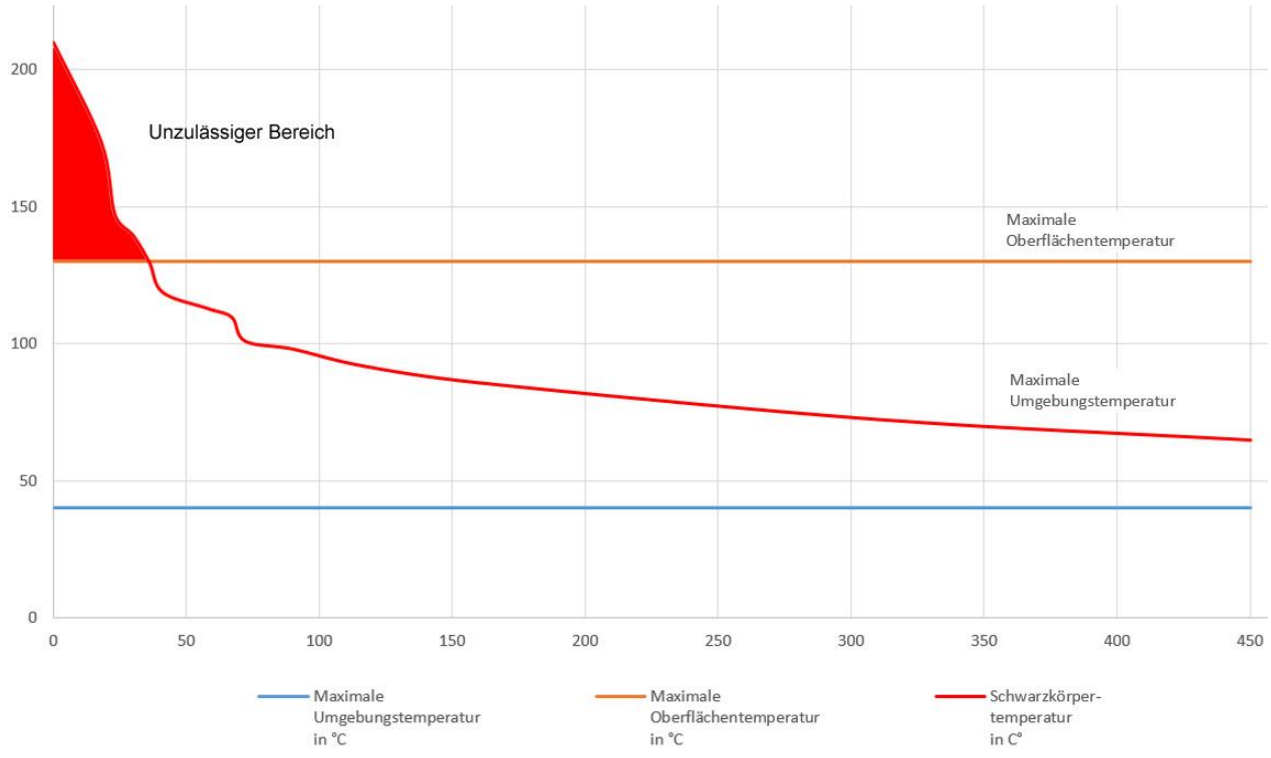

Bild 5-8: T/s - Diagramm schwarzen Absorber Leuchte_1

5.1.2 Unzulässiger Temperaturbereich

Im Strahl der Halogenleuchte entstehen am schwarzen Absorber unzulässige Oberflächentemperaturen und die Lichtleistung heizt ihn, bei einer Umgebungstemperatur von

+40°C, auf über 210°C auf. Ein schwarzer Absorber in unmittelbarer Nähe zur Lichtaustrittsöffnung heizt sich auf 210°C auf. Er wird somit 75K heißer als die maximale Oberflächentemperatur des Gerätes und erst nach einem Abstand von 32 mm unterschreitet die Schwarzkörpertemperatur die angegebene maximale Umgebungstemperatur von +130°C.

5.1.3 Hot Spots

Auffällig ist, dass die Hot-Spot-Temperatur in Abhängigkeit von der Entfernung zum Scheinwerfer langsamer abfällt. Würde man eine lineare Rekursionsgerade ansetzen, so wäre die negative Steigung bei Halogenstrahlern dem Betrage nach geringer, als bei LED Strahlern.
Hier kommen zwei Effekte zusammen:

1. Die optische Energie im Lichtstrahl.
2. Die deutlich höhere Konfektionsstrahlung bei Halogenstrahlern verglichen mit LED-Strahlern.

Der Effekt der Wärmekonfektion kann nachgewiesen werden, in dem man vergleicht wie schnell der schwarze Absorber abkühlt. Während der schwarze Absorber in der Nähe von heißen Halogenscheinwerfern nach deren Ausschalten fast eine Stunde benötigt um auf Raumtemperatur abzukühlen, so geschieht dies bei „kalten“ LED-Leuchten deutlich schneller.

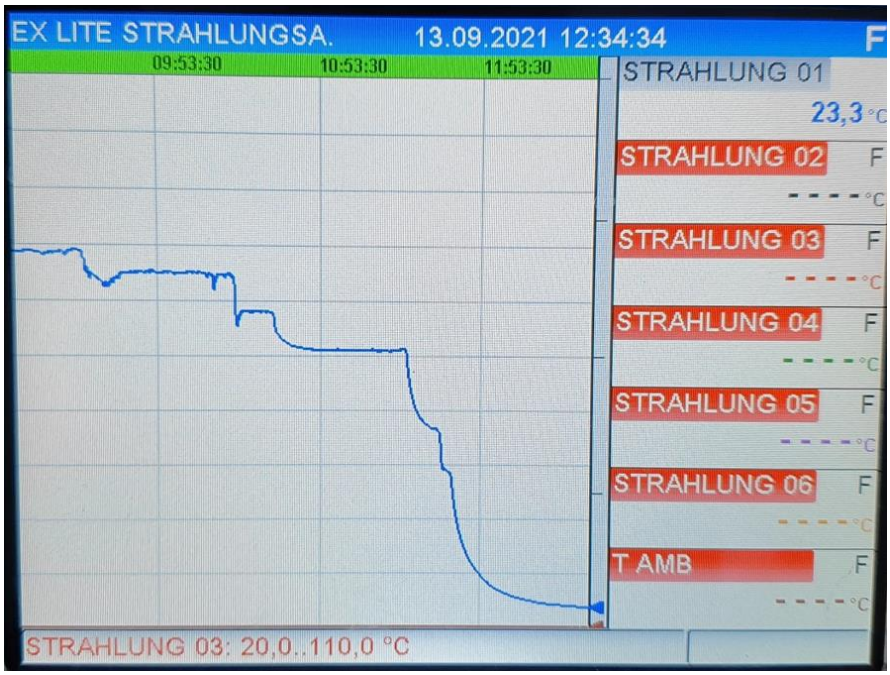

Bild 5-9: Langsame Abkühlung am schwarzen Absorber bei Halogenleuchten

Cold-Spots

Die „Cold-Spots“ entstehen in den Bereichen, an welche kein Licht kommt. In unserer obigen Messanordnung konnten keine Cold-Spots nachgewiesen werden, Lichtstrahlen von Halogenleuchtmitteln mit Reflektoren weisen in aller Regel keine Cold-Spots auf.

Hot-Spots der Gruppe 1

Im Abstand bis zu ca. 30 mm vor der lichtdurchlässigen Öffnung ergeben sich Hot-Spots der Gruppe 1. Dies ergibt einen unzulässigen Betriebsbereich.

Hot-Spots der Gruppe 2

Hot-Spots der Gruppe 2 konnten nicht direkt gemessen werden. Bei Halogenstrahlern mit Reflektor kann es - bedingt durch die optische Geometrie der Leuchte - höchstens einen Hot-Spot 2 außerhalb des Gehäuses geben: Den Brennpunkt des Reflektors. Da die Geometrie des Reflektors unbekannt ist, kann hier nur spekuliert werden. Die Messungen zeigen eine leichte Erhöhung bei ca. 23 mm Abstand, was auf einen Brennpunkt-Hot-Spot hinweisen könnte.

5.1.4 Versuchsergebnis

Der Hersteller_1 Halogen Scheinwerfer Leuchte_1 ist nicht ohne Einschränkungen als sicher zu bewerten.

In der Nähe des Lichtaustritts des Scheinwerfers ist die Temperatur am schwarzen Absorber ca. 75K (!) höher als die angegebene maximale Oberflächentemperatur des Gerätes. Erst ca. 32 mm hinter der optischen Öffnung des Gerätes stellen sich sichere Verhältnisse ein.

5.2 LED Scheinwerfer Hersteller_2 Leuchte_2

Der LED Scheinwerfer hat folgende technischen und explosionsschutztechnischen Daten:

Hersteller:	Hersteller_2 Ltd.
Typ:	Leuchte_2
Bauart:	LED Matrix
Spannungsversorgung:	230VAC
Leistungsaufnahme:	68W
ATEX Bescheinigung	CML xx ATEX xxxx
IECEx Bescheinigung	IECEx CML xx.0001
Ex Kennzeichnung GAS	Ex eb mb IIC T6 Gb
Ex Kennzeichnung STAUB	Ex tb IIIC T82 ºC Db
Zulässige Umgebungstemperatur	-52°C <Tamb< +48°C

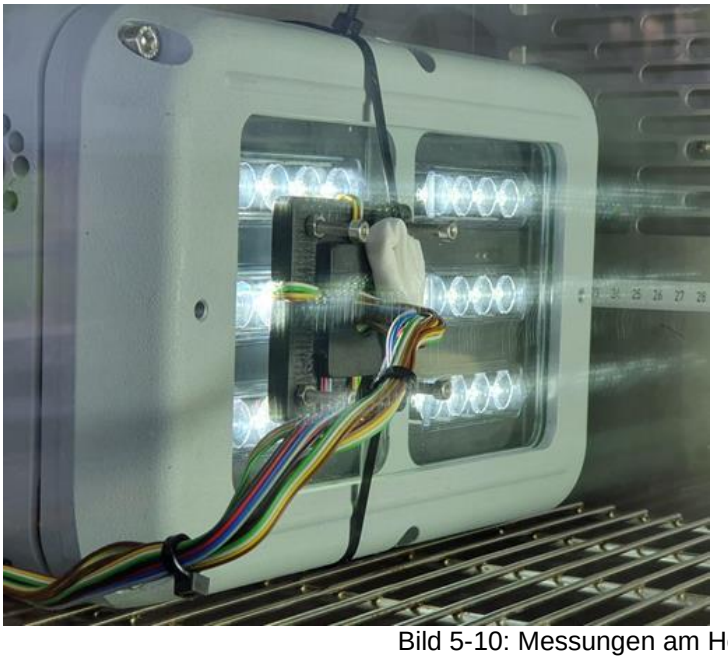

Bild 5-10: Messungen am Hersteller_2, Leuchte_2

5.2.1 Hot-Spot Messungen am schwarzen Absorber

Folgende Temperaturen wurden am schwarzen Absorber in Abhängigkeit von der Entfernung zum Gerät gemessen:

Abstand in mm	Maximale Umgebungstemperatur in °C	Maximale Oberflächentemperatur in °C	Schwarzkörper-temperatur in C°
0	48	82	101,6
1	48	82	101,1
2	48	82	101,4
2,9	48	82	100,1
4	48	82	90,3
5	48	82	85,8
6	48	82	87,6
7	48	82	87,3
8	48	82	83,5
9	48	82	85,1
10	48	82	85,3
11	48	82	82,3
14	48	82	80,1
15	48	82	72
35	48	82	55
60	48	82	48

Tab. 5-2: Hot-Spots am schwarzen Absorber LEUCHTE_2

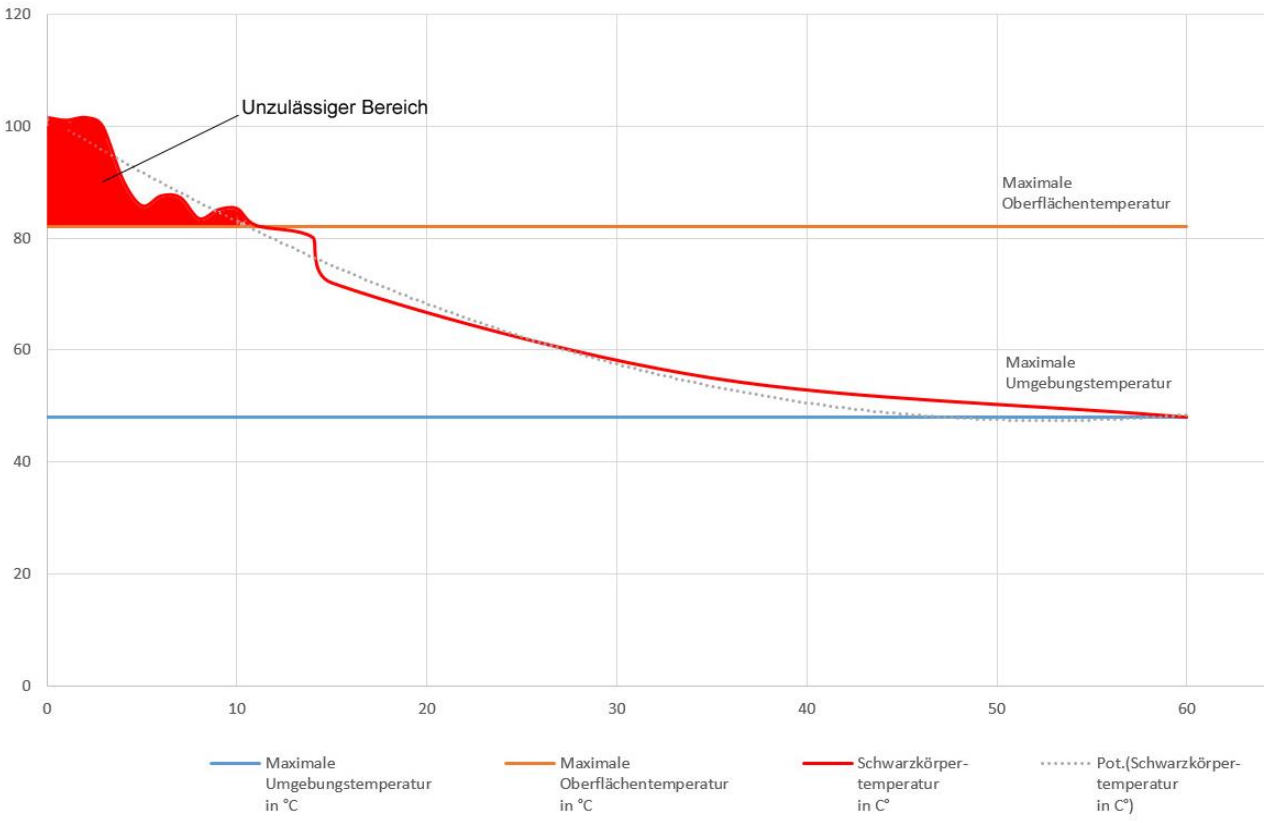

Bild 5-11: T/s - Diagramm schwarzen Absorber LEUCHTE_2

5.2.2 Unzulässiger Temperaturbereich

Am schwarzen Absorber im Strahl der LED entstehen unzulässige Oberflächentemperaturen. Die Lichtleistung heizt den schwarzen Absorber auf über 100°C bei einer Umgebungstemperatur von +48°C auf. Ein schwarzer Absorber in der Nähe (< ca. 14 mm) des Scheinwerfers würde eine Schwefelkohlenstoffatmosphäre (T6) zünden.
Erst nach 14 mm Abstand unterschreitet die Schwarzkörpertemperatur die angegebene maximale Umgebungstemperatur von +82° C.

5.2.3 Hot Spots

Auffällig ist, dass, insbesondere in unmittelbarer Nähe zur LED Matrix, die Temperaturmessung am schwarzen Absorber sehr abhängig von der Position des PT100-Fühlers ist. Erst nach ca. 90 mm erreichen alle Fühler gleiche Messwerte und auch erst ab diesem Punkt kann man in Näherung einen homogenen und divergenten Lichtstrahl annehmen.

Hier kommen zwei Effekte zusammen:

1. Die Strahlenergie nimmt mit dem Abstand zur LED ab.
2. Die Lichtkegel kreuzen sich.

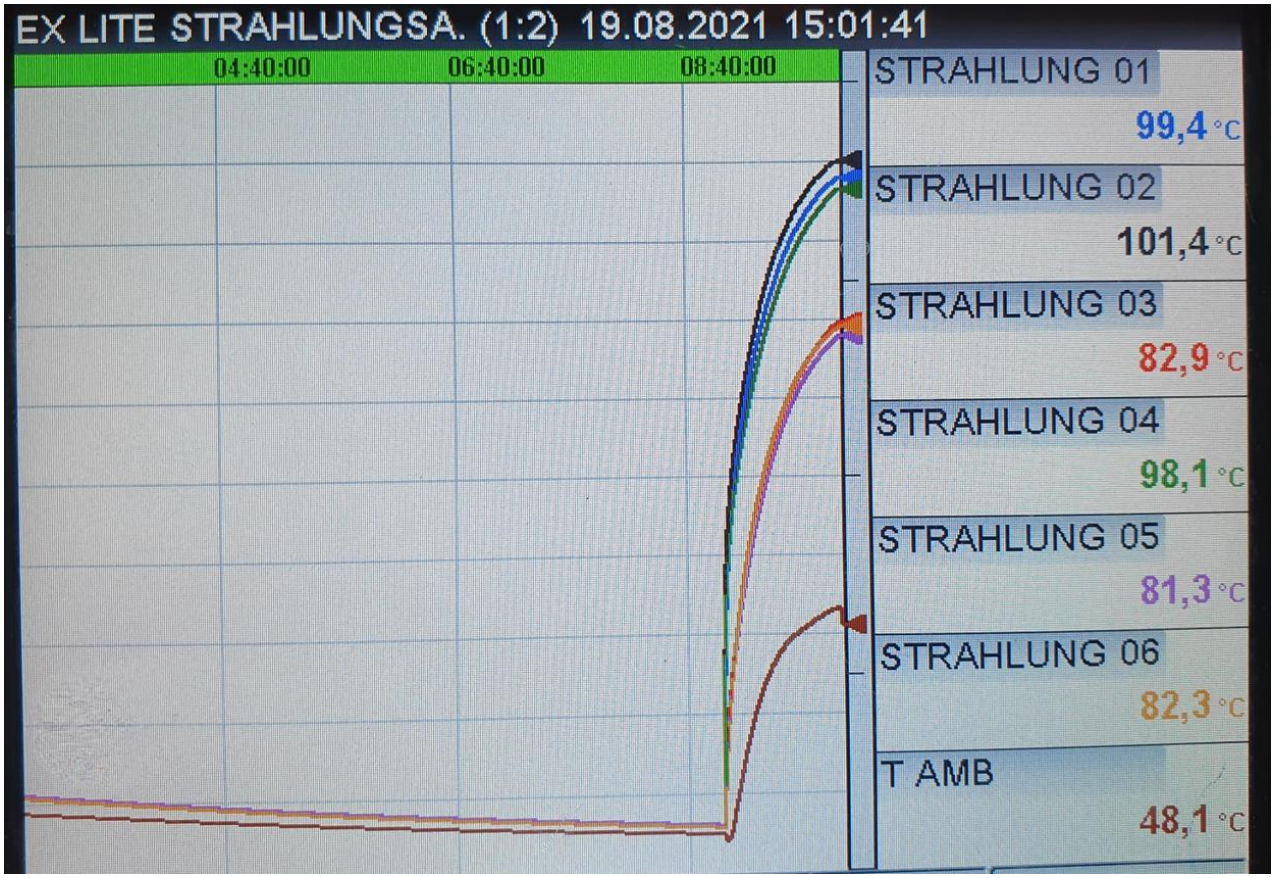

Bild 5-12: Messung in 2 mm Abstand

Cold-Spots

Die „Cold-Spots“ entstehen in den Bereichen, an welche kein Licht kommt. In unserer obigen Messanordnung sind dies die Fühler 3, 5 und 6. Diese Fühler werden nicht „bestrahlt“ und nicht in der Lage Lichtleistung in Wärmeleistung zu konvertieren, weil der Lichtstrom

diese Fühler nicht erreicht. Folglich heizen sich diese Fühler lediglich durch die Konvektionswärme des Gehäuses auf. Mit Werten zwischen 81,3°C und 82,9°C messen diese Fühler exakt die vom Hersteller angegebene maximale Oberflächentemperatur.

Hot-Spots der Gruppe 1
Hot Spots der Gruppe 1 entstehen im Mittelpunkt des Lichtstrahls einer LED unmittelbar nach dessen Austritt aus dem Schutzgehäuse. Bei „spitzen“ Abstrahlwinkeln ist hier die Energiedichte am höchsten. Durch den divergenten Charakter des Lichtstrahls sowie durch die Absorption der Lichtenergie durch in der Atmosphäre befindliche Partikel nimmt die Energiedichte mit der Entfernung zum Austrittspunkt ab. In unserer obigen Messanordnung liegen die Fühler 1, 2 und 4 an unterschiedlichen Positionen desselben Lichtstrahls. In der Mitte des Strahles ist die Lichtenergie am größten.

> *Anmerkung: Die Abweichungen der Messergebnisse vom theoretischen (exponentiellen) Verlauf erklären sich dadurch, dass die Messfühler nur händisch ausgerichtet wurden. Die Messungen zeigen also an einigen Stellen Absorptionstemperaturen im Zentrum des Lichtstrahls, an anderen Stellen die Absorptionstemperaturen am Rand des Lichtstrahls.*

Hot-Spots der Gruppe 2
Hot-Spots der Gruppe 2 konnten nicht gemessen werden. In 90 mm Entfernung ist die Lichtenergie so gering, dass hier keine Temperaturspitzen gemessen werden konnten.

5.2.4 Versuchsergebnis

Der Hersteller_2 LED Scheinwerfer LEUCHTE_2 ist nicht ohne Einschränkungen als sicher zu bewerten.

In der Nähe des Lichtaustritts ist die Temperatur am schwarzen Absorber ca. 20K (!) höher als die angegebene maximale Oberflächentemperatur des Gerätes.

6 Fazit

Der aktuelle Normenstand lässt die normenkonforme Entwicklung und Produktion unsicherer Ex-Scheinwerfer zu. Bei keiner der vermessenen Leuchten wurden die Lichtenergie und deren Schwarzkörperabsorption bedacht.
Die zündfähige optische Leistung ist nicht nur abhängig von der Konvergenz, Homogenität oder Divergenz des Strahls, sondern insbesondere von der Lichtenergie sowie dem Aufbau der Leuchte. Diese wird jedoch nicht berücksichtigt oder bewertet.
Wir konnten nachweisen, dass im Verkehr befindliche Ex-Strahler unsicher sind.
Mit besser werdendem Wirkungsgrad von LED Leuchtmitteln steigt das Risiko.

Wir sind der Meinung es wäre sinnvoll und sicher, die optisch emittierte Leistung in die Gefährdungsbeurteilungen von Leuchten mit aufzunehmen, sei es…

1. …um den Lichtstrahl in die Erwärmungsmessung mit einzubeziehen
2. …oder die Regel der 60079-28 auch für Ex- Strahler zu postulieren.

Uns erscheint die erste Option am sinnvollsten und wir würden ein zweiteiliges Prüfverfahren empfehlen:

1. Um auszuschließen, dass eine Verschmutzung der Scheibe zündfähige Temperaturen erreicht, schlagen wir vor die Messung der maximalen Oberflächentemperatur um die **Messung am Schwarzen Absorber** vor der Lichtaustrittsöffnung zu erweitern. Dieser schwarze Absorber sollte wärmeleitfähig und zur Lichtquelle hin schwarz sein. Er sollte in ca. 1 mm zur optischen Öffnung entfernt und mechanisch nicht mit den Gehäuseteilen verbunden sein. Die Fläche des Absorbers sollte der Fläche der oder des Lichtstrahles entsprechen. Die so gemessene Temperatur sollte so wie die Oberflächentemperatur des Gehäuses in die Evaluierung der Temperaturklasse einfließen.

2. Bei Multi-LED Arrays oder Reflektorleuchten besteht die Gefahr von Hot-Spots der Gruppen 1 und 2. Diese sind deutlich schwerer messtechnisch zu erfassen. Inwieweit dies nötig ist, ist zu eruieren. Die Entstehung der Hot-Spots wurde in der vorliegenden Ausarbeitung verifiziert. Fraglich ist, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass frei im Raum schwebende Partikel ausreichend positionsstabil sind um zündfähig erhitzt zu werden. Denkbar wäre ein solches Szenario mit Kohlestaub in Gruben oder in Staubatmosphären.

Um Hot-Spots der Gruppen 1 und 2 nachweisen zu können empfiehlt sich eine Fühlermatrix, z.B. schwarze PT100-Fühler, bestückt auf einer nicht wärmeleitenden Platine (SMD oder klassisch). Je feiner das Raster, z.B. 1 mm, desto präziser ist die Messung. Alternativ zu dieser Fühlermatrix könnten auch die Positionen der Hot-Spots rechnerisch ermittelt und dann an dieser Position verifiziert werden. Bei Hot-Spots der Gruppe 1 wäre das einfacher möglich als bei Hotspots der Gruppen 2. Der größte Vorteil der Verwendung einer Fühlerplatine wäre die universelle Einsetzbarkeit auf Seiten der Hersteller und Prüfstellen.

SAMCON

Schillerstraße 17, 35102 Lohra-Altenvers
www.samcon.eu, info@samcon.eu
fon: +49 6426 9231-0, fax: - 31