

Methode zur Quantifizierung optischer Eigenschaften von Lichtleitermaterialien

Grunenberg, Bjarne; Helmer, Melanie; Wepfer, Svenja

Mercedes-Benz AG, Benzstraße, 71059 Sindelfingen

Lachmayer, Roland

Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG)

Zusammenfassung

Im Automobil werden für eine Vielzahl von Anwendungen Lichtleitermaterialien eingesetzt, etwa in Form von Linsen in Scheinwerfern, Abdeckscheiben vor Lichtquellen oder Lichtleitern im Fahrzeuginnenraum. Aus diesem breiten Spektrum von Anwendungsfällen und sich stetig verändernden Anforderungen ergibt sich eine ständig steigende Auswahl an Lichtleitermaterialien. Diese Materialien unterscheiden sich wesentlich in ihren physikalischen Eigenschaften, die es sowohl messtechnisch als auch physiologisch zu bewerten gilt. Damit wird sichergestellt, dass die Materialien die vorgegebenen Anforderungen, beispielsweise bezüglich gewünschter Lichtverteilung und Farbhomogenität, erfüllen.

Bisher dient vor allem die Transmissionsmessung nach DIN EN ISO 13468 zur Bewertung von Lichtleitermaterialien. Anhand dieser lässt sich die Transmission von Lichtleitstrecken bis ca. 10 mm spektral aufgelöst messen und bewerten.

Allerdings betragen typische Lichtleitstrecken im Fahrzeug 25 mm bis 850 mm und sind folglich um ein Vielfaches größer als die bisher in der Norm berücksichtigte Lichtleitstrecke. Daher ist eine Extrapolation der Transmissionsmesswerte nach DIN EN ISO 13468 in Verbindung mit anwendungsspezifischen Versuchen erforderlich, die häufig auf eine experimentelle Herangehensweise zurückgreifen. Diese Versuche sind zum einen ressourcen-, zeit- und kostenintensiv, zum anderen ist eine allgemeingültige und objektive physiologische Beurteilung der Materialien schwierig.

Aus diesem Grund ist eine Methode entwickelt worden, die – im Gegensatz zu der DIN EN ISO 13468 – die optischen Eigenschaften von Lichtleitermaterialien unter Berücksichtigung längerer Lichtleitstrecken und gleichzeitig deren physiologischen Aspekte beurteilt.

Index Terms: *Transmissionsmessung, physiologische Wahrnehmung, Lichtleiter*



1 Einleitung

Durch die allgemein hohen Anforderungen im Automobil, z.B. an Langlebigkeit und Temperaturbeständigkeit, erfüllt nur eine relativ kleine Auswahl an Lichtleitermaterialien die an sie zusätzlich gestellten optischen Anforderungen. Mit zukünftigen gesetzlichen Bestimmungen [1] und durch von vielen Fahrzeugherstellern selbst gewählte Nachhaltigkeitsziele [2] [3] steigt die Nachfrage nach Materialien aus Recyclingkreisläufen.

Weiter sorgt der fortschreitende Klimawandel für kontinuierlich steigende Temperaturen [4], die erhöhte Anforderungen an die Wärmebeständigkeit von Materialien in Fahrzeugen stellen.

Dies führt zu einer steigenden Nachfrage an Materialvarianten, die für ein breiteres Angebot von Seiten der Materialhersteller sorgt. Diese gilt es hinsichtlich ihrer physikalisch-optischen Eigenschaften zu evaluieren.

Dabei ist in vielen Fällen nicht nur eine rein physikalisch-optische Beschreibung der Materialien notwendig, da im Automobil viele Bauteile neben ihrer technischen Funktionalität auch eine dekorative Funktion erfüllen. Vielmehr ist neben der physikalisch/optischen Evaluation der Lichtleitermaterialien auch eine Bewertung hinsichtlich ihrer physiologisch wahrgenommenen (Farb-)Erscheinung notwendig. So sollen z.B. Scheinwerfer, Displayabdeckungen und Funktionsleuchten nicht nur Licht in gewünschter Helligkeit erzeugen, sondern darüber hinaus auch in einer definierten Farbe erscheinen.

2 Stand der Technik

Bisher wird zur physikalischen Beschreibung der optischen Eigenschaften von Lichtleitermaterialien der Transmissionsgrad nach DIN EN ISO 13468 herangezogen, der das Transmissionsverhalten von Lichtleitermaterialien spektral aufgelöst beschreibt.

Abbildung 1 zeigt den schematischen Versuchsaufbau mit Hilfe dessen der Transmissionsgrad nach DIN EN ISO 13468 bestimmt wird: Eine Lichtquelle (1) emittiert durch den Kollimator-Aufbau (2 und 3) ein Lichtbündel in eine Ulbrichtkugel (4). Im Strahlengang zwischen Lichtquelle und U-Kugel befindet sich ein Probenhalter (5).

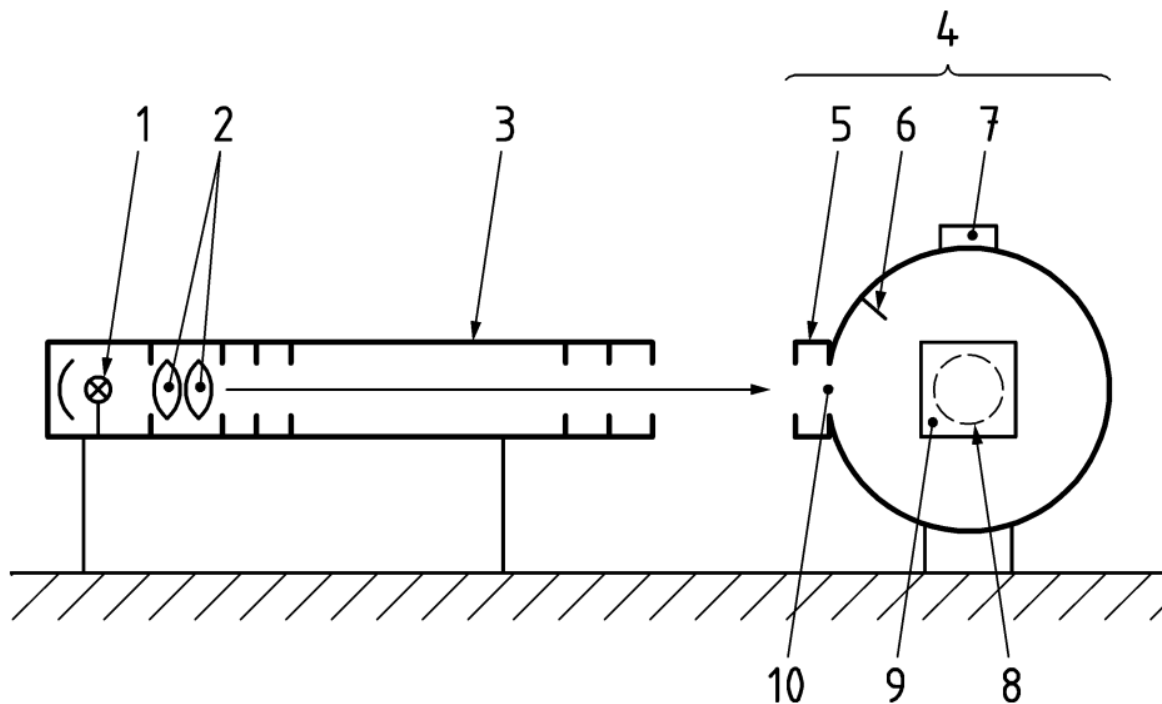


Abbildung 1: Einstrahlinstrument [5]

Für die Ermittlung des Gesamttransmissionsgrades $\tau_{t,gesamt}$ wird der Quotient aus den in der Ulbrichtkugel gemessenen Lichtströmen ohne Prüfling τ_1 und mit Prüfling τ_2 nach der Formel (1) ermittelt.

$$\tau_{t,gesamt} = \frac{\tau_2}{\tau_1} \times 100 \quad (1)$$

Nach gleichem Prinzip kann auch der spektral aufgelöste Transmissionsgrad $\tau_{t,total}$

$$\tau_{t,total} = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} S(\lambda) \times \tau_{t,ges.}(\lambda) \times V(\lambda)}{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} S(\lambda) \times V(\lambda)} \quad (2)$$

ermittelt werden. Dabei ist:

- $S(\lambda)$ die relative spektrale Energieverteilung der Lichtquelle
- $V(\lambda)$ der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad

Mit Hilfe dieses Messverfahrens lässt sich das physikalisch-optische Verhalten eines Lichtleiters spektral aufgelöst beschreiben. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein so ermitteltes Transmissionspektrum.

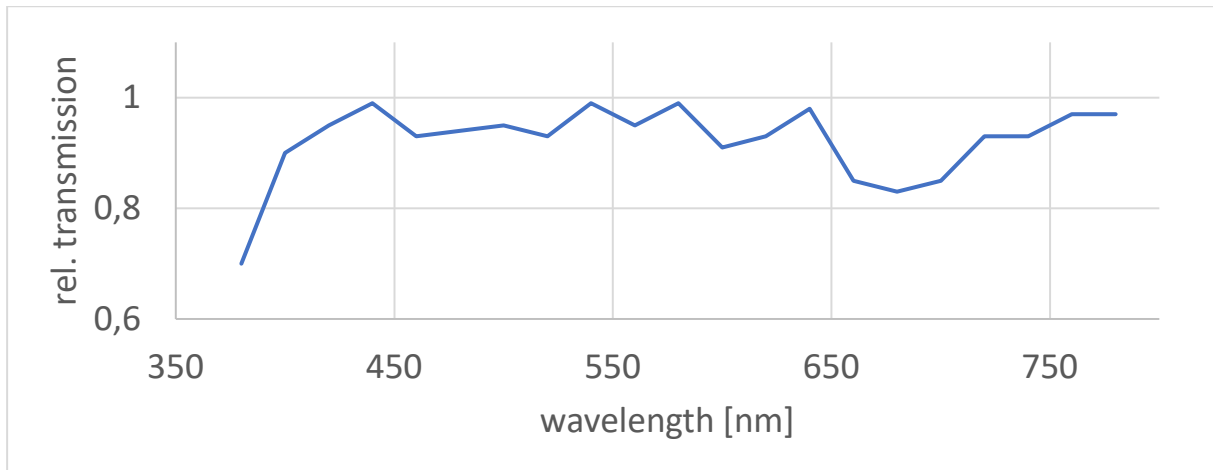


Abbildung 2: Totales Transmissionspektrum, nach EN ISO 13468 ermittelt

Weiterhin zeigt Abbildung 3 die Ergebnisse der Messung des Gesamttransmissionsgrades nach Formel (1) für unterschiedliche Materialien.

No light-guiding material	$\tau_t = 100 \%$
Polycarbonat, virgin	$\tau_t = 88 \%$
Polycarbonat, thermally aged	$\tau_t = 82 \%$

Abbildung 3: Wahrgenommene Farbe und gemessene Transmission für unterschiedliche Materialien

Beide Transmissionsmessungen beschreiben grundsätzlich das physikalische Verhalten des Lichtleitermaterials: So lässt sich mit Hilfe dieser Werte beispielsweise feststellen, wie sich der Lichtstrom eines optischen Systems verändert, wenn dieser durch einen Lichtleiter geführt wird.

3 Diskussion Stand der Technik

Das Transmissionspektrum (Abb. 2) lässt keine direkte Interpretation der Farbwahrnehmung zu. Abbildung 3 zeigt für ein gealtertes Material einen reduzierten Transmissionsgrad gegenüber dem Vergleichsmaterial (Abb. 3 Mitte), allerdings auch eine erheblich anders wahrgenommene Farbe ohne direkte Korrelation dieser Werte zueinander.

Beide Kennwerte können nicht intuitiv interpretiert werden, um eine Aussage zu treffen, wie ein Mensch das transmittierte Licht wahrnimmt. Es wird nicht deutlich, wie das Lichtsystem unter physiologischen Gesichtspunkten auf einen Betrachter wirkt.

Da dieses Problem bekannt ist, werden in der Praxis bisher für spezifische Anwendungsfälle auf Basis von Materialdatenbanken, die u.a. das Transmissionspektrum beinhalten, sowie mit anwendungsfall-bezogenen CAD-Modellen Simulationen durchgeführt, um die physiologische Wirkung in Form einer Farbverschiebung an einer Lichtaustrittsfläche auf den Menschen abschätzen zu können. Dabei ist die Qualität der Ergebnisse stark abhängig von der Güte der Simulationsparameter.

Aufgrund der Tatsache, dass CAD-Modelle mit konkreten Ziel-Geometrien im Entwicklungsprozess von Fahrzeugen erst sehr spät vorhanden sind, wurde häufig auf Erfahrungswerte mit Lichtleiter-Materialien aus vorherigen Projekten zurückgegriffen. Dies hat zur Folge, dass häufig auf aus vorherigen Projekten bekannte Materialien, die man bereits vor CAD-Modellen und Simulationen im Entwicklungsprozess spezifizieren konnte, zurückgegriffen wird. Wegen der im Abschnitt 1 aufgeführten Gründe steht die Automobilindustrie aktuell vor der Herausforderung, eine Vielzahl neuer Materialien, etwas aus Recycling oder biobasiert, auf Eignung für Projekte in einer möglichst frühen Entwicklungsphase zu prüfen. Es wird eine Methode gesucht, die mit einfachen Parametern den Einfluss eines Lichtleitermaterials auf die physiologische Wahrnehmung beschreibt.

4 Anforderung an Messmethode

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, sollten die Messergebnisse der Methode allgemeingültige Aussagen treffen können, um eine Materialauswahl in einer möglichst frühen Konzeptphase treffen zu können.

Weiterhin soll die Methode möglichst lange Lichtleitstrecken untersuchen können. Die EN ISO 13468 sieht Proben mit Lichtleitstrecken bis 10 mm vor. Diese Daten werden bisher bei der Materialauswahl für reale Bauteile (Länge bis 1000 mm) extrapoliert. Ideal wäre allerdings eine Methode, die die reale Länge der Lichtleitstrecke abbildet, um Unsicherheiten durch die Extrapolation zu vermeiden.

Zusätzlich ist eine örtliche Auflösung der Lichtleitstrecke wünschenswert, um untersuchen zu können, wie sich Lichttransmission und Farbverschiebung über die Lichtleitstrecke verhalten. Die EN ISO 13468 bietet lediglich einen Vergleich zwischen einfallendem Lichtstrom und austretendem Lichtstrom. Aussagen über das Verhalten des Lichtes innerhalb der Lichtleitstrecke können nicht gemacht werden.

Primär ist die Anforderung an eine neue Messmethode, die physiologische Wirkung des Lichtleiters zu beurteilen. Dies ermöglicht eine Beurteilung des Lichtleitermaterials ohne einen experimentellen Aufbau mit Zielgeometrie.

5 Methode zur Quantifizierung optischer Eigenschaften von Lichtleitermaterialien

5.1 Aufbau

Als Prüfling dient eine Platte von $150 \times 200 \times 5 \text{ mm}$ ($b \times l \times h$), die per Spritzguss hergestellt wird (Vergleich Abb. 4). Diese Geometrie ermöglicht neben der Bestimmung der optischen Eigenschaften u.a. auch die mechanische Bewertung des Lichtleitermaterials, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Das Werkzeug zur Herstellung des Prüflings ist auf einer der beiden großen Flächen, die sich aus der Geometrie ergeben, mit einer Narbung nach VDI-Richtlinie 3400 (Ref. 27) ausgestattet, die als Auskoppelstruktur dient. Um ungewollte Lichtauskopplung zu minimieren, sollten die anderen Flächen mindestens strichpoliert sein.

Dieser Prüfling wird so in eine Haltevorrichtung eingespannt, dass man mithilfe einer LED-Lichtquelle an einer der 150 mm langen Flächen Licht einkoppelt, um die Lichtleitstrecke durch den Prüfling entlang der Länge l zu maximieren. Das Spektrum der Lichtquelle hat einen entscheidenden Einfluss auf die Messergebnisse. Für diesen Aufbau wurde eine LED des Typs D6RTB-EKG von Dominant Opto Technologies verwendet. Dies ist eine RGB-LED, die speziell für den Automotive-Bereich entwickelt wurde und ein für farbeinstellbare LEDs typisches Lichtspektrum aufweist.

Die der Auskoppelstruktur abgewandte Seite des Prüflings wird mit einer Leuchtdichtekamera, wie in Abb. 4 dargestellt, beobachtet. Durch den definierten Abstand x von Prüfling zu Leuchtdichtekamera lässt sich hochaufgelöst die Leuchtdichte L und der Farbort E in Abhängigkeit der Breite b und Länge l des Prüflings ermitteln.

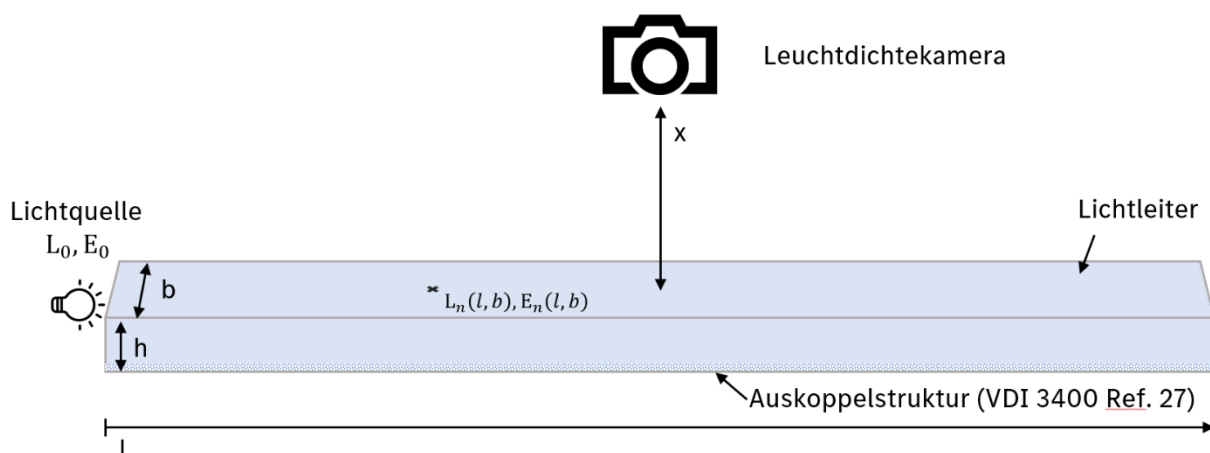


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit Leuchtdichtekamera zur ortsaufgelösten Messung der Leuchtdichte und Farbe.

Resultierend aus der Anordnung des Messaufbaus lassen sich daher Leuchtdichte L und Farbe E allgemein beschreiben als:

$$L(l, b) = f(l, b) \quad (3)$$

$$E(l, b) = \begin{pmatrix} u'(l, b) \\ v'(l, b) \end{pmatrix} \quad (4)$$

5.2 Bestimmung mittlere Leuchtdichte

Aus Formel 3 lässt sich durch Doppelintegration entlang l und b die mittlere Leuchtdichte des Prüflings wie folgt bestimmen:

$$\bar{L} = \frac{1}{l * b} * \iint L(b, l) db dl \quad (5)$$

Die mittlere Leuchtdichte wird analog zu dem Transmissionsgrad (vgl. Formel 1) verwendet, um indirekt zu bestimmen, wie viel Licht von dem Lichtleiter absorbiert wird. Die mittlere Leuchtdichte ermöglicht relative Vergleiche zwischen unterschiedlichen Lichtleitermaterialien.

Tabelle 1 zeigt beispielhaft eine Vergleichsmessung von zwei Polycarbonat-Prüflingen.

Tabelle 1: Beispiel gemessener Leuchtdichten Polycarbonat-Lichtleiter

Werkstoff	Mittlere Leuchtdichte \bar{L} [cd/m ²]	Relative Leuchtdichte [%]
Polycarbonat	4,58	100 %
Polycarbonat, thermisch gealtert	4,18	91,3 %

5.3 Bestimmung Farbverschiebung

Um die Wirkung der Lichtleitmaterialien auf die menschliche Farbwarnnehmung zu beurteilen, wird auf den CIELUV-Farbraum zurückgegriffen. Im CIELUV-Farbraum entsprechen die Farbabstände in dem Farbraum den empfindungsgemäßen Abständen zwischen Farbreizen. [6]

Der Farbort wird zunächst nach Formel 4 orts aufgelöst bestimmt.

Um Rauschen, verursacht durch Auskoppelstruktur und Kamerasensor, zu unterdrücken, ist über die Breite b zu integrieren. Daraus ergibt sich Formel 6:

$$E(l) = \frac{1}{b} \int E(l, b) db \quad (6)$$

Auf Grund der Korrelation von Farbabständen im CIELUV-Farbraum und den empfindungsgemäßen Abständen zwischen Farbreizen kann daher, basierend auf dem euklidischen Abstand, die Farbverschiebung ΔE wie folgt bestimmt werden:

$$\Delta E(l) = \sqrt{(u'_0 - u'(l))^2 - (v'_0 - v'(l))^2} \quad (7)$$

Abbildung 5 visualisiert beispielhaft, wie ΔE an der Stelle n berechnet wird.

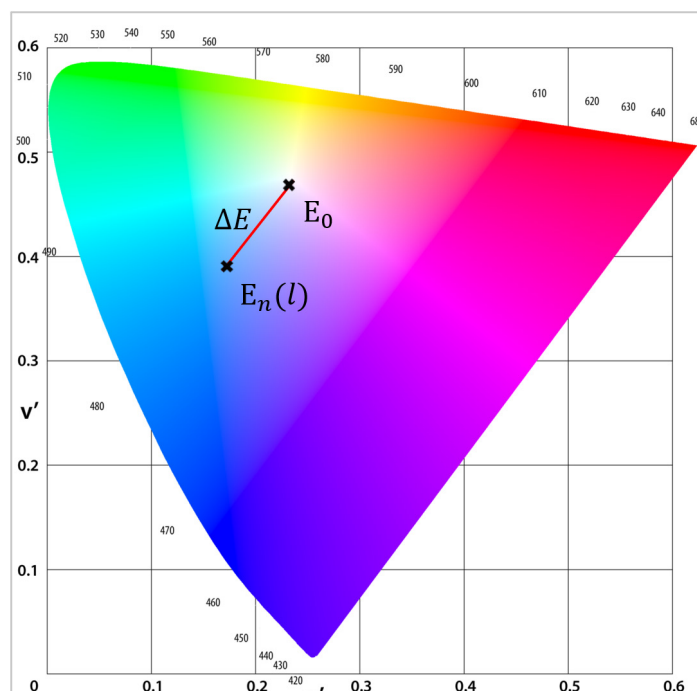


Abbildung 5: Farbverschiebung ΔE an der Stelle n , nach [7] bearbeitet

Ermittelt man diese Farbverschiebung für jeden Farbort entlang der Länge l , erhält man eine Farbortverschiebung in Abhängigkeit der Lichtleitstrecke. Abbildung 6 zeigt einen solchen Verlauf beispielhaft. Es wird ersichtlich, dass die Farbverschiebung ΔE einen proportionalen Zusammenhang zur Lichtleitstrecke L zeigt.

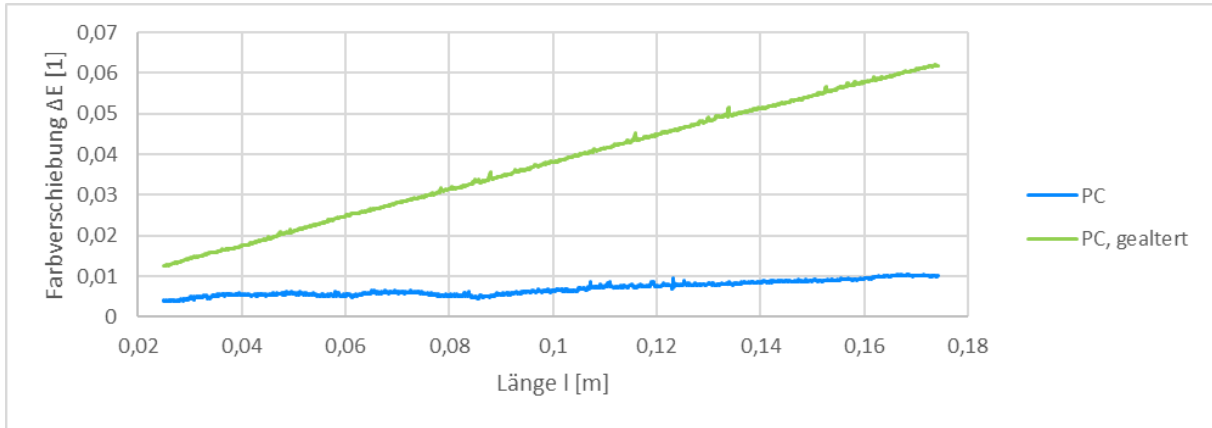


Abbildung 6: Farbverschiebung ΔE in Abhängigkeit der Lichtleitstrecke l

Es kann vereinfacht angenommen werden, dass die Farbverschiebung ΔE nach der Formel

$$f(x) = a * x + b \tag{8}$$

linear verläuft. Die Farbverschiebung kann in die Komponenten a und b zerlegt werden, wobei die Steigung a die wahrgenommene Farbverschiebung, die durch das Lichtleitermaterial verursacht wird, repräsentiert.

Die Verschiebungskonstante b drückt alle Effekte auf die Farbwahrnehmung aus, die außerhalb des Lichtleiters (Einkopplung/Auskopplung, Toleranz der Lichtquelle, absolute Messgenauigkeit der Leuchtdichtekamera) entstehen.

Für die in Abb. 6 gezeigten Materialien ergibt sich folgende Farbverschiebung:

Tabelle 2: Beispiel gemessener Farbverschiebungen Polycarbonat-Lichtleiter

Werkstoff	Farbverschiebung $\Delta E/l$ [1/m]
Polycarbonat	0,0335
Polycarbonat, gealtert	0,341

5.4 Interpretation der Messergebnisse

Die in Abschnitt 5.2 und 5.3 beschriebenen Indikatoren ermöglichen eine einfache Quantifizierung und den Vergleich von unterschiedlichen Lichtleitermaterialien.

Die mittlere Leuchtdichte (vgl. Abschnitt 5.2) ermöglicht eine Abschätzung, wie stark der Lichtstrom einer Lichtquelle sein muss, um eine gewünschte Zielhelligkeit am Austritt des Lichtleiters zu erreichen.

Die ermittelte Farbverschiebung pro Meter $\Delta E/l$ (vgl. Abschnitt 5.3) ermöglicht eine schnelle Bewertung, ob ein Material für eine gegebene Anwendung geeignet ist. Für eine Anwendung kann dies beispielsweise folgendes bedeuten: Wenn eine maximal tolerierbare Farbverschiebung ΔE_{max} oder die zu erwartende Lichtleitstrecke l_{max} bekannt ist, lässt sich durch entsprechendes Umstellen nachfolgender Formel (9) die Eignung eines Lichtleitermaterials für einen Anwendungsfall prüfen:

$$\Delta E/l = \frac{\Delta E_{max}}{l_{max}} \quad (9)$$

5.5 Genauigkeit und Messunsicherheit

Um sicherzustellen, dass die beschriebene Methode geeignet ist, reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, um die Genauigkeit bzw. Messunsicherheit zu bestimmen. Dazu wurde der Versuchsaufbau zunächst in seinen Lagerzustand gebracht. Anschließend wurde er so aufgebaut, dass der Prüfling in seiner Halterung fixiert wurde, die Leuchtdichtekamera positioniert und fokussiert wurde und eine Messung, samt der unter Abschnitt 5.2 bzw. 5.3 dargestellten Rechenschritte, durchgeführt wurde.

Dies wurde mit drei Lichtleiter-Prüflingen mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften (PMMA, PC, PMMA verfärbt) jeweils zehn Mal wiederholt.

Bei den Wiederholversuchen zur Bestimmung der Mittleren Leuchtdichte \bar{L} wurde für alle drei Prüflinge eine relative Standardabweichung von <1,5% ermittelt.

Hinsichtlich der Wiederholbarkeit der Farbverschiebungsmessung wurde eine relative Standardabweichung von <1,4% ermittelt.

Die Messunsicherheit ist daher nicht vernachlässigbar, aber für viele Anwendungsfälle ausreichend.

6 Zusammenfassung

Die vorgestellte Methode ist geeignet, Lichtleitermaterialien hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften zu bewerten.

Gegenüber der EN ISO 13468 lassen sich Kennwerte ableiten, die direkt die menschliche Farbwahrnehmung in Abhängigkeit der Lichtleitstrecke widerspiegeln.

Mit diesem Kennwert lässt sich die Eignung von Lichtleitermaterialien für eine gewünschte Anwendung gut vorhersagen.

Allerdings wurden Aussagekraft und Wiederholbarkeit nur für RGB-LEDs untersucht. Es gilt noch zu untersuchen, inwiefern die Ergebnisse der Methode auf andere Lichtquellen, die ein anderes Emissionsspektrum aufweisen, übertragbar ist.

Daher soll eine Versuchsreihe mit geänderten Lichtquellen, im Speziellen weißen LEDs mit anderem Spektrum, im Vergleich zu RGB-LEDs durchgeführt werden.

7 Referenzen

- [1] Europäische Kommission, End-of-life vehicles Regulation, 2024. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_en (Abgerufen: 01.08.2024)
- [2] Mercedes Benz AG, Climate and Decarbonisation Strategy, 2023
<https://group.mercedes-benz.com/dokumente/investoren/presentationen/mercedes-benz-ir-esg23-presentation-markus-schaefer.pdf> (Abgerufen: 17.07.2024)
- [3] Volkswagen AG, Nachhaltigkeitsbericht 2023
<https://www.volkswagen-group.com/de/publikationen/weitere/nachhaltigkeitsbericht-2023-2674> (Abgerufen: 17.07.2024)
- [4] Sechster Sachstandsbericht des IPCC, 2021: Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, doi:10.1017/9781009157896.002
- [5] DIN EN ISO 13468-1:2019, Singlebeam instrument, 2019
- [6] DIN EN ISO 11664-5:2017-01, Colorimetry – Part 5: CIE 1976 L*u*v* Colour space and u', v' uniform chromaticity scale diagram, 2017
- [7] Wikipedia, Chromacity Diagram "Adoniscik", 2008
https://de.wikipedia.org/wiki/CIELUV-Farbraumsystem#/media/Datei:CIE_1976_UCS.png
(Abgerufen: 29.07.2024)

