

**Schutzlacke, Lötstopplacke und Vergussmassen –
optische Anforderungen und Leistungsfähigkeit
bei LED-Anwendungen**

**Dr. Manfred Suppa
Holger Leiner
Johannes Tekath**

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	1
Allgemeines zur Physik der Farbe.....	2
Die Remission von Oberflächen.....	2
Das Messen von Farben – die Farbmeterik.....	3
Lötstopplacke auf LED-Schaltungsträgern.....	7
Die Schutzlackierung von LED-tragenden Baugruppen.....	12
Der Verguss von LED-tragenden Baugruppen.....	13
Transparenz und Opazität.....	16
Literatur.....	17

Kurzfassung

Der Einsatz von lichtemittierenden Dioden (LED) erstreckt sich auf immer mehr Anwendungsgebiete und wird konventionelle Lichtquellen weiterhin aus immer mehr Bereichen verdrängen. Je nach Einsatzzweck sind für die Leiterplatte als unmittelbarer LED-Bauteileträger bzw. den verwendeten Lötstopplack als Substratoberfläche, reflektierende, streuende oder lichtabsorbierende Eigenschaften gefordert. Darüber hinaus bestimmt der Einsatzzweck die Notwendigkeit von eventuellen Isolationsmaßnahmen für die Baugruppe durch Conformal Coatings bzw. Schutzlacke oder 2-Komponenten-Vergussmassen, welche die optischen Eigenschaften der LED trotz möglicher Abdeckung auch langfristig weitestgehend unbeeinflusst lassen müssen. Dieser Beitrag geht auf folgende Aspekte der Verwendung von Lacksystemen im Bereich von Schaltungsträgern in Kombination mit LED ein:

- Welche unterschiedlichen optischen Anforderungen bestehen an die Substratoberfläche? Inwieweit lassen sich diese Anforderungen mit verschiedenen Lacken als „Endoberfläche“ realisieren?
- Welche klassischen lacktechnischen Kriterien, Prüfungen und Bewertungsmaßstäbe können für eine optische Charakterisierung zugrunde gelegt werden? Welche Besonderheiten sind hier zu berücksichtigen? Wie sehen typische Ergebnisse aus? Diese Aspekte werden insbesondere hinsichtlich der Farbstabilität/Vergilbungsbeständigkeit von verschiedenen weißen Lötstopplacken unter verschiedenen Verarbeitungs- und Prüfbedingungen im Detail diskutiert.
- Welche Besonderheiten zeigen diese Lacksysteme bei der Verarbeitung im Vergleich zu konventionellen Anwendungen? Wie sehen typische Lösungsansätze aus?
- Welche Einsatzmöglichkeiten eröffnen klar-transparente 2-Komponenten-PUR-Vergussmaterialien bei der Verwendung als „LED-Abdeckung“ auch bei Verwendung von Effektzusätzen? Wie sind die bisherigen Erfahrungen hinsichtlich der Langzeitstabilität unter verschiedenen Einsatzbedingungen? Hier werden insbesondere Untersuchungen bezüglich Temperaturlagerung und UV- bzw. Witterungsbeständigkeit diskutiert.

Allgemeines zur Physik der Farbe

Eigentlich gibt es in der (unbelebten) Natur keine Farbe. Farbe wird erst durch unser Sinnesorgan – das Auge – oder genauer durch das Gehirn als Farbeindruck erzeugt. Auch unser sichtbares Licht ist eine elektromagnetische Strahlung der Wellenlängen im Bereich von etwa 380 bis 760 nm. Dieser Wellenlängenbereich wird als das sichtbare Spektrum bezeichnet, welches uns in seiner Gesamtheit dann als weißes Licht erscheint. Die Farbigkeit des Lichts kann in der Natur an der Ausbildung des Regenbogens beobachtet werden, der durch Lichtbrechung an Wassertröpfchen entsteht und die Aufteilung des Sonnenlichts in seine Spektralfarben darstellt.

Das Licht wird auf der Netzhaut unseres Auges als sogenannter Farbreiz wahrgenommen. Im Gehirn wird es dann zu einer Farbempfindung oder Farbeindruck weiterverarbeitet. Über ein Linsensystem mit Blenden (Pupille und Regenbogenhaut) tritt das Licht in das Auge ein und gelangt dort auf die Netzhaut. Die Netzhaut ist eine Schicht von Sinneszellen, welche das Licht in elektrische Impulse umwandelt, die dann über den Sehnerv in das Gehirn geleitet werden. Es existieren zwei verschiedene Sorten von Sinneszellen. Die sogenannten Stäbchen sind für das Hell-Dunkel-Sehen zuständig und die Zäpfchen für das Farben-Sehen. Von den Zäpfchen gibt es wiederum drei Arten, die jeweils auf einen bestimmten Wellenlängenbereich des Lichts ansprechen.

Warum dieser Exkurs in die Biologie unseres Auges? Die Farbe als Sinneseindruck ist eine subjektive Größe und die visuelle Farbbeurteilung ist daher immer ungenau und auch schlecht reproduzierbar zu bewerten. Zudem korrigiert unser Auge-Gehirn-System den Farbeindruck. Während unser Glühbirnenlicht, wenn wir uns im Raum befinden, als „weißes Licht“ empfunden wird, sieht es beispielsweise von der Straße aus betrachtet deutlich gelbstichig aus. Eine Farbbeurteilung bei künstlichem Licht kann daher sehr zweifelhaft sein. Bezüglich der Lichtquellen unterscheidet die Farbmeterik verschiedene (normierte) Lichtarten, welche die Farbmesswerte beeinflussen können. Mit D 65 wird beispielsweise das „normierte“ Sonnenlicht bzw. Tageslicht beschrieben, mit A das Glühlampenlicht oder F2 das Licht einer Leuchtstofflampe. In diesem Kontext wird mit D 65-Licht gemessen.

Die Remission von Oberflächen

Körper können elektromagnetische Strahlung reflektieren, streuen oder absorbieren. Diese Vorgänge sind auch abhängig von der Wellenlänge. Auf das sichtbare Licht bezogen bedeutet dies, dass ein im Wellenlängenbereich von 380 bis 760 nm völlig absorbierender Körper keine Strahlung zurückgibt, die im Auge einen Sinneseindruck hervorruft – dieser Körper ist schwarz. Ein Körper, der alle einstrahlenden Wellenlängen (von weißem Licht!) zurücksendet, erscheint weiß.

Die Kerngröße einer „optischen“ Oberfläche ist die sogenannte Remission. Unter Remission ist das von einem Körper zurückgeworfene – das gestreute – Licht definiert. Ideal weiße Körper zeigen hier eine gleichmäßige Remission aller Wellenlängen von 100 %, schwarze Körper zeigen keine Remission. Ideal graue Körper zeigen eine gleichmäßige Remission der Wellenlängen zwischen > 0 und < 100 %. Farbige Körper dagegen eine selektive Remission, das bedeutet eine teilweise Absorption von Licht, so dass das zurückgeworfene Licht nur noch aus verschiedenen Wellenlängenbereichen besteht und so einen farbigen Eindruck macht. In Abbildung 1 ist die Remissionskurve eines weißen fotostrukturierbaren Lötstopplackes dargestellt, mit einem Remissionsgrad von über 90 im farbrelevanten Spektrenteil von 460 bis 700 nm.

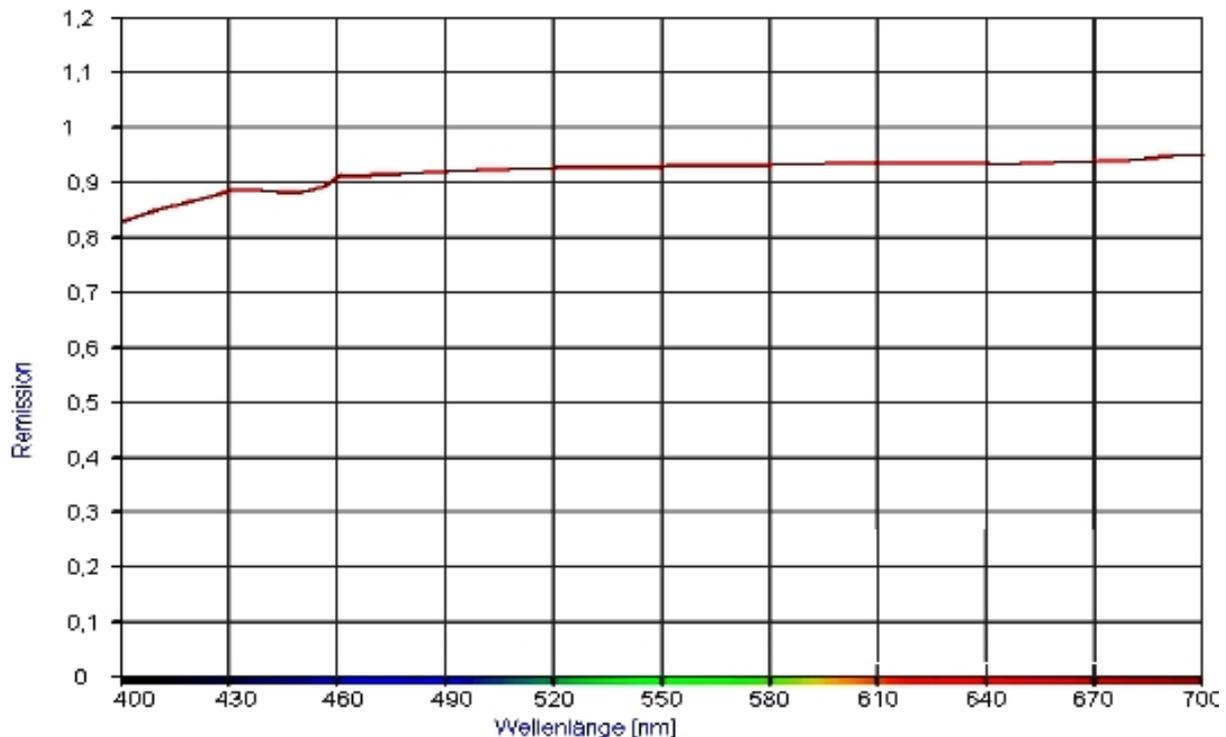


Abb. 1: Remissionskurve eines weißen fotostrukturierbaren Lötstopplackes
(Quelle Lackwerke Peters GmbH + Co KG)

Das Messen von Farben – die Farbmetrik

Um die Farbe oder einen Farbunterschied quantitativ zu beschreiben, kann man die zu messende Oberfläche mit einem definierten Licht beleuchten und misst das zurückgeworfene – das remittierte – Licht. Über mathematische Berechnungen wird sowohl die Art der Lichtquelle als auch der Farbeindruck des Auges bei der Messung von „Farbe“ berücksichtigt. Um eine Farbe in Kenngrößen zu fassen, benutzt man sehr häufig das sogenannte CIE-Lab-System (genauer das L^{*}-, a^{*}-, b^{*}-System der CIE¹). Dieses Lab-System basiert auf einer Transformation der primär berechneten Farbwerte X, Y, Z in die Koordinaten L^{*} (Helligkeit), a^{*} (rot-grün-Wert), und b^{*} (gelb-blau-Wert). Auf die Ableitung zu den Lab-Werten sei hier verzichtet und beispielsweise auf [1] verwiesen.

Der große Vorteil des CIE-Lab-Systems liegt in der Verwendung zum Erfassen von Farbabständen. Die Maßzahl für einen Farbabstand – für die Ähnlichkeit oder Gleichheit von Farben – ist ΔE^* , berechnet als räumlicher Pythagoras aus den drei Größen $L_1^* - L_2^*$, $a_1^* - a_2^*$ und $b_1^* - b_2^*$:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

Um eine weiße Oberfläche zu charakterisieren, kann zum einen die Remissionskurve (Abbildung 1) benutzt werden, zum anderen aber auch die Helligkeitsgröße L^{*} aus dem CIE-Lab-System. Eine ideal weiße Oberfläche hat hierin definitionsgemäß die Koordinaten L^{*} = 100, a^{*} = 0 und b^{*} = 0. Der Vorteil des CIE-Lab-System liegt insbesondere in der Reduzierung der Messgrößen auf drei Zahlenwerte und der Möglichkeit, hiermit – dem Farbempfinden weitestgehend korrelierende – Differenzen zu bilden.

¹ Internationale Beleuchtungskommission (CIE – Commission internationale de l'éclairage)

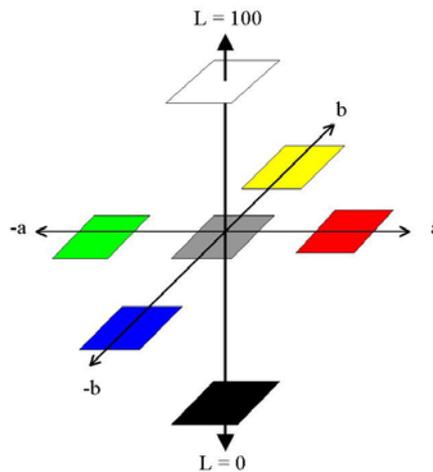


Abb. 2: Schematische Darstellung des CIE-L*a*b*-Systems mit seinen Farbkoordinaten

Farbmetrische Messungen sind in der konventionellen Lackindustrie weit verbreitet und bieten sich als Qualitätskriterium bezüglich der Lieferspezifikation als auch der Eigenschaftsbeschreibung – beispielsweise der Wetter- und/oder Temperaturstabilität – an.

Neben der Auswertung entsprechend dem CIE-Lab-System sei noch auf eine mögliche Beschreibung zur Farbveränderung – der Vergilbung – hingewiesen, wie sie in der Papierindustrie nach DIN 6167 Verwendung findet. Entsprechend der DIN 6167:1980-01 wird von Vergilbung gesprochen, wenn beim beobachteten Material durch eine Behandlung ein nicht gewünschter Gelbwert erkennbar ist. Hier wird aus den primär berechneten X-, Y- und Z-Werten ein Gelbwert G berechnet. Die Veränderung dieses Gelbwertes einer unbehandelten (G_0) und einer behandelten Probe (G_1) wird als Vergilbungszahl V berechnet und bezeichnet.

Die Farbkoordinaten des Lab-Systems – die Werte L^* , a^* und b^* – können mit Farbmessgeräten direkt erfasst werden. Für den Gelbwert G sind in der Regel spezielle Softwaretools erforderlich oder sie müssen manuell aus den X-, Y-, Z-Werten berechnet werden.

Farbmessgeräte sind aufgebaut aus einer Lichtquelle, dem Messkopf mit seinen unterschiedlichen Geometrien und einem Detektor, zum Beispiel einem Spektralphotometer. Von den verfügbaren Messverfahren eignen sich nur die Spektralphotometer zur Aufnahme einer Remissionskurve für den gewünschten Wellenlängenbereich von 380 bis 760 nm. Für die Bestimmung der Farbkoordinaten stehen zwei grundsätzliche Messgeometrien – $45^\circ/0^\circ$ und $d/8^\circ$ (Ulbrichtkugel) – zur Verfügung, die wie im dargestellten Messaufbau einfach kombinierbar sind (Abbildung 3). Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen sind mit der $d/8^\circ$ -Messgeometrie und einer Ulbrichtkugel mit Glanzfalle durchgeführt worden.

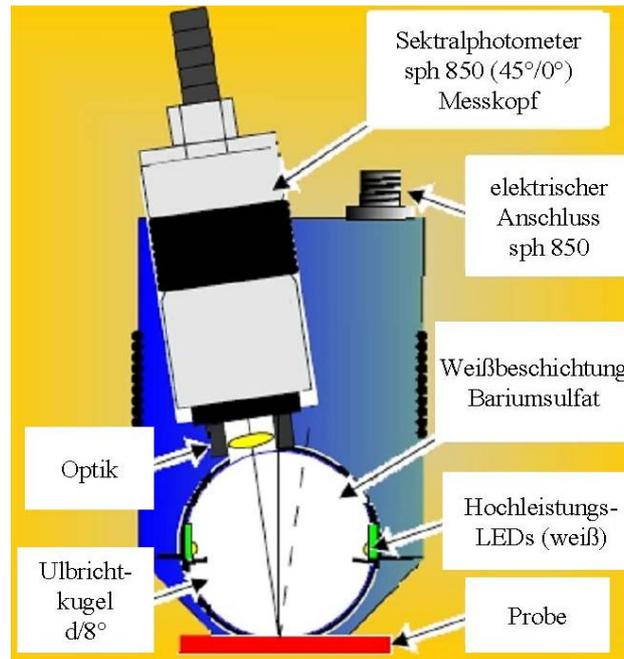


Abb. 3: Schematische Darstellung des Messkopfadapters mit einer d/8°-Geometrie (Ulbrichtkugel)
(Quelle: ColorLite GmbH)

Nach beiden skizzierten Verfahren ergibt sich eine Differenzzahl. Je kleiner die Differenz, die Vergilbungszahl V desto geringer ist die Vergilbung bzw. die Farbänderung. Die gleiche Aussage erhält man – mit etwas anderer Wichtung – wenn im CIE-Lab-System die Differenzwerte ΔE^* , ΔL^* oder Δa^* gebildet werden. Das Thema Vergilbung und Farbmessung ist in [1] detaillierter abgehandelt.

Um eine Wertung dieser Messwerte vornehmen zu können, sei eine Bewertungsskala aus dem Bereich der weißen Heizkörperlacke genannt. Hier wird zum Beispiel in fünf Qualitäten unterschieden:

Die höchste Qualität (geringste Vergilbung) entspricht einer Vergilbungszahl < 1 . Die Abstufungen zur geringsten Qualität entsprechen dann Vergilbungszahlen von < 3 , < 5 , < 8 und < 10 . Weiterhin erhält man folgende Aussagen zu Vergilbungszahlen (V):

- $V = 0-1$: normalerweise nicht sichtbar
- $V = 1-2$: geringe Vergilbung, nur von geschultem Auge sichtbar
- $V = 2-3,5$: mittlere Abweichung, für ungeschultes Auge sichtbar
- $V = 3,5-5$: deutliche Abweichung
- $V > 5$: starke Abweichung

Diese Bewertung lässt sich in guter Näherung auch auf die Interpretation der vorgenannten ΔE^* , ΔL^* - und Δa^* -Werte übertragen. Wegen der weiten Verbreitung und Akzeptanz der ΔE^* , ΔL^* - und Δa^* -Werte zur Charakterisierung von Farbabständen und/oder Farbveränderungen empfiehlt es sich diese Größen zu benutzen. Eine typische L^*, a^*, b^* -Auswertung von drei verschiedenen weißen Lötstopplacken ist in Abbildung 4 dargestellt. Hiermit ist eine detaillierte Interpretation der Farbveränderungen über eine physikalische Messung – verbunden mit Messgrößen – möglich.

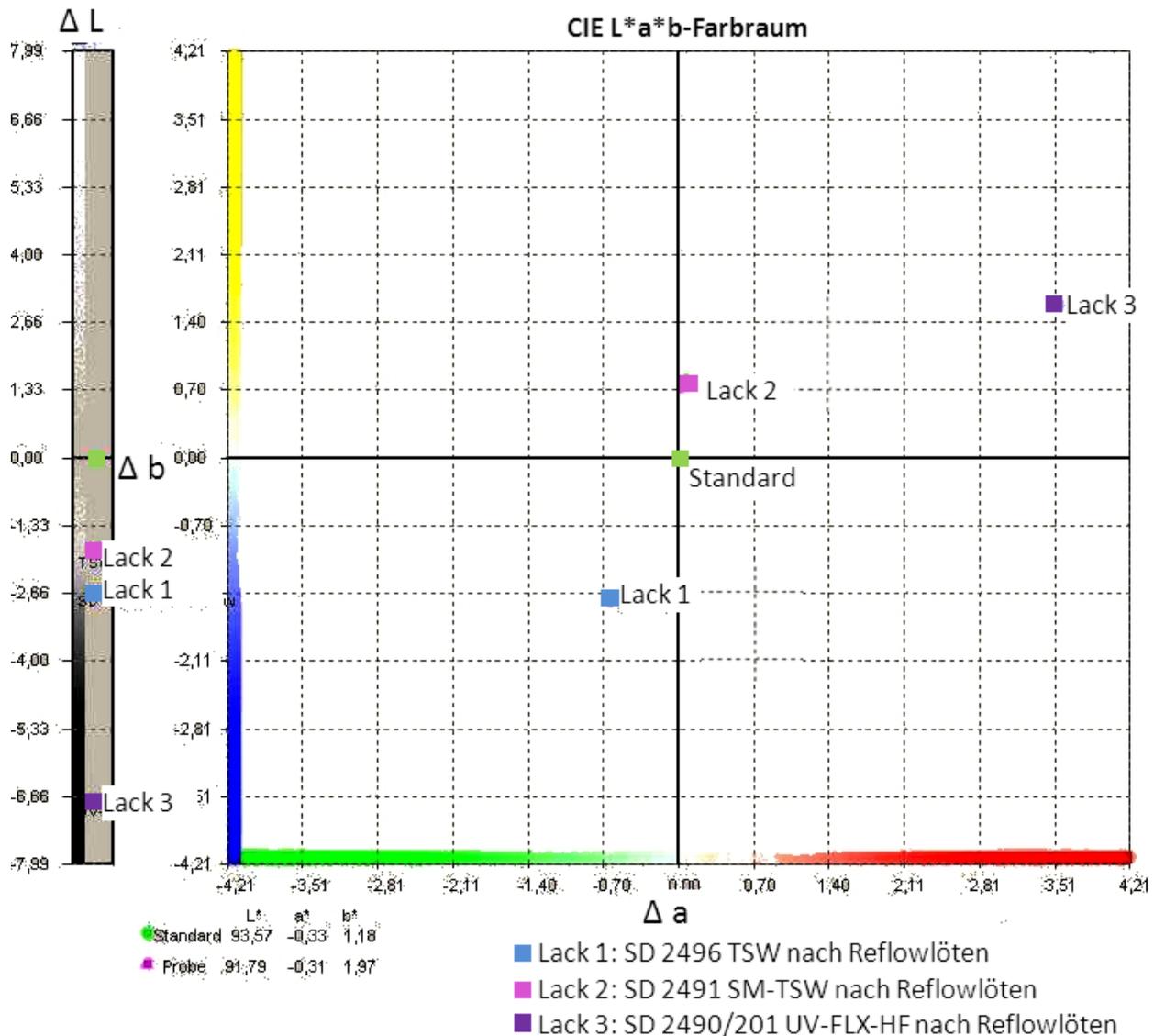


Abbildung 4: Exemplarische Darstellung einer L*,a*,b*-Auswertung von drei verschiedenen weißen Lötstopplacken
Der Abstand zum Ursprung ist ein Maß für den Farbunterschied

Eine weitere der Grundeigenschaften von farbigen Beschichtungsmitteln ist das sogenannte Deckvermögen. Es beschreibt die Fähigkeit die Farbe oder die Farbunterschiede des Untergrundes zu verdecken. Als Kriterium gilt ein hierzu vereinbartes Kontrastverhältnis zwischen den kontrastierenden Feldern des Untergrundes. Das Deckvermögen kommt durch Absorption und Streuung zustande und ist eine Funktion der farbgebenden Pigmente. Bei Weißpigmenten ist es nur eine Folge der Streuung. Das Deckvermögen ist zum einen abhängig von der Schichtdicke, zum anderen auch vom jeweiligen Kontrast des Untergrundes und besitzt einen charakteristischen Grenzwert. Das Deckvermögen kann nicht auf beliebig dünne Schichten eingestellt werden. Die minimal erforderliche Schichtdicke für einen deckenden weißen Lack bei einem Schwarz-Weiß-Kontrast kann mit ca. 40 µm angenommen werden. UV-härtende Beschichtungsmittel – hierzu zählen auch die fotostrukturierbaren Lötstopplacke – müssen im Gegensatz zu den thermisch härtenden Lötstopplacken eine leichte Transparenz aufweisen, um eine ausreichende UV-Vernetzung bis zum Substrat zu gewährleisten.

Das physikalisch begrenzte Deckvermögen hat Konsequenzen bei der Verarbeitung. So sieht ein mit 10 µm Schichtdicke aufgetragener Lack weniger weiß aus als einer von 20 µm Schichtdicke und einer von 30 µm wiederum weißer als der von 20 µm Schichtdicke. Erst ab einer Schichtdicke

von ca. 40 μm ist der weiße Farbton schichtdickenunabhängig – das Deckvermögen ist erreicht. Bei Farbbeurteilungen und Messungen mit Schichtdicken unterhalb des Deckvermögens, d. h. von kleiner ca. 40 μm wird der Untergrund mit beurteilt. Das bedeutet auch eine Abhängigkeit der Remissionskurve und des L^* -Wertes von der Schichtdicke (Abbildung 5).

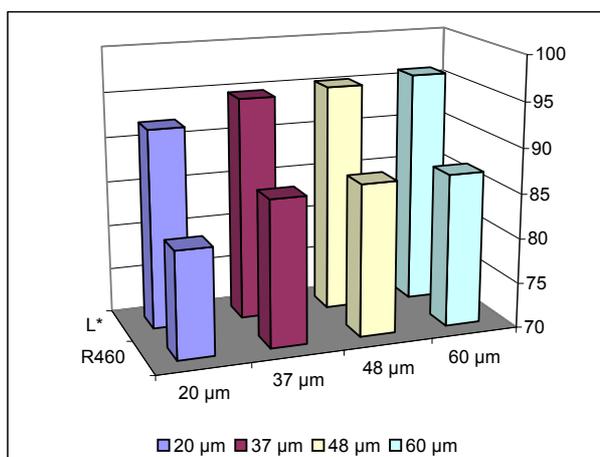


Abbildung 5: Die schichtdickenabhängige Remission bzw. des L^* -Wertes einer weißen Lötstopplacke (Quelle Lackwerke Peters GmbH + Co KG)

In Abbildung 6 ist der gleiche Sachverhalt exemplarisch auch für die Remissionskurve dargestellt. Ein weißer fotostrukturierbarer Lötstopplack ist mit verschiedenen Schichtdicken auf Kupfer appliziert und vermessen worden. Deutlich erkennbar ist das niedrigere Remissionsverhalten bei 20 μm Schichtdicke aufgrund des fehlenden Deckvermögens.

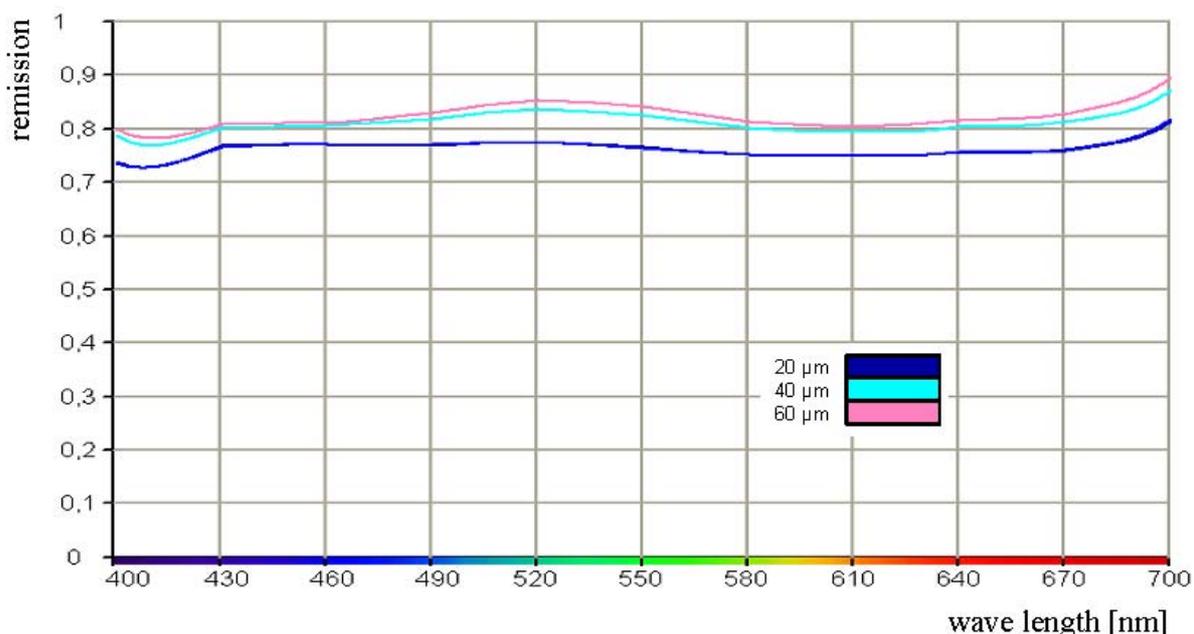


Abbildung 6: Die schichtdickenabhängige Remission einer weißen Lötstopplacke (ELPEMER SD 2491 SM-TSW-R1) über Kupfer (Quelle Lackwerke Peters GmbH + Co KG)

Lötstopplacke auf LED-Schaltungsträgern

Mit dem zunehmenden Einsatz von SMD-LEDs zur Beleuchtung und dem Wunsch nach einer besseren Lichtausbeute kommt die Forderung an den Schaltungsträger, das zwangsweise auf ihn fallende Licht optimal zu remittieren. Unter Remission ist die diffuse Reflexion von Strahlung (Licht)

zu verstehen. Der Schaltungsträger ist in der Regel mit einer Lötstopmmaske abgedeckt, die in diesem Falle neben den elektrischen Isolationseigenschaften und den geforderten chemischen Beständigkeiten neue Funktionalitäten zu erfüllen hat.

Dies kann bei einer weißen Lötstopmmaske das Remissionsverhalten bei einer Anwendung als Hintergrundbeleuchtung sein, aber auch eine hohe Farbstabilität bei Einwirken von Sonnenlicht und/oder Wärme.

Die Lötstopmmaske wird weiß, aber mit der einfachen Aussage „weiß“ sind die tatsächlichen Anforderungen – z. B. eine optimale Remission – nicht erfüllt. Die Eigenschaft der Remission ist eng verknüpft mit der Farbe und kann, wie beschrieben, über farbmimetrische Messungen zahlenmäßig erfasst werden.

Für diese Anwendung können nur eigens hierfür entwickelte Lötstopplacke sowohl höchste Anforderungen bezüglich des Weißgrades, der Remission als auch der Farbstabilität bei Temperaturbelastung und/oder Sonnenlichteinstrahlung erfüllen.

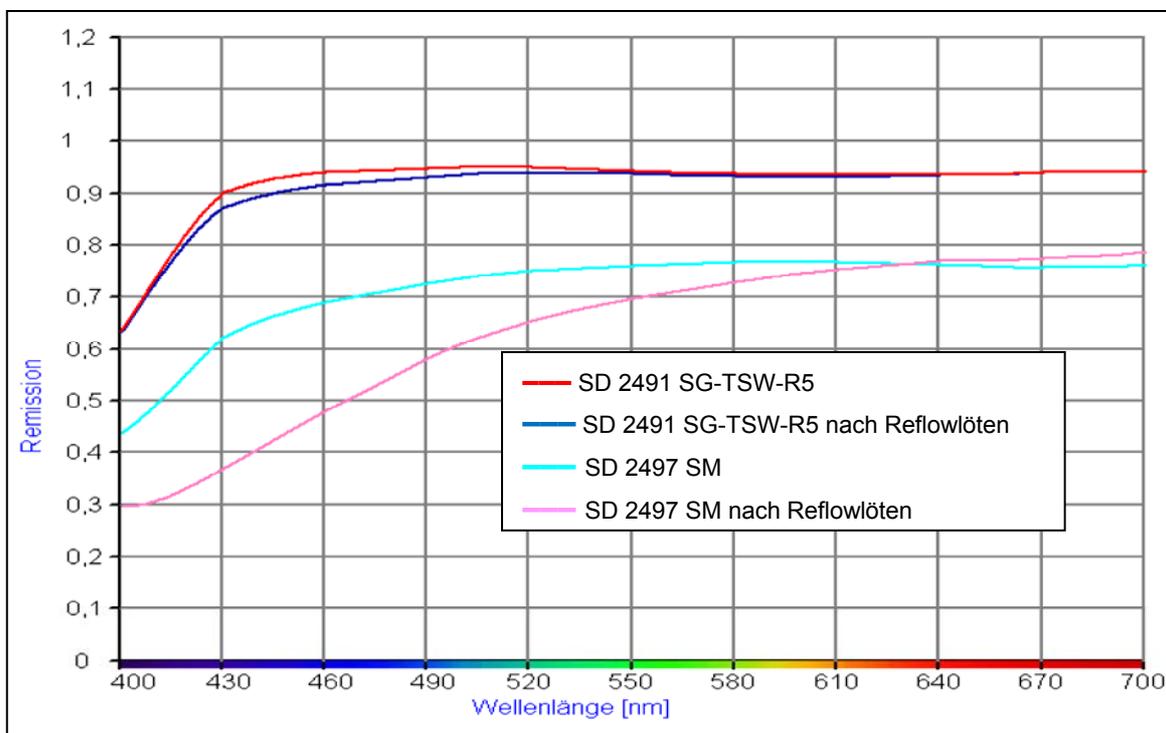


Abbildung 7: Remissionskurven eines klassischen fotostrukturierbaren Lötstopplackes (SD 2497 SM) und eines der neuen Generation (SD 2491 SG-TSW-R5) vor und nach Reflowbelastung
(Quelle Lackwerke Peters GmbH + Co KG)

Lötstopplacke erfahren in ihrem Prozessablauf verschiedene Temperaturbelastungen, die einen sichtbaren Einfluss auf die (weiße) Farbe haben können. Dies ist insbesondere der Lötprozess. Das Resultat ist eine Gelbverschiebung in der Farbe, die Vergilbung. Eine dem Bestücker angelieferte weiße Lötstopmmaske sollte in den nachfolgenden Lötprozessen eine möglichst geringe Farbveränderung erfahren.

Vom Entstehungsmechanismus her gibt es verschiedene Ursachen der Vergilbung:

- durch Wärme,
- durch Sonnenlicht,
- durch Umwelteinflüsse (z.B. Feuchtigkeit, Chemikalien).

In diesem Kontext treten vornehmlich die Vergilbung durch Wärme und durch Sonnenlicht bzw. durch eine sonnenlichtsimulierende, zeitraffende UV-Bestrahlung auf. Eine lichtinduzierte Vergilbung liegt vor, wenn Lichtstrahlung mit einer Wellenlänge von unter 380 nm (UV-Strahlen) auf Polymere auftrifft. Über radikalisch induzierte photochemische Reaktionen bilden sich sogenannte chromophore Gruppen, die eine Färbung verursachen. Unter wärmeinduzierter Vergilbung ist die Ausbildung dieser chromophoren Gruppen zu verstehen, wenn Polymere üblicherweise Temperaturen $> 100\text{ °C}$ für eine längere Zeitspanne ausgesetzt werden.

Die Farbveränderung kann zum einen über die sogenannte Vergilbungszahl und zum anderen über den Farbabstand im CIE-Lab-System messtechnisch bestimmt werden.

Um diese Farbveränderung zu charakterisieren, kann der zuvor beschriebene Farbabstand ΔE^* benutzt werden. Besondere Beachtung bei rein weißen Oberflächen sind den beiden Größen ΔL^* und Δb^* zu widmen. Während ΔL^* die Helligkeitsänderung beschreibt, charakterisiert Δb^* die blaugelb-Verschiebung – in diesem Fall die Vergilbung (siehe Abbildung 4 auf Seite 5). Ein möglichst kleiner Δ -Wert beschreibt die Güte der Farbstabilität der Lötstopplacke. Differenzwerte von kleiner 0,5 sind für ungeschulte Augen im Allgemeinen kaum erkennbar.

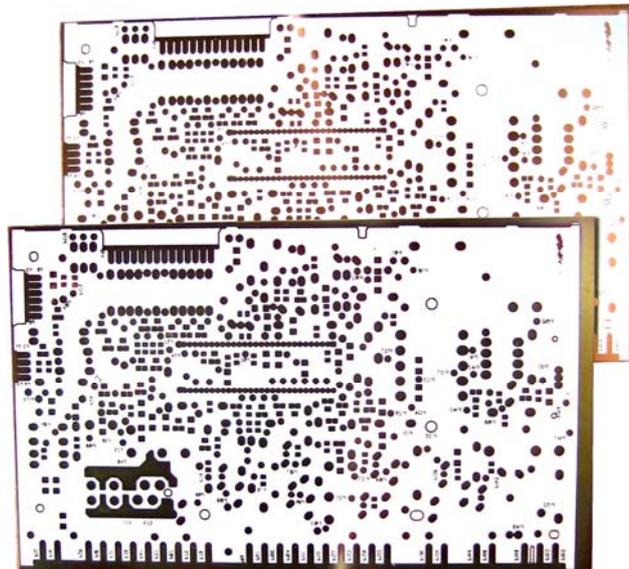


Abbildung 8: Temperaturstabiler weißer fotostrukturierbarer Lötstopplack vor (oben)
bzw. nach dreimaliger Reflowsimulation (unten)
(Die in der Abbildung erkennbare Verfärbung der Lötstopplacke dient nur einer Orientierung.
Die exakte Farbwiedergabe in Printmedien ist kaum möglich.)
(Quelle Lackwerke Peters GmbH + Co KG)

In Abb. 8 ist unten eine Leiterplatte, beschichtet mit fotostrukturierbarem Lötstopplack, nach dreimaliger bleifreier Reflowbelastung dargestellt und oben – die gleiche Leiterplatte – vor dem Reflowprozess. Mit einem Helligkeitswert von $L^* = 93$ zeichnet sich diese Oberfläche mit einer sehr guten Remission aus. Die Farbdifferenzen ΔL^* und Δb^* von kleiner 1 weisen auf eine sehr gute Farbkonzanz auch nach Temperaturbelastung hin.

Generell festzustellen ist, dass die Farbänderung durch Wärmeeinwirkung – die thermische Vergilbung – vornehmlich durch den Sauerstoff hervorgerufen wird. So zeigen Lötverfahren ohne Sauerstoff eine merklich geringere Vergilbung als unter Luft, was allerdings bei den weißen Lötstopplacken neuester Generation visuell nicht mehr erkennbar ist (Abbildung 8).

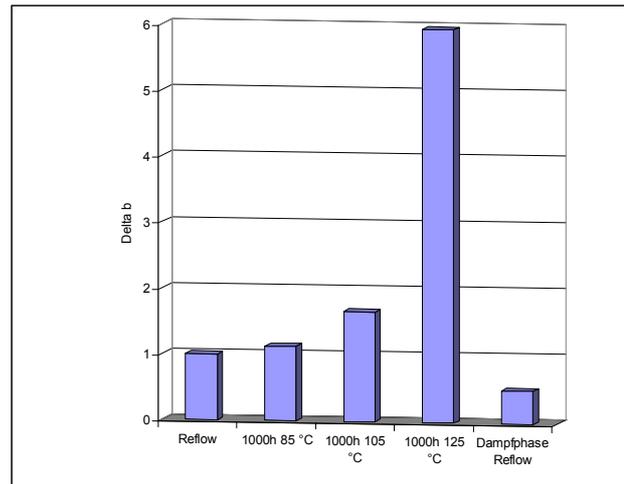


Abbildung 9: Farbveränderung einer Lötstopplacke nach einem Reflowprozess, Dampfphasenlöten und Temperaturdauerlagerungen bei verschiedenen Temperaturen als Δb dargestellt.
(Quelle Lackwerke Peters GmbH + Co KG)

Wie kurz beschrieben, eignet sich die Farbmetrik auch sehr gut zur Beschreibung des Farbverhaltens nach Dauertemperaturbelastung sowie zur Bestimmung von kritischen Dauertemperaturbelastungen. Die Abbildung 9 zeigt die Verschiebung in den die Vergilbung beschreibenden b^* -Werten bei verschiedenen Lagerungstemperaturen und zweier Lötverfahren. Eine Verschiebung zu höheren positiven b -Werten beschreibt eine Vergilbung – hier die Temperaturvergilbung. Die Rot-Grün-Werte a^* sind erwartungsgemäß nicht verändert, was sich auch bei der Temperaturdauerlagerung in Abb. 10 zeigt. Deutlich erkennbar ist, dass eine Dauertemperaturbeständigkeit bis 105 °C gegeben ist. Eine Temperaturbelastung von 125 °C führt in diesem Fall zu einer deutlich sichtbaren Farbverschiebung bzw. Vergilbung. Farbmetrische Untersuchungen dieser Art sind tauglich, Farbbeständigkeiten bei Temperaturdauerlagerungen beispielsweise nach der Normenreihe IEC 60216 [2] zu bestimmen und einen entsprechenden Temperaturindex für die optischen Eigenschaften zu ermitteln.

Der Abbildung 9 ist ferner zu entnehmen, dass insbesondere bei den Lötverfahren weniger die Temperatur, sondern die Kombination Temperatur und Luftsauerstoff die Ursache der Vergilbung ist. So zeigen Lötprozesse unter Stickstoff eine sichtbar geringere Vergilbung als solche unter Normalatmosphäre.

Die elektrische Leistungsfähigkeit der Beschichtung ist durch eine Vergilbung nicht beeinträchtigt. In früheren Untersuchungen haben sich keine mit einer Vergilbung einhergehenden Veränderungen in den elektrischen Eigenschaften gezeigt.

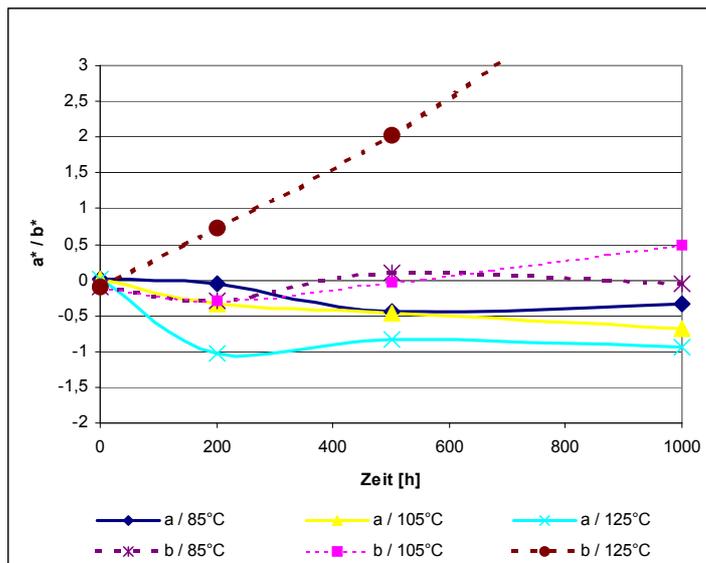


Abb. 10: Farbmetrische Untersuchung des Vergilbungsverhaltens eines weißen Lötstopplackes bei verschiedenen Temperaturdauerlagerungen
(Quelle Lackwerke Peters GmbH + Co KG)

Viele Polymere zeigen unter Einwirkung von Globalstrahlung – umgangssprachlich als Sonnenlicht bezeichnet – mehr oder weniger ausgeprägte Degenerationserscheinungen. Die Endprodukte der sogenannten Photooxidation absorbieren im kurzwelligeren Bereich des sichtbaren Lichts und sind Ursache für den Vergilbungsprozess von Polymeren. Diese Vergilbung trifft insbesondere die Epoxidharze, aus denen üblicherweise Lötstopplacke hergestellt werden. Um ausreichend lichtstabile weiße Lötstopplacke herstellen zu können, mussten diese auf Basis einer anderen Polymerklasse entwickelt werden.

Um die Lichtbeständigkeit bzw. die Vergilbungsbeständigkeit zu ermitteln, können entsprechende Prüflinge in einer sogenannten Freibewitterung über Jahre – zum Beispiel im sogenannten Florida-Test – ausgelagert werden. Um Ergebnisse in kürzerer Zeit zu erhalten, werden verschiedene beschleunigte Bewitterungstests verwendet wie beispielsweise der sogenannte Xenon-Test. Bei diesem Test wird die Probe der Strahlung einer Xenon-Bogenlampe ausgesetzt. Das gefilterte Spektrum und die Bestrahlungsstärke ähneln dem natürlichen Sonnenlicht. Entsprechende Kurzprüfungen sind in verschiedenen DIN-Normen [3, 4] beschrieben. Als Faustregel gilt, dass 250 h etwa einer natürlichen Belastung von einem Jahr entsprechen. In Abbildung 11 sind die Ergebnisse einer farbmetrischen Auswertung verschiedener Lötstopplacke nach UV-Belastung exemplarisch dargestellt. Die Änderungen der Lab-Werte sind in dieser Grafik zur Vereinfachung der Darstellung als Beträge aufgetragen.

Deutlich erkennbar ist die Vergilbung an der Änderung im Δb -Wert (Δb), während die Helligkeitsverschiebung ΔL deutlich geringer ist. Bei den drei exemplarischen Lötstopplacken zeigen sich nach einem XENON-Test von 1000 h sehr gute UV-Beständigkeiten, wobei der 2-Komponenten-Lötstopplack hier mit Abstand die UV-stabilste Version ist. Fotostrukturierbare Lötstopplacke der alten Generation sind hier nicht mit eingezeichnet, sie liegen mit Farbänderungen von über 3 außerhalb jeder Diskussion.

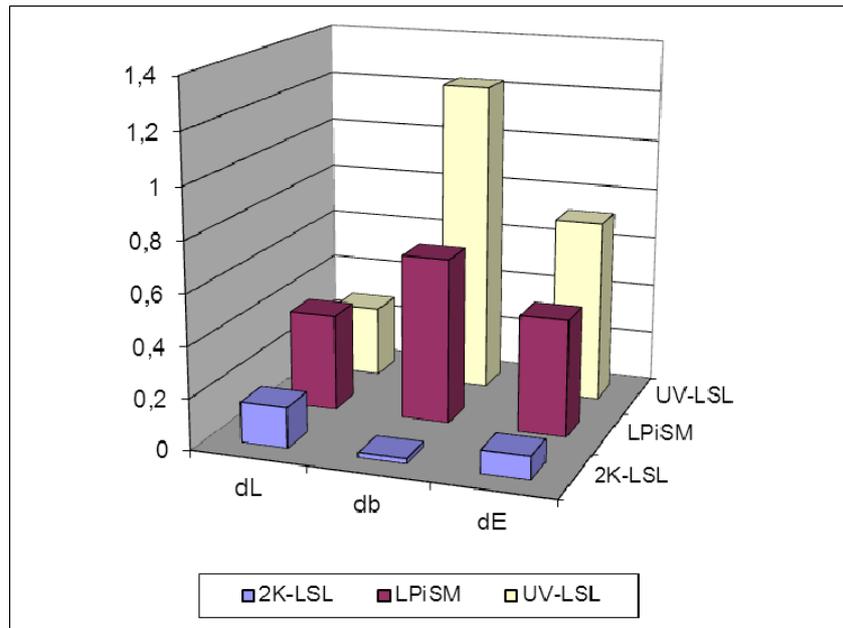


Abbildung 11: Farbmetrische Auswertung der UV-Vergilbung mittels XENON-Test² (1000 h),
exemplarische Vergilbungswerte für: UV-LSL – UV-härtender Lötstopplack
LPiSM – flüssiger fotostrukturierbarer Lötstopplack (liquid photoimageable solder mask)
2K-LSL – 2-Komponenten-Lötstopplack (Quelle Lackwerke Peters GmbH + Co KG)

Durchgeführte Untersuchungen mit einer Lichteinstrahlung von LED-Licht mit einer Wellenlänge von 460 nm über 1000 h zeigen erwartungsgemäß eine visuell nicht erkennbare bzw. kaum messbare Veränderung im Remissionsverhalten. Mögliche Einflüsse sind weniger vom eingestrahlt Licht zu erwarten sondern auf den gleichzeitigen Wärmeeintrag zurück zu führen, der durchaus auf eine Erwärmung von bis zu 100 °C führen kann.

Die Schutzlackierung von LED-tragenden Baugruppen

Die Schutzlackierung kann zum einen den kompletten Schaltungsträger betreffen, zum anderen aber auch den von LEDs ausgesparten Bereich.

Werden die LEDs überlackiert, so ist an die Schutzlackierung neben der elektrischen Isolierung unter harschen Umweltbedingungen auch die Anforderung an eine hohe optische Performance zu stellen, zu der beispielsweise auch die Vergilbungs- und Glanzbeständigkeit zählen.

Eine weitere Möglichkeit der Schutzlackbeschichtung ergibt sich mit weißdeckenden Lacken, die mit einem Selektivverfahren appliziert werden und die LEDs aussparen. Mit diesem Verfahren lassen sich beispielsweise bei einseitig bestückten LED-Schaltungsträgern die dunkelfarbig Bauelemente sehr gut abdecken. Schutz- oder Überzugslacke dieser Art besitzen eine hohe Licht- und Wärmestabilität mit sehr hohen Remissionswerten wie sie in Tabelle 1 exemplarisch für einen lösemittelhaltigen weißen Überzugslack dargestellt sind, mit gleichzeitig guten elektrisch isolierenden Schutzeigenschaften.

² gemäß DIN EN ISO 11341 mit Suntest CPS+, ohne Befeuchtung, Bestrahlungsstärke: 550 W/m²

Eigenschaft	ohne Belastung
Remissionsgrad R_{460}	0,92
Helligkeit L^*	97
rot-grün-Wert a^*	-0,59
gelb-blau-Wert b^*	4,48

Tabelle 1: Exemplarische CIE-Lab-Werte für einen weißen Überzugslack auf LED-Schaltungsträgern

Sollen mit LEDs bestückte Panels zum Schutz gegen Feuchteinwirkungen komplett beschichtet werden, kommen Schutzlacke zum Einsatz, die zum einen die elektrische Isolation unter den verschiedenen atmosphärischen Bedingungen sicherstellen, zum anderen aber auch bezüglich ihrer Wetterbeständigkeit eine sehr geringe Vergilbungsneigung unter diesen Belastungen zeigen.

Die sich bei transparenten Prüflingen ergebenden Messwerte mit der Farbmeterik sind nicht mit den traditionellen Remissionsmessungen zum Beispiel von weißen Lacken vergleichbar. Während sich bei Farbmessungen von farbigen Beschichtungsstoffen vornehmlich die Remissionseigenschaften darstellen, sind es bei transparenten Beschichtungsstoffen vornehmlich die Transmissions- bzw. Absorptionseigenschaften. Bei der Messung erfolgen ein Durchstrahlen des Messkörpers zum reflektierenden Substrat und ein weiteres Durchstrahlen des Messkörpers in den Messwertaufnehmer (Ulbrichtkugel).

Der Verguss von LED-tragenden Baugruppen

Bedingt durch den vermehrten Einsatz insbesondere von Sensoren im Außenbereich wird die Beständigkeit von Vergussmassen oder Gießharzen gegen Witterungseinflüsse und besonders gegen Sonnenlicht gefordert; häufig mit der Anforderung nach einer hohen Transparenz.

Der Verguss von LED-tragenden Baugruppen erfordert daher eine neue Betrachtung der chemischen Basis von Vergussmassen. Typische Vergussmassen auf Basis von Polyurethanharzen sind mit nicht wetter- und sonnenlichtbeständigem Polyisocyanat formuliert.

Eine langzeitige Wetter- und UV-Belastung führt, wie auch die thermischen Belastungen zu sogenannten Alterungsprozessen, die sich auch hier von der physikalischen Betrachtung her, wie in der Abbildung 10 skizziert, in drei Eigenschaftsbereiche einteilen lassen:

- Veränderung von mechanischen Eigenschaften,
- Veränderung von elektrischen Eigenschaften,
- Veränderung von optischen Eigenschaften.

Zu den hier optisch relevanten Eigenschaften zählen vornehmlich der Farbort, der spektrale Reflexionsfaktor, Absorptionskoeffizienten und der Glanz. Ohne auf die photochemischen Details einzugehen, kann die Veränderung des Farbortes, im Allgemeinen als Vergilbung bezeichnet, auf die Bildung von sogenannten Chromophoren³ zurückgeführt werden. Bei Polymeren handelt es sich um die Bildung von ausgedehnteren konjugierten Doppelbindungssystemen, die dann im langwelligen sichtbaren Licht die Strahlung absorbieren und so einen Farbeindruck hervorrufen. Die Vergilbung ist somit eine sichtbare chemische Veränderung im Polymergerüst.

³ Chromophor (griech.) = Farbträger

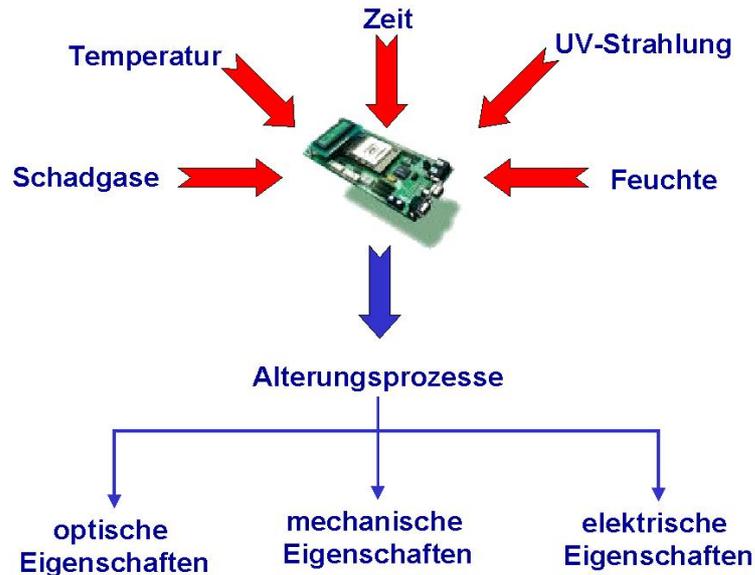


Abbildung 12: Skizzierung von Ursachen und Wirkung bei Alterungsprozessen

Die allgemein verwendeten Vergussmassen und Giessharze zeigen auf Grund ihrer chemischen Basis keine ausreichende Beständigkeit gegen Sonnenlicht, d. h. gegen den UV-Lichtanteil in der Sonnenstrahlung. Hier muss auf spezielle Polyurethanmassen zurückgegriffen werden. Allerdings sind Anforderungen dieser Art noch nicht in die Normen aufgenommen. Individuelle Anforderungen sind mit dem Lieferanten abzuklären.

Klassische 2-Komponenten-Epoxidmassen erleiden durch Witterungseinflüsse Veränderungen in der Oberfläche. Die Folgen zeigen sich in Kreidung und Glanzverlust. Durch UV-Strahlung und Feuchtigkeit wird die oberste Schicht des Bindemittels angegriffen und abgebaut. Damit werden Pigment- und Füllstoffpartikel freigelegt, wodurch es zunächst zur Glanzminderung und später zum Pigment- und Füllstoffabtrag kommt. Dieser Oberflächenabbau ist jedoch – bezogen auf die Gesamtschichtdicke – sehr gering. Das erste Auftreten von Kreidung ist – witterungsabhängig – etwa nach 3 bis 6 Monaten erkennbar. Die Ursache von Kreidung und Glanzverlust liegt in der aromatischen Struktur der Epoxidharze. Härtereinflüsse sind von untergeordneter Bedeutung. Gleichlaufend können Vergilbungen, die allein durch die Sonneneinstrahlung hervorgerufen werden, auftreten. Die Intensität der Vergilbung ist durch den Härter bestimmt.

Ebenso verhalten sich handelsübliche Polyurethane, die in der Regel mit einem aromatischen Härter ausgehärtet werden. Dieser Abbau verstärkt sich noch, wenn es sich bei der Harzkomponente um sogenannte Polyether handelt. Erst mit speziellen Harzsystemen, bei denen ein aliphatisches Isocyanatprepolymer mit speziell ausgewählten Polyolen vernetzt wird, kann von einer angemessenen Lichtbeständigkeit ausgegangen werden. Kurzprüfungen bezüglich der Wetter- bzw. der UV-Beständigkeit sind in der Lack- und Kunststoffindustrie im Einsatz (z. B. Xenon-Test, QUV-Test, Weather-O-Meter), jedoch sind die Ergebnisse mit etwas Vorsicht zu interpretieren. Um einen beschleunigten Abbau zu bekommen, arbeiten diese Verfahren mit UV-Anteilen im Prüfzyklus, die in der realen Außenbelastung nicht vorhanden sind und eine direkte Korrelation mit der gewünschten Wetter- und UV-Beständigkeit ist nicht gegeben. Eine reale Außenbewitterung ist – wenn es die Zeit zulässt – vorzuziehen. Bei den sogenannten Kurzbewitterungen kann es durch die zusätzlich zum Sonnenlichtspektrum eingebrachte kurzwelligere UV-Strahlung zu photochemisch induzierten Abbaureaktionen im Molekül kommen, die in der Realität nicht auftreten können.

Auch die UL 746C [5] beschreibt einen Testzyklus für die Außenanwendung von Polymeren. So ist ein Polymer vorzuschädigen durch:

- 720 h UV-Licht-Belastung
oder
- 1000 h im Xenon-Weatherometer
und/oder
- 7 Tage Wasserimmersion bei 70 °C.

Der Fokus dieser Betrachtungen und Untersuchungen ist die Beeinträchtigung der mechanischen Grundeigenschaften der Polymere. Durch die Bewitterung hervorgerufene Versprödungsprozesse – sogenannte Vorschädigungen – dürfen die Nichtentflammbarkeit nicht verändern und die mechanischen Eigenschaften um 70 bzw. 50 % wie folgt ändern:

Eigenschaft	UV-Belastung	Wasserimmersion
Nichtentflammbarkeitsklasse	unverändert	unverändert
Zug- oder Biegefestigkeit	70 %	50 %
Kerbschlagfestigkeit, Schlagzähigkeit nach Izod oder Charpy	70 %	50 %

Tabelle 2: Kriterien der Eigenschaftsveränderungen für Polymere in der Außenanwendung nach UL 746C

Auf optische Anforderungen lassen sich diese Kriterien sicherlich nicht übertragen, hier sind die geforderten Eigenschaftsänderungen beispielsweise bezüglich der Vergilbung deutlich enger zu fassen. Es sei aber hier die Aufmerksamkeit auf sich bei der UV-Belastung ebenfalls ändernden mechanischen Kenngrößen gerichtet.

Bei transparenten Materialien ist zu beachten, dass diese Messungen beispielsweise auf farbstabilem weißen Substrat durchgeführt werden und sich der Messwert nicht als reiner Reflexionswert wie bei beschichteten Prüflingen darstellt, sondern als Transmissionswert. Das bedeutet, der Farbeindruck entspricht dem Transmissionsgrad, der Absorption der Messstrahlung. Für den Transmissionsgrad gibt es eine Schichtdickenabhängigkeit: Je höher die Schichtdicke ist, umso stärker die Absorption, umso stärker auch der Farbeindruck. Weiter verkompliziert wird der Sachverhalt dadurch, dass die Vergilbung bei transparenten Stoffen nicht gleichmäßig über die Schichtdicke erfolgt. Die Vergilbung zeigt einen Gradienten, d. h., sie nimmt zum Substrat hin ab.

Abweichend von der Norm DIN 6167, aber physikalisch sinnvoll, kann ein Gelbwert insbesondere bei transparenten Materialien durch die Messung der spektralen Transmissionswerte bei den Wellenlängen 450, 550 und 600 nm erhalten werden⁴.

Die so ermittelten Kennzahlen sind als Qualitätskriterium zu verstehen und zu benutzen. Für detailliertere Hinweise auf den optisch wahrgenommenen Farbort eignen sich diese Werte weniger, hier ist eine Berechnung über die Veränderungen der Helligkeitswerte (ΔL^*) und die der Farbwerte (Δa^* und Δb^*) aus dem CIE-Lab-System aussagekräftiger. Die Bewertung der vorgenannten Änderungen in der Vergilbungszahl V entspricht der Wertung in ΔE^*_{ab} .

Bei Temperaturbelastungen und/oder auch Feuchtebelastungen können ebenfalls, wie beschrieben, wärme(hitze-)induzierte Farbveränderungen im Polymer auftreten. Stehen auch hier optische Eigenschaften zur Beurteilung, so können diese entsprechend mit einer Vergilbungszahl beschrieben werden.

⁴ siehe hierzu: DIN 6167:1980-01 Beschreibung der Vergilbung von nahezu weißen oder nahezu farblosen Materialien

Die thermisch induzierte Vergilbung ist dabei kein Maß für die mechanische Zerstörung eines Beschichtungsstoffes. So kann eine schwache Vergilbung mit starken Strukturveränderungen und Versprödungen einhergehen, aber auch eine sehr starke Vergilbung mit nahezu unveränderten Eigenschaften [6].

Transparenz und Opazität

Die Transparenz und die zuvor abgehandelten Größen sind optische Eigenschaften von Materialien. Die Transparenz ist die Eigenschaft eines Stoffes elektromagnetische Wellen durchzulassen, auch als Transmission bezeichnet. Generell gilt dies für jede Art von elektromagnetischer Strahlung, seien es Radiowellen, IR-Strahlung, Röntgenstrahlung oder auch sichtbare Strahlung, das Licht.

Stoffe können für sichtbare Strahlung durchaus undurchsichtig sein und für andere Wellenlängen transparent, wie man es beispielsweise für Röntgenstrahlung kennt. Ändert sich die Transparenz innerhalb des sichtbaren Lichtes, ist das transparente Material getönt, farbig.

In Abgrenzung zur Transparenz wird die partielle Lichtdurchlässigkeit, zum Beispiel bei Wachs, Milchglas oder Pergament, als Transluzenz bezeichnet, die reziproke Größe hierzu ist die Opazität. Ein Stoff mit hoher Transluzenz – Lichtdurchlässigkeit – hat eine geringe Opazität. Die Opazität oder auch Trübung ist eine, im sichtbaren Bereich von der Wellenlänge unabhängige, Lichtstreuung.

Mit der Transparenz ist die Transmission verknüpft, die die Durchlässigkeit eines Stoffes – Gase, Flüssigkeiten oder Festkörper – beschreibt. Quantitativ beschrieben, wird diese Eigenschaft durch den Transmissionsgrad T oder auch τ , der ein Maß für die durchgelassene Intensität ist. Die Abschwächung der Intensität ist die Absorption. Betrachtet man die Absorption in einem Stoff in Abhängigkeit von dessen Schichtdicke, kommt man zum Lambertschen Gesetz (s. a. Abbildung 13). Es gilt für die durchtretende Intensität I bei einer Schichtdicke s das Lambert-Beersche Gesetz:

$$I(s) = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot s)$$

μ stellt den Absorptionskoeffizienten dar. Dieser ist zum einen eine materialspezifische Größe und zum anderen auch abhängig von der Wellenlänge.

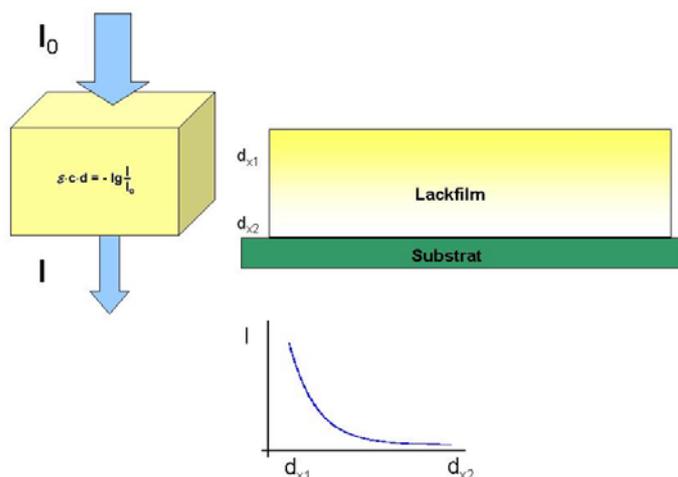


Abbildung 13: Die Lichtdurchlässigkeit von transparenten Werkstoffen und deren Schichtdickenabhängigkeit

Bei der vergleichenden Beurteilung und/oder Charakterisierung ist diese exponentielle Schichtdickenabhängigkeit von Bedeutung, wenn von der Untersuchungsschichtdicke auf eine spätere Schichtdicke in der Applikation übertragen wird.

Die Vergilbung von transparenten Beschichtungsstoffen oder Vergussmassen auf weißem Substrat kann mittels der zuvor beschriebenen Farbmessung durchgeführt werden. Es sind dann die in Kapitel 5 kurz angerissenen Randbedingungen zu beachten und in der Interpretation der farbmessungsmessigen Kennwerte zu berücksichtigen. Bei der farbmessungsmessigen Beurteilung ist zu berücksichtigen, dass bei Farbmessungen über einem weißen Substrat neben der reinen Farbänderung auch zusätzliche Streuphänomene hinzukommen, aber auch dass der Prüfkörper zweimal zur Absorption beiträgt. Mit einem UV-VIS-Spektrometer können die optischen Eigenschaften wie Transmissionsgrad direkt erfasst werden, aber eine Umrechnung in die Farbänderungen beschreibenden Kennzahlen ist nicht möglich. Diese Betrachtung von Transparenz und Vergilbung sei in dieser Abhandlung nur soweit beschrieben und um den Rahmen nicht zu sprengen nicht weiter ausgeführt. Zumindest ermöglicht die farbmessungsmessige Untersuchung von transparenten Lacken oder Vergussmassen bei gleichen Versuchsbedingungen eine vergleichende Beurteilung von Stoffen.

Literatur

- [1] Loos, Hans, Farbmessung, Verlag Beruf + Schule, Itzehoe (1989)
- [2] DIN EN 60216-1, VDE 0304-21:2002-09, Elektroisolierstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens
- [3] DIN EN ISO 11341:2004-12, Beschichtungsstoffe – Künstliches Bewittern und künstliches Bestrahlen – Beanspruchung durch gefilterte Xenonbogen-Strahlung
- [4] DIN 6167:1980-01 Beschreibung der Vergilbung von nahezu weißen oder nahezu farblosen Materialien
- [5] UL 746C Polymeric Materials – Use in Electrical Equipment Evaluations, Outdoor Suitability
- [6] W. Berger, Untersuchungen zur Dauerwärmebeständigkeit von Anstrichen, farbe + lack, 72. Jahrg., S. 127–132 (1966)
- [7] Zuverlässigkeit von fotostrukturierbaren Lötstopplacken bei Belastung durch Temperaturdauer- und Temperaturwechselstress, 14. FED-Konferenz, 21.–23. September 2006, Kassel