

Welche Lampe passt zu welchem Lack?

Ökonomische Auslegung von UV-Härtungsanlagen anhand spektral aufgelöster Daten

Stefan Pieke

Für eine Photopolymerisation ist nicht allein ausschlaggebend, welche Lichtdosis auf den Lack wirkt. Nur wenn das Emissionsspektrum der eingesetzten UV-Strahler ideal zum Absorptionsverhalten der Photoinitiatoren passt, kann eine effiziente Aushärtung stattfinden. Dazu sind die spektral aufgelösten Daten der Formulierung sowie des Strahlers zu analysieren.

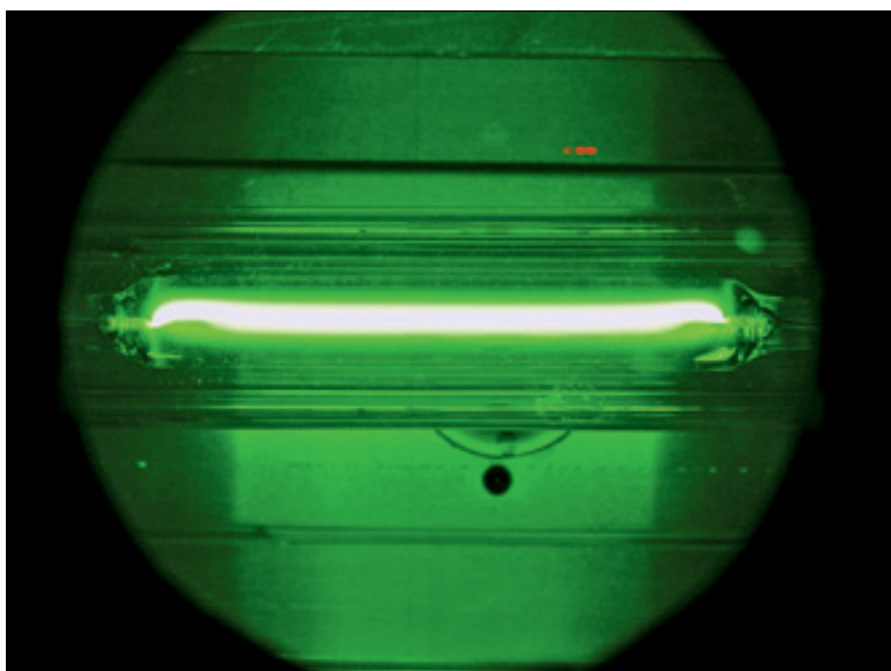


Abb. 1: UV-Trocknungsanlagen mit Mitteldruckstrahler

Qualität und Geschwindigkeit der Beschichtung mit UV-Lacken stehen und fallen mit der verwendeten Trocknungsanlage. Aktuell arbeiten die meisten UV-Trocknungsanlagen mit Mitteldruckstrahlern (Abb. 1). Diese Strahler emittieren hauptsächlich Strahlung, die durch ein Quecksilberdampf-Plasma erzeugt wird. Je nachdem ob hauptsächlich kurzwellige UV-Strahlung (UVC) gewünscht wird, oder ob das Emissionsmaximum im langwelligen UV-Bereich (UVA) liegen soll, können die Lampen mit verschiedenen Elementen dotiert werden, um das Spektrum in den gewünschten Spektralbereich entsprechend zu verschieben. Ein typisches Beispiel für eine langewellige Verschiebung ist ein eisendotierter Quecksilberstrahler, dessen Hauptemission im Bereich des UVA liegt. Durch die Dotierung der Lampen kann zwar das Emissionsspektrum in gewissen Grenzen geändert werden, jedoch handelt es sich bei allen Mitteldruckstrahlern um breitbandige UV-Strahler. Das bedeutet, dass die Lampen unabhängig von ihrem Emissionsmaximum immer auch

einen gewissen Anteil UVA, UVB und UVC emittieren.

Mit dem Einzug der LED in den UV-Härtungsbereich ist erstmals eine Strahlungsquelle verfügbar, die eine relativ schmalbandige Emission besitzt und eine vergleichbare, wenn nicht sogar höhere Bestrahlungsstärke als Mitteldruckstrahler erzeugen kann. Ein typisches Spektrum einer UV-LED ist im Vergleich zu Spektren von Mitteldruckstrahlern in Abb. 2 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass es sich bei der LED-Strahlung keinesfalls um monochromatische Strahlung handelt. Die Emissionsbreite ist jedoch auf einige zehn Nanometer begrenzt. Deswegen muss die Strahlungsquelle deutlich exakter auf das Absorptionsverhalten der Photoinitiatoren und der eventuell vorhandenen UV-Absorber abgestimmt werden. Bei breitbandigen Quellen, wie den Mitteldruckstrahlern, ist die Auswahl des passenden Photoini-

tiators zwar auch von elementarem Interesse, jedoch emittieren diese Strahler im kompletten UV-Bereich, sodass immer ein gewisser Teil der Strahlung auf den im Lack vorhandenen Photoinitiator passen wird. Soll eine Formulierung mit LEDs bestrahlt werden und der verwendete Photoinitiator ist nicht auf die ausgewählte LED abgestimmt, so mag für den Startvorgang der Polymerisation zwar eine große Strahlungsmenge zur Verfügung stehen, auf Grund der spektralen Fehlanpassung kann diese jedoch nicht an den Photoinitiator ankoppeln. Eine solche Fehlanpassung hat bei schmalbandigen Strahlungsquellen deutlich dramatischere Auswirkungen als bei breitbandigen Strahlern.

Eine Frage des Zusammenspiels

Zur Beurteilung, wie gut das Zusammenspiel der Strahlungsquelle mit dem

Kontakt:
Dr. Stefan Pieke
OpSyTec GmbH
Tel.: (+49) 721/754087-12
stefan.pieke@opsytec.de

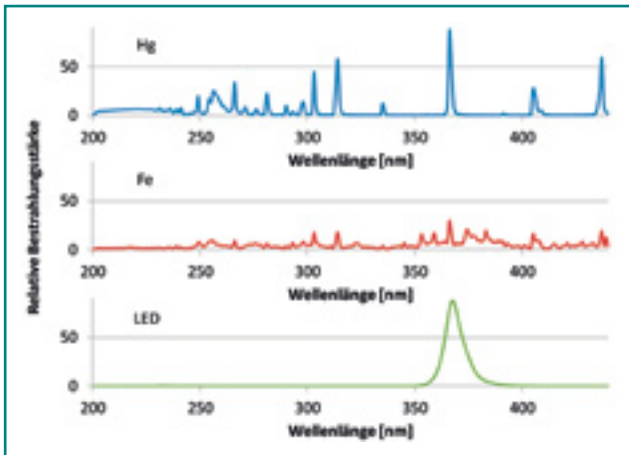


Abb. 2: Emissionsspektren verschiedener Lampen

UV-Lack funktioniert, sollten an Stelle von Dosen oder Bestrahlungsstärken im UVA-, UVB- oder UVC-Bereich besser wirkungsbezogene Größen herangezogen werden. Bei diesem Verfahren wird die von einem Strahler zur Verfügung gestellte spektrale Bestrahlungsstärke mit dem Absorptionsverhalten des Lackes gewichtet. Wichtig ist, dass bei der Beurteilung des Absorptionsverhaltens nur die Bestandteile berücksichtigt werden, die die Photopolymerisation vorantreiben, das heißt in der Regel nur die Photoinitiatoren. Denn Strahlung, die in den Lack eindringt, jedoch nicht von einem Photoinitiator absorbiert wird, trägt nur zur Erwärmung des Lackes bei. Einige typische Absorptionsspektren sind in Abb. 3 dargestellt.

Wie gut die Emission der jeweiligen Lampe zu dem zu härtenden UV-Lack passt, wird über eine Maßzahl erfasst, die durch die Multiplikation des Lampenspektrums mit der wirksamen Absorption des Lackes berechnet wird. Je größer diese Maßzahl ist, desto effizienter kann ein UV-Härtungsprozess ausgelegt werden. Mit Hilfe einer solchen Wirkfunktion kann der Formulierer des UV-Lackes schon bei der Entwicklung sagen, ob beispielsweise ein

► **Ergebnisse auf einen Blick**

- Verschiedene UV-Strahlungsquellen können sich bei der Härtung einer Lackformulierung sehr stark in ihrer Effizienz unterscheiden.
- Die Effizienz eines Gesamtsystems aus Lack und Strahler kann mit Hilfe wirkungsbezogener Größen bewertbar gemacht werden.
- Zur Bestimmung dieser Wirkfunktionen sind spektral aufgelöste Daten notwendig.
- Durch das richtige Zusammenspiel von Lampe und Lack können entweder die Härtungsgeschwindigkeiten gesteigert oder die Kosten reduziert werden.

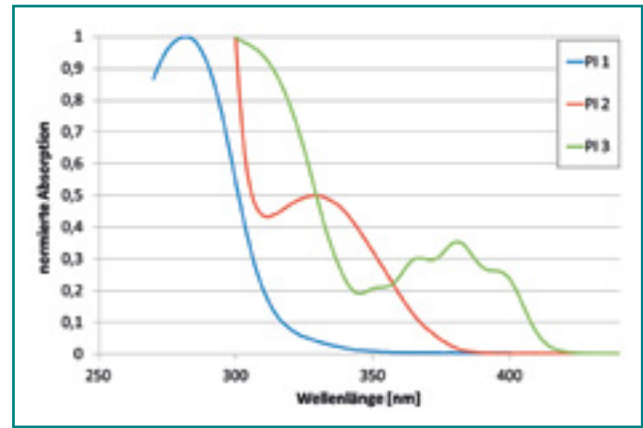
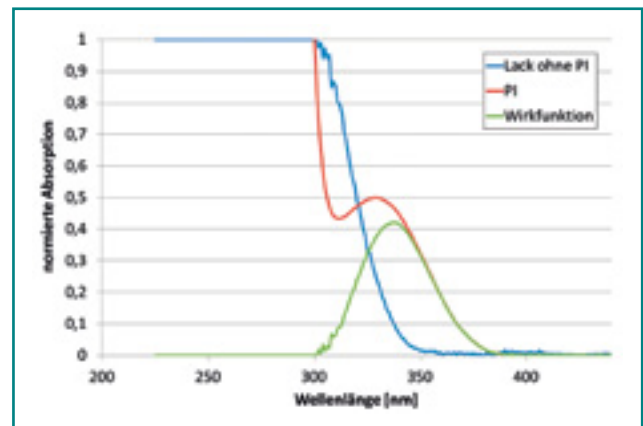


Abb. 3: Spektrale Absorptionskurven verschiedener Photoinitiatoren

Abb. 4: Absorption eines Beispiellacks und eines Photoinitiators sowie die daraus resultierende Wirkfunktion



eisendotierter Quecksilber-Mitteldruckstrahler oder eine UV-LED für die Aushärtung des Lackes besser geeignet ist.

Bestimmung von Wirkfunktionen

Zur Bestimmung der Wirkfunktion sollte zuerst die spektrale Absorption der verwendeten Photoinitiatoren gemessen werden. Diese Daten werden in vielen Fällen bereits von den Rohstofflieferanten zur Verfügung gestellt. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Absorption in der Konzentration bestimmt wird, in der der jeweilige Photoinitiator auch im fertigen Lack eingesetzt wird. Sollen mehrere Photoinitiatoren verwendet werden, so sollten die Absorptionsspektren alle separat in den jeweiligen Verhältnissen bestimmt werden.

Die Kenntnis des Absorptionsverhaltens der Photoinitiatoren (AbsPI) alleine reicht jedoch nicht aus. Der Lack absorbiert auch ohne Photoinitiatoren Strahlung. Diese Strahlung ist aber ein Verlustprozess und liefert keinen Beitrag zur Photopolymerisation. Das Absorptionsverhalten des Lackes (AbsLack) ohne Photoinitiatoren

sollte daher für eine aussagekräftige Wirkfunktion ebenfalls spektral aufgelöst bestimmt werden.

Die Berechnung der resultierenden Wirkfunktion erfolgt nach der folgenden Formel:

$$W_{(\lambda)} = Abs_{PI(\lambda)} \times (1 - Abs_{Lack(\lambda)})$$

Abb. 4 zeigt eine schematische Darstellung einer resultierenden Wirkfunktion. Es ist deutlich zu erkennen, dass in diesem Beispiel Strahlung < 300 nm zwar für den Photoinitiator optimal wäre, jedoch vollständig vom Grundgerüst des Lackes absorbiert wird und daher keinen Beitrag zur Polymerisation liefern wird.

Sollte es nicht möglich sein, die Photoinitiatoren und den Lack ohne Photoinitiatoren getrennt zu vermessen, so können in erster Näherung eine nicht ausgehärtete Probe und eine ausgehärtete Probe spektral vermessen und verglichen werden. So kann ebenfalls der Wellenlängenbereich extrahiert werden, der für einen effizienten Aushärtungsprozess verantwortlich ist. Sollte die entsprechende Messtechnik nicht zur Verfügung stehen, so gibt es einige Dienstleister, die die Bestimmung von Absorptionsspektren als Auftragsmessung anbieten.

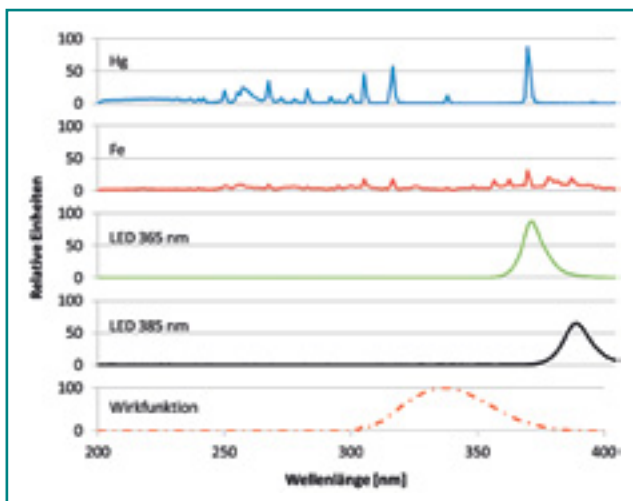


Abb. 5: Vergleich verschiedener normierter Emissionsspektren mit dem Wirkspektrum der Beispielformulierung

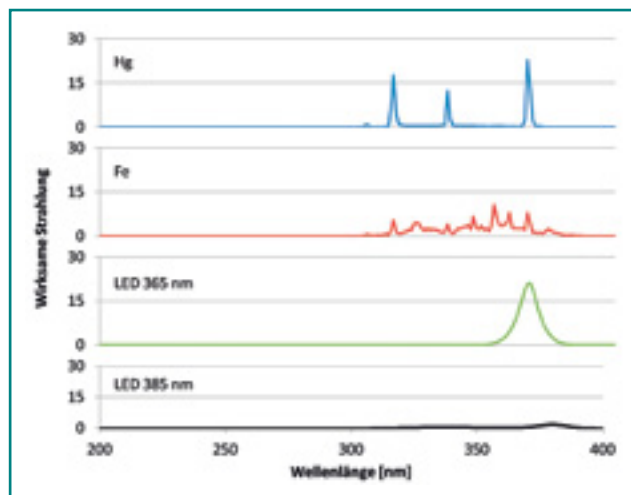


Abb. 6: Resultierende effektive wirkungsbezogene Strahlung verschiedener Strahlungsquellen für die Beispielformulierung

Auswahl der Strahlungsquelle

Anhand der so bestimmten Wirkfunktionen der Lacke kann eine Aussage darüber getroffen werden, welche Strahlung am besten für die Aushärtung des jeweiligen Lacks geeignet ist. Hierzu müssen die spektralen Bestrahlungsstärken der in Frage kommenden Lampen oder LEDs mit der Wirkfunktion des Lackes multipliziert und anschließend integriert werden. Das Ergebnis kann als Maßzahl für die Systemeffizienz betrachtet werden.

Es ist durchaus möglich, dass ein System, bestehend aus einer Lampe und einem Lack, die nicht gut aufeinander abgestimmt sind, dennoch zufriedenstellende Ergebnisse bei der Lackhärtung liefern. In diesem Fall muss jedoch deutlich mehr Energie eingesetzt werden als bei einem ideal aufeinander abgestimmten System, um das gleiche Ergebnis zu erzielen.

Um die optimale Strahlungsquelle auszuwählen, werden die Spektren der in Frage kommenden UV-Strahler verglichen. Damit der Vergleich stichhaltig ausfällt, sind die Spektren zunächst so zu normieren, dass die integrale Leistung über den kompletten UV-Bereich für alle Strahler gleich ist.

In der Praxis sieht die Aufgabenstellung meist anders aus: Es ist zu entscheiden,

auf welcher der bereits bestehenden Produktionsanlagen ein Lack am besten und schnellsten härtet. Für diesen Vergleich ist es wichtig, die spektrale Bestrahlungsstärke an dem Ort zu messen, an dem später das lackierte Objekt bestrahlt wird – also in der Anlage. Mit einem geeigneten UV-Spektralradiometer lässt sich dies ohne große Probleme realisieren.

Anhand der erhaltenen Werte lässt sich sehr praxisnah beurteilen, in welcher der bestehenden Anlagen der Lack am effizientesten ausgehärtet wird. Durch die wirkfunktionsbezogene Betrachtung kann außerdem bestimmt werden, ob sich beispielsweise in einer bestehenden Anlage mit Mitteldruckstrahlern der Wechsel von einem reinen Quecksilberstrahler auf einen Gallium-dotierten Strahler lohnt und wie viel Energie bei der Verwendung dieses Strahlers eingespart werden könnte. Sollen verschiedene Technologien (Mitteldruck – LED) miteinander verglichen werden, so ist zuerst festzustellen, welche spektralen Bestrahlungsstärken die jeweiligen Strahler am Ort der Probe erzeugen können.

Spektrale Messtechnik – eine Notwendigkeit

Die Möglichkeit, mit Hilfe wirkungsbezogener Größen die beste Kombination aus

Photoinitiatoren und Strahlungsquellen zu finden, basiert darauf, dass sowohl von dem Lack, als auch von der Lampe die spektral aufgelösten Daten bestimmt werden können. Bei wirkungsbezogenen Größen reicht es nicht mehr aus, mit genormten Bereichswerten wie UVA, UVB oder UVC zu arbeiten. Es wird eine detailliertere Aussage über den gesamten UV-Bereich benötigt.

Das folgende Beispiel soll zeigen, wie groß die Unterschiede bei der Betrachtung verschiedener Strahler sein können.

Es wird angenommen, dass für einen Lack die Wirkfunktion aus *Abb. 4* bestimmt wurde. Für diesen Lack soll nun der passende UV-Strahler ausgesucht werden. Zur Auswahl stehen zwei verschiedene Mitteldruckstrahler (Quecksilber und Eisen) sowie zwei UV-LEDs. Eine LED emittiert bei 365 nm, die zweite bei 385 nm. Zu Vergleichszwecken wird das Spektrum der verschiedenen Lampen so normiert, dass sie alle eine Bestrahlungsstärke von 1 W/cm² im kompletten UV-Bereich erzeugen. In *Abb. 5* sind die normierten Emissionsspektren der Strahler sowie die Wirkfunktion des Lackes dargestellt.

Die effektiv wirksame Strahlung wird durch die Multiplikation der jeweiligen Emissionsspektren mit der Wirkfunktion des Lackes bestimmt. Es zeigt sich, dass es sehr deutliche Unterschiede gibt, wie effizient die Polymerisation mit den unterschiedlichen Strahlungen in Gang gesetzt wird (*Abb. 6*). Durch die Integration der Flächen unter den Kurven ergibt sich das Maß für die effektiv wirksame Strahlung. In *Tab. 1* sind die normierten Integrale der effektiven Bestrahlungsstärken der einzelnen Strahler zusammengestellt. Dabei wird deutlich, dass die 385 nm LED für die Aushärtung des Beispiellackes am schlechtesten geeignet ist. Die Strahlung des Quecksilber-Mitteldruckstrahlers kop-



• **Dr. Stefan Pieke,** OpSyTec GmbH, studierte Optische Technologien in Karlsruhe. Anschließend promovierte er am KIT im Bereich der effizienten Vernetzung von Lacken mit UV-Strahlung. Bereits während seiner Promotion war er einer der Gründer der OpSyTec GmbH, für die er bis heute als Geschäftsführer tätig ist.

► Tab. 1: Vergleich der effektiv wirksamen Strahlung verschiedener Strahlungsquellen für die Beispielformulierung

Strahler	normierte wirksame Bestrahlung
LED 385 nm	22 %
LED 365 nm	100 %
Hg-Strahler	50 %
Fe-Strahler	90 %

pelt mehr als doppelt so gut an den Lack an. Das mit Abstand effizienteste System ist jedoch eine Aushärtung mit einem 365 nm LED-Strahler. Der eisendotierte Quecksilberstrahler wäre die zweitbeste Wahl.

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass verschiedene Strahlungsarten mit einer sehr unterschiedlichen Effizienz an einen Lack ankoppeln können. Bestünde in diesem Fall die Möglichkeit, die Strahlungsquelle frei zu wählen, so könnte mit einem 365 nm LED-Strahler das effizienteste Gesamtsystem realisiert werden. Ein entsprechender UV-Trockner könnte deutlich

leistungsrmer ausgelegt werden als ein System auf Basis eines Quecksilber-Mitteldruckstrahlers oder einer 385 nm LED. Dies würde sich außer in den laufenden Kosten auch in den Investitionskosten bemerkbar machen.

Würde der Lack bisher in einem UV-Trockner gehärtet, der mit Mitteldruckstrahlern ausgestattet ist, so ließen sich ca. 45 % der Energie einsparen, wenn die Anlage statt mit reinen Quecksilberstrahlern mit eisendotierten Mitteldruckstrahlern betrieben würde. Bei gleich hoher Energieeinspeisung könnte alternativ die Trocknung um ca. 80 % rascher ablaufen.

Ein solcher Vergleich wurde erst dadurch möglich, dass die Messergebnisse alle in spektral aufgelöster Form vorlagen. Wäre die Bestrahlungsstärke der verschiedenen Lampen dagegen einfach mit einem Breitbandradiometer bestimmt worden, so hätte das Radiometer bei allen Strahlern die gleiche Bestrahlungsstärke im UV-Bereich angezeigt, obwohl die Effektivität der Bestrahlung um mehr als den Faktor 4 auseinander liegt. Die Erkenntnisse können natürlich auch genutzt werden, um die Entwicklung eines Lacks optimal auf eine bestehende UV-Härtungsanlage anzupassen.

Fazit

Dank einer Messtechnik, die spektral aufgelöste Daten zugänglich macht, lässt sich das Zusammenspiel zwischen Lack und Lampe optimieren. Dabei wird nur der Teil der Strahlung betrachtet, der auch einen Beitrag zur Photopolymerisation leistet. Alle anderen Strahlungsanteile, die faktisch nur zur Erwärmung des Lacks führen, werden nicht näher untersucht. Mit Hilfe von wirkungsbezogenen Größen kann für jeden neuen Lack nicht nur sehr schnell beurteilt werden, welche Strahlungsart am besten für die Aushärtung geeignet ist, sondern die Eignung der ausgewählten Strahlungsart kann auch quantitativ dokumentiert werden. ◀



**Und nun sind Sie gefragt:
Bewerten Sie diesen Beitrag für den
FARBE UND LACK Preis 2011
www.farbeundlack.de/bewertung**



Neues Mattierungsmittel ACEMATT® 3600

Hohe Transparenz bei niedriger Viskosität

ACEMATT®

- Exzellente Mattierungseffizienz
- Leicht dispergierbar
- Sehr hohe Transparenz
- Kratzbeständig

www.acematt.com

Besuchen Sie uns auf
der Chinacoat:
Halle 9.2 Stand A25-36