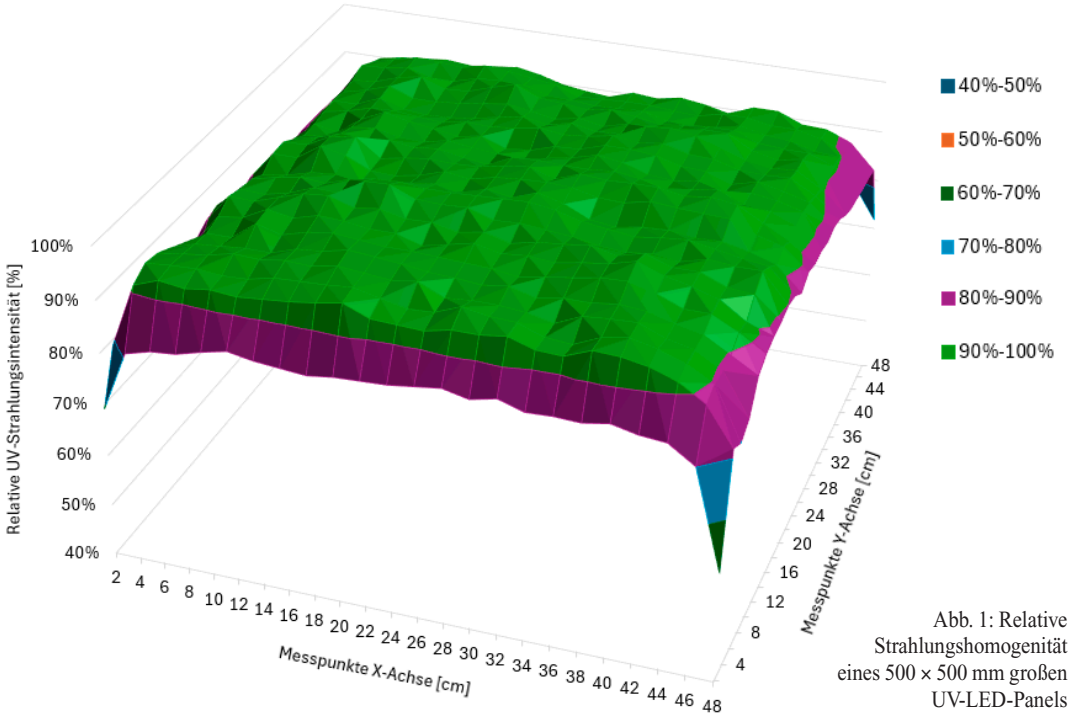

Abb. 1: Relative Strahlungshomogenität eines 500 × 500 mm großen UV-LED-Panels

Bild: Rehm Thermal Systems

UV-LED-Aushärtung in der Elektronikfertigung

Stationäre Vollflächenbelichtung und hohe Prozesssicherheit für Schutzlacke und Klebstoffe

Manuel Schwarzenbolz, Rehm Thermal Systems

UV-LED-Technologie gewinnt in der Elektronikfertigung zunehmend an Bedeutung, wenn Schutzlacke, Klebstoffe oder Vergussmassen schnell, reproduzierbar und energieeffizient ausgehärtet werden sollen.

Gegenüber UV-Systemen mit Quecksilberdampflampen bietet die LED-Technologie wesentliche Vorteile: Sie ist sofort betriebsbereit, präzise regelbar, quecksilberfrei, ozonfrei und ermöglicht kompakte Anlagenkonzepte mit reduziertem Energiebedarf.

Der RDS-UV-LED von Rehm Thermal Systems überführt diese Vorteile in ein inlinefähiges Ofenkonzept. Kern sind die stationäre Vollflächenbelichtung, ein 500 × 500 mm großes Belichtungsfeld und vier separat steuerbare, je 125 mm breite UV-LED-Segmente. Eine gezielte Überstrahlung am Rand positioniert die Baugruppe im besonders homogenen Feldbereich und sichert eine gleichmäßige Bestrahlung der Leiterplatte.

1. Ausgangssituation in der Elektronikfertigung

Die Elektronikfertigung steht unter Druck, Prozesse schneller, energieeffizienter und zugleich reproduzierbarer zu gestalten. Baugruppen werden komplexer, Bauteile temperaturempfindlicher und die Anforderungen an Rückverfolgbarkeit sowie Nachhaltigkeit steigen. Dies betrifft auch die Aushärtung von Schutzlacken, Klebstoffen und Vergussmassen.

Klassische UV-Systeme mit Quecksilberdampflampen sind etabliert, haben aber technische und ökologische Nachteile: Aufwärmzeiten, ein breites Wellenlängenspektrum, zusätzliche Wärme und Quecksilber. Zudem unterliegen quecksilberhaltige UV-Lampen europäischen Stoffbeschränkungen und Ausnahmeregelungen. Auch wenn bestehende Anwendungen nicht kurzfristig betroffen sein müssen, steigt die mittel- und langfristige Planungsunsicherheit.

2. UV-LED als Alternative zur klassischen UV-Technologie

UV-LED-Systeme stellen Strahlung in definierten Wellenlängen bereit. Sie sind sofort betriebsbereit und erlauben eine präzise Steuerung der eingestrahlten Energie. Da sie ohne Quecksilber arbeiten und bei typischen UVA-Wellenlängen kein relevantes Ozon erzeugen, unterstützen sie nachhaltigere und wartungsärmere Prozesse.

Statt eines breiten Spektrums emittieren UV-LEDs Strahlung in engen Wellenlängenbereichen. Für industrielle Anwendungen in der Elektronikfertigung sind vor allem 365 bis 405 nm relevant.

Der RDS-UV-LED ist für Module mit 365, 385, 395 oder 405 nm ausgelegt. Die passende Wellenlänge hängt vom Lack- oder Klebstoffsystem ab und muss dessen Photoinitiatoren anregen.

Ein Breitbandstrahler kann verschiedene Photoinitiatoren über mehrere Spektralbereiche anregen, eine UV-LED dagegen nur einen definierten Bereich. Das ermöglicht eine präzise, energieeffiziente Prozessführung, setzt jedoch ein für die LED-Wellenlänge geeignetes Material voraus.

3. Stationäre Vollflächenbelichtung als Kernprinzip

Wesentliches Merkmal des RDS-UV-LED ist die stationäre Vollflächenbelichtung. Die Baugruppe wird im Prozessbereich fix positioniert und während der definierten Belichtungszeit vollflächig bestrahlt. Dadurch wird die eingebrachte UV-Dosis nicht durch Transportdynamik, Beschleunigungsphasen, Bandgeschwindigkeit oder positionsabhängige Verweilzeiten beeinflusst.

Tab. 1

Kriterium	*Klassische UV-Technologie*	*UV-LED-Technologie*
Strahlungsspektrum	Breitbandig, typischerweise UVA, UVB und UVC	Definierte Wellenlängen, z. B. 365, 385, 395 oder 405 nm
Wärmeeintrag	Hoher thermischer Eintrag möglich	Geringerer Wärmeeintrag in die Baugruppe
Standby-Funktion	Nur eingeschränkt sinnvoll, da Lebensdauer beeinflusst werden kann	Problemlos möglich
Quecksilber	In vielen Lampensystemen enthalten	Quecksilberfrei
Ozonbildung	Je nach Strahlertyp möglich	Bei den genannten UVA-Wellenlängen keine relevante Ozonbildung
Regelbarkeit	Eingeschränkt und träger	Präzise Intensitäts- und Segmentsteuerung
Lebensdauer der Strahlungsquelle	Typisch ca. 1.000 bis 8.000 h, abhängig von Strahlertyp und Betriebsweise	Typisch bis über 20.000 h, abhängig von LED-Modul, Kühlung und Betriebsweise

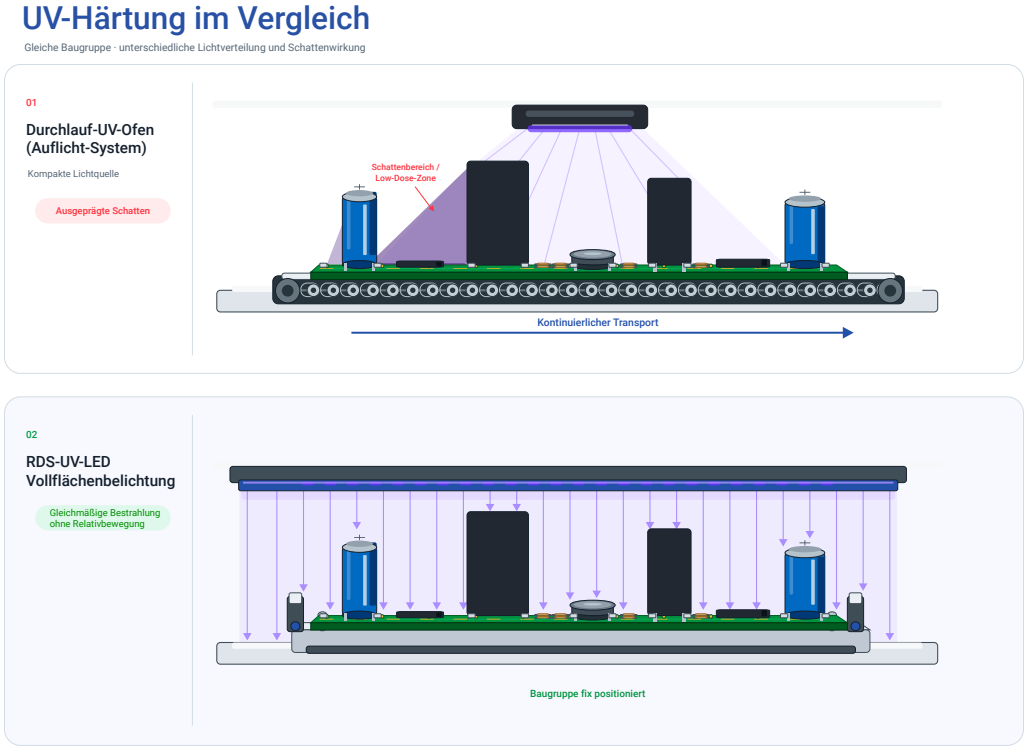

Abb. 2: Durchlaufofen vs. stationäre Vollflächenbelichtung

Bild: Rehm Thermal Systems

Im Durchlaufsystem durchläuft jeder Punkt der Baugruppe ein zeitlich wechselndes Intensitätsprofil. Beim stationären Verfahren wird die gesamte aktivierte Fläche gleichzeitig belichtet. Einstellbar sind Belichtungszeit, Intensität, Arbeitsabstand und aktivierte Segmente.

Bei Baugruppen mit unterschiedlichen Bauteilhöhen hält die stationäre Belichtung Abstand, Ausrichtung und Belichtungsfenster konstant. Schatten durch hohe Bauteile, ungünstige Einfallswinkel oder Relativbewegung lassen sich so besser kontrollieren. Zugleich sinken Schwankungen durch Lageabweichungen, Transporttoleranzen, Querprofilunterschiede und unterschiedliche Verweilzeiten unter der UV-Quelle.

Auch bei empfindlichen Lack- und Beschichtungssystemen steigt die Prozessstabilität. Neben der Gesamtdosis bestimmen Intensität, Sauerstoffeinfluss und Eindringtiefe die Härtungstiefe und Reaktionseffizienz. Bei der stationären Vollflächenbelichtung wirkt die Strahlung für eine definierte Zeit gleichmäßig auf die aktivierte Fläche, was die Prozessführung besser kontrollierbar macht.

Sauerstoff kann bei radikalisch härtenden UV-Systemen die Oberflächenreaktion hemmen und zu unvollständig gehärteten oder klebrigen Oberflächen führen. Eine gleichmäßige, zeitlich definierte Belichtung kann die Oberflächenhärtung stabilisieren und lokale Unterhärtungen reduzieren.

Das UV-LED-Panel besteht aus vier separat steuerbaren, je 125 mm breiten Segmenten. Aktiviert werden nur die für das Leiterplattenformat benötigten Bereiche. Das begrenzt den Energieeintrag außerhalb der Nutzfläche und die thermische Belastung der Baugruppe.

Die Segmentierung verbessert zudem die thermische Beherrschbarkeit. UV-LED-Systeme emittieren ein schmaleres Spektrum als Quecksilberdampflampen und vermeiden weitgehend nicht prozessrelevante, vor allem infrarote Strahlungsanteile. Zusammen mit der gezielten Segmentaktivierung lässt sich der Energieeintrag auf die Nutzfläche begrenzen.

Die stationäre Vollflächenbelichtung macht aus einem bewegungsabhängigen Durchlauf einen rezeptierbaren, taktgebundenen und reproduzierbaren Pro-

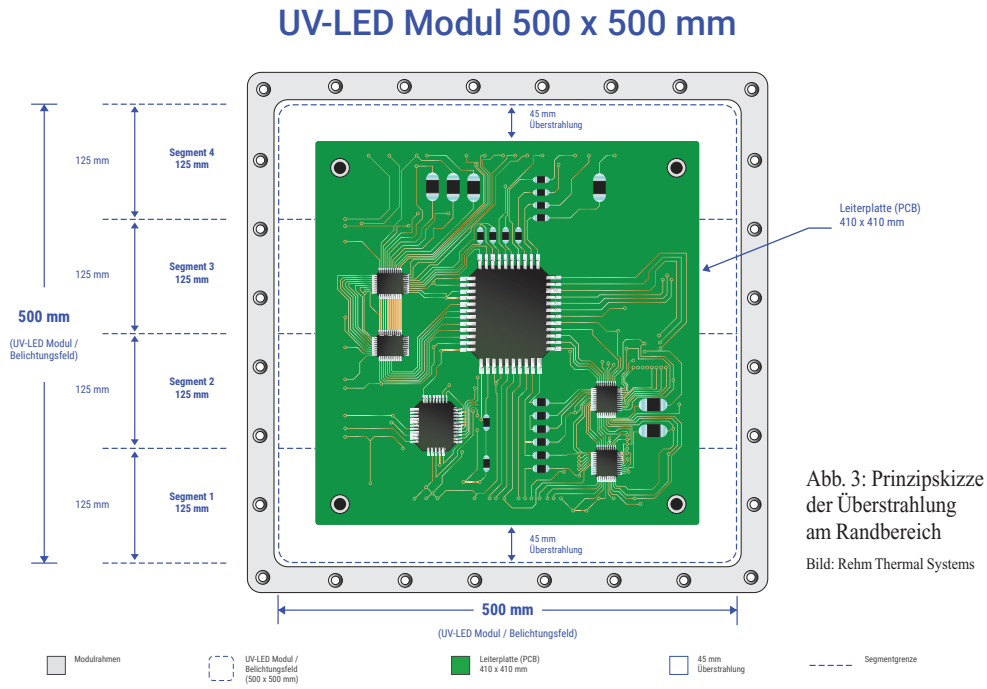

Abb. 3: Prinzipskizze der Überstrahlung am Randbereich

Bild: Rehm Thermal Systems

zess. Prozessgrößen sind klar definiert, die belichtete Fläche lässt sich dem Leiterplattenformat anpassen und mechanische Einflüsse sinken. Das erhöht die Sicherheit bei wechselnden Formaten, variierenden Bauteilhöhen und empfindlichen UV-Lacken.

4. Warum Überstrahlung für die Homogenität entscheidend ist

Für die UV-Aushärtung ist neben Intensität und Dosis die gleichmäßige Strahlungsverteilung über die gesamte Baugruppe entscheidend. Unterbelichtete Randbereiche oder lokale Intensitätsschwankungen können zu unvollständiger Vernetzung und damit zu Restklebrigkeit oder verminderter Schutzwirkung führen.

Abbildung 3 zeigt die relative Strahlungsintensität unter einem 500 × 500 mm großen UV-LED-Panel bei 70 mm Messabstand. Besonders an Ecken und Rändern nimmt sie deutlich ab.

Um diese Randzonen auszuschließen, wird die Baugruppenkante gezielt überstrahlt. Bei Leiterplatten bis 410 × 410 mm bietet das 500 × 500 mm große Feld auf jeder Seite 45 mm Überstrahlung. So liegt die Baugruppe im besonders homogenen Bereich; angestrebt sind mehr als 90 % Strahlungshomogenität über die nutzbare Fläche.

Tab. 2

Maximale Leiterplattengröße	*Überstrahlung je Seite*	*Einordnung*
410 × 410 mm	45 mm	Hohe Strahlungshomogenität im nutzbaren Bereich von über 90 %
460 × 460 mm	20 mm	Größeres Format mit reduzierter Überstrahlung und einer Strahlungshomogenität von ca. 80 %
500 × 500 mm	0 mm	Maximale Fläche, Randhomogenität besonders zu bewerten

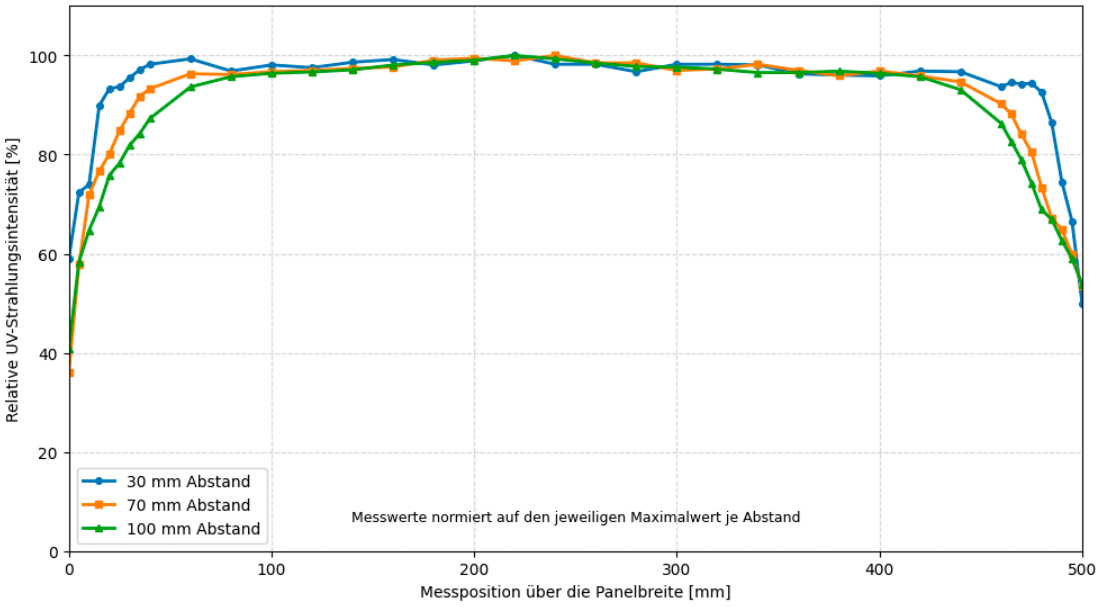

Abb. 4: Strahlungshomogenität des UV-LED-Panels in Abhängigkeit vom Arbeitsabstand Bild: Rehm Thermal Systems

5. Messdaten zur Strahlungshomogenität

Untersucht wurde ein 365-nm-UV-LED-Panel bei Arbeitsabständen von 30, 70 und 100 mm. Die Messwerte wurden auf den jeweiligen Maximalwert normiert.

Bei allen Arbeitsabständen fällt die Intensität am Rand ab. Die Messdaten bestätigen daher die Notwendigkeit einer Randüberstrahlung, damit die Leiterplatte im möglichst homogenen Feldbereich liegt.

Die Messdaten stützen das Konzept, Leiterplatten am Rand zu überstrahlen und für hohe Homogenität eine Prozessfläche von 410 × 410 mm zu nutzen. Die 45-mm-Überstrahlung ist ein wichtiger konstruktiver Hebel für eine gleichmäßige Strahlungsverteilung im Nutzbereich.

6. Prozessfenster: Warum UV-LED kein einfacher 1:1-Ersatz für Breitbandstrahler ist

Die Umstellung von UV-Technologie auf UV-LED sollte nicht als reiner Lampentausch verstanden werden. Entscheidend ist das gesamte Prozessfenster. Dazu zählen die eingesetzte Wellenlänge, die Absorption der Photoinitiatoren, die Schichtdicke des Mediums, der Abstand zwischen Baugruppe und UV-Panel, die eingestrahlte Dosis, die Homogenität des Belichtungsfeldes, die Temperatur- und Luftführung im Ofen sowie die Materialfreigabe durch den Lack- oder Klebstoffhersteller.

Diese Faktoren bestimmen, wie effizient UV-Energie in chemische Vernetzung umgesetzt wird. Für die Prozessauslegung zählen daher nicht nur Energiemenge, sondern auch die spektrale Passung zum Materialsystem.

Mehr Intensität oder längere Belichtung verbessern das Ergebnis nicht automatisch. Nutzt das Material die Wellenlänge unzureichend oder hemmt etwa Sauerstoff die Oberflächenreaktion, kann selbst eine hohe Dosis kein vollständig zufriedenstellendes Ergebnis liefern.

Praxisuntersuchungen zeigten, dass auch klassische UV-Schutzlacke mit einer UV-LED-Aushärtung verarbeitet werden können, sofern das Prozessfenster entsprechend angepasst und validiert wird. Dabei zeigte sich, dass die unter UV-LED erforderlichen Dosiswerte teilweise deutlich über den Referenzwerten klassischer UV-Technologie liegen können. In den untersuchten Fällen hatte die höhere Dosis jedoch keine negativen Auswirkungen auf die geprüf-

ten Materialeigenschaften. Bewertet wurden unter anderem Durchschlagsfestigkeit, Feuchte-Isolationswiderstand, Oberflächenisolationswiderstand unter Kondensation sowie Thermoschockbeständigkeit.

Der erhöhte Dosisbedarf klassischer UV-Schutzlacke ist vor allem auf die unterschiedliche spektrale Zusammensetzung der Strahlungsquellen zurückzuführen. Klassische Quecksilberdampflampen emittieren breitbandig und stellen neben UVA auch kurzwellige UV-Anteile bereit. UV-LED-Systeme arbeiten dagegen schmalbandig. Dadurch werden nicht alle Photoinitiatoren in gleicher Weise angeregt wie bei einem Breitbandstrahler. Besonders bei Materialien, die ursprünglich für klassische UV-Strahler entwickelt wurden, kann daher eine höhere Energiedosis erforderlich sein, um eine vergleichbare Vernetzung und technische Performance zu erreichen.

Kurzwellige UV-Anteile klassischer Systeme können die Oberfläche schnell härten. Fehlen sie bei reiner UVA-LED-Bestrahlung, kann die Oberfläche zunächst leicht klebrig bleiben. Bei dual härtenden Systemen gleicht ein nachgelagerter Mechanismus diesen Effekt aus, sodass nach definierter Nachreaktionszeit eine klebfreie Oberfläche entsteht.

Die Dosis allein reicht daher nicht zur Bewertung eines UV-LED-Prozesses. Maßgeblich ist, ob die geforderten Materialeigenschaften zuverlässig erreicht werden und der Prozess reproduzierbar bleibt. Eine erhöhte Dosis ist nicht automatisch nachteilig, sondern im Zusammenhang mit Wellenlänge, Materialchemie, Schichtdicke, Homogenität, Nachhärtung und Bauteilgeometrie zu bewerten.

In Zusammenarbeit mit Lack- und Klebstoffherstellern wurden bereits mehrere klassische UV-Lacke auf einem UV-LED-Ofensystem bewertet und für den industriellen Einsatz freigegeben. Damit lassen sich auch bewährte, qualifizierte Schutzlacke sicher verarbeiten; eine anwendungsspezifische Prozessvalidierung bleibt dennoch notwendig.



Bild: Rehm Thermal Systems

7. Prozesskontrolle und Rückverfolgbarkeit

In modernen Fertigungslinien wird die Dokumentation von Prozessdaten zunehmend wichtiger. Für die UV-Aushärtung bedeutet dies, dass nicht nur ein Programmname oder eine Belichtungszeit gespeichert

Tab. 3

Systemtyp	*Referenztechnologie*	*Dosisbedarf unter 365-nm-UV-LED*
Klassisches UV-Schutzlacksystem, Variante 1	Breitband-UV / Quecksilberdampflampe	ca. 1,7-fach höher
Klassisches UV-Schutzlacksystem, Variante 2	Breitband-UV / Quecksilberdampflampe	ca. 4-fach höher

werden sollte. Relevant sind auch Intensität, aktive Segmente, Temperaturzustände, Betriebsstunden und Statusmeldungen des UV-Systems.

Der RDS-UV-LED ist darauf vorbereitet. Rückverfolgbare Prozesswerte umfassen Belichtungszeit, Intensität, aktive UV-LED-Segmente, Segmenttemperaturen, Betriebsstunden und Systemstatus. So lässt sich die Aushärtung dokumentieren und mit qualitätsrelevanten Produktionsdaten verknüpfen.

Über Schnittstellen wie SMEMA, Hermes oder eine MES-Anbindung lässt sich der UV-LED-Ofen in digitalisierte Fertigungslinien integrieren. Erfasste Veränderungen von LED-Intensität, Temperatur oder Soll-Ist-Werten schaffen eine Grundlage für Prozessanalyse, vorbeugende Wartung und Produktionsnachweise.

8. Entwicklungsperspektive: Sauerstoffinhibierung und Prozessatmosphäre

Eine Ursache unzureichender Oberflächenhärtung ist die Sauerstoffinhibierung. Bei radikalisch härtenden UV-Systemen reagiert Luftsauerstoff mit Radikalen und hemmt die Polymerisation an der Oberfläche. So kann eine klebrige, unvollständig vernetzte Schicht entstehen, obwohl das Materialinnere bereits stärker vernetzt ist.

Besonders bei Schutzlacken, die ursprünglich für klassische Breitbandstrahler entwickelt wurden, kann die Umstellung auf UV-LED-Technologie anspruchsvoll sein. Neben der spektralen Anpassung der Photoinitiatoren kann auch Sauerstoff die Oberflächenreaktion begrenzen. Bei einzelnen Lackchemien kann dies zu Restklebrigkeit an der Oberfläche führen.

Erste Marktansätze kombinieren LEDs verschiedener Wellenlängen, darunter kürzere Wellenlängen, um die Oberflächentrocknung zu verbessern. Besonders UVC-LEDs weisen derzeit jedoch noch eine geringe Leistungsausbeute und begrenzte Lebensdauer auf.

Vor diesem Hintergrund untersucht Rehm Thermal Systems ergänzend den Ansatz einer reduzierten Sauerstoffatmosphäre. Erste Versuche mit klassischen UV-Schutzlacken zeigen, dass eine stark reduzierte Sauerstoffkonzentration die Oberflächentrocknung verbessern kann.

Bei einzelnen Versuchen zeigte sich, dass der relevante Bereich deutlich unterhalb von 5 % Restsauerstoff liegen kann; bei ungefähr 1 % Restsauerstoff wurde eine klebfreie Oberfläche erreicht.

Die Ergebnisse deuten auf ein erweitertes Prozessfenster: Eine reduzierte Sauerstoffatmosphäre kann bei bestimmten Lackchemien die Oberflächenhärtung unterstützen. Der Ansatz muss jedoch weiter untersucht, konstruktiv abgesichert und prozesstechnisch validiert werden.

9. Energieeffizienz, Footprint und Nachhaltigkeit

Neben der Prozessqualität spricht die Wirtschaftlichkeit für UV-LED-Technologie. Gegenüber konventionellen UV-Strahlern sind deutliche Energieeinsparungen möglich. Die Quelle lässt sich in Standby versetzen, sodass Energie nur während der Belichtung benötigt wird; langlebige LED-Module senken zudem den Wartungsaufwand.

Der RDS-UV-LED ist als kompakte Anlage mit geringem Platzbedarf konzipiert. Die stationäre Vollflächenbelichtung ermöglicht kurze Prozesszeiten bei gleichzeitig hoher Strahlungshomogenität über die nutzbare Leiterplattenfläche. Gleichzeitig entfällt der Einsatz quecksilberhaltiger Strahler, was die Umweltbilanz verbessert und die Anlage im Hinblick auf zukünftige regulatorische Anforderungen attraktiver macht. Da UV-LEDs bei den relevanten UVA-Wellenlängen keine nennenswerte Ozonbildung verursachen und die Wärmeeinbringung geringer ausfällt, kann der Prozess insgesamt ressourcenschonender gestaltet werden.

Die Kombination aus definierter Intensitätsregelung, segmentierter Belichtung und kurzen Einschaltzeiten ist insbesondere im Semi-Batch-Betrieb relevant. Energieeffizienz wird damit nicht allein über die Lichtquelle erreicht, sondern über das Zusammenspiel aus Prozessführung, Steuerung, Thermomanagement und Anlagenlayout.

10. Fazit

UV-LED-Technologie bietet eine energieeffiziente, quecksilberfreie und präzise steuerbare Alternative zu klassischen UV-Aushärtesystemen. Der RDS-UV-LED kombiniert diese Vorteile mit stationärer Vollflächenbelichtung, segmentierter Flächenan-

steuerung, definierter Wellenlänge und inlinefähiger Prozessintegration.

Die Homogenitätsmessungen bestätigen die Bedeutung der Randüberstrahlung. Bei 410 × 410 mm Nutzfläche und 45 mm Überstrahlung je Seite entstehen günstige Voraussetzungen für eine gleichmäßige Strahlungsverteilung.

Gleichzeitig zeigt sich, dass UV-LED-Aushärtung kein reiner Lampentausch ist. Wellenlänge, Intensität, Belichtungszeit, Materialchemie, Schichtdicke, Homogenität und Prozessatmosphäre müssen gemeinsam betrachtet werden. Damit steht nicht nur die Lichtquelle im Vordergrund, sondern das gesamte Prozessfenster.

Der RDS-UV-LED ist damit ein kontrolliertes Prozesskonzept aus stationärer Vollflächenbelichtung, Segmentierung, Homogenitätsmanagement und Traceability. Definierte LED-Strahlung, homogene Belichtung, kompaktes Anlagenlayout und reproduzierbare Inline-Integration verbinden Ressourcenschonung mit Prozesssicherheit.

www.rehm-group.com



Zur Person

Manuel Schwarzenbolz, geboren 1982 in Blaubeuren, ist Entwicklungsingenieur. Er studierte Fahrzeugtechnik an der Hochschule Ulm. Seit 2010 ist er bei Rehm Thermal Systems tätig.