

Photonik

Fachzeitschrift für die Optischen Technologien



**Spektrale Messtechnik
für die UV-Lackhärtung:
S. 26**

Messeberichte Optatec, Lasys, Display Taiwan – S. 16

Seltene Erden: Kanada als Option – S. 8

AVT-Laser: Aufbau- & Verbindungstechnik – S. 19

fs-Halbleiterlaser: VECSEL-Entwicklung der ETH – S. 32

Strahlungsmessung in UV-Härtungsanlagen

Mark Paravia, Stefan Pieke, Jonas Sedeqi, OpSyTec GmbH, Karlsruhe

Spektrale Bestrahlungsstärkemessungen sind in Laboren gängige Praxis. In industriellen UV-Härtungsanlagen werden zur Qualitätssicherung seit Jahren Breitbandradiometer eingesetzt, deren Empfindlichkeitsfunktionen sich aber geräteabhängig stark unterscheiden, so dass die Messergebnisse nicht vergleichbar sind. Erst die Verfügbarkeit eines kompakten Spektralradiometers ermöglichte in diesen Anlagen normgerechte Messungen. Der folgende Beitrag beschreibt die Entwicklung eines mobilen UV-Spektralradiometers für den industriellen Einsatz und vergleicht dessen Messprinzip und Toleranzen mit denen eines Breitbandradiometers.

1 UV-Härtung

Die Qualität und die Produktionsgeschwindigkeit von modernen Druck- und Lackieranlagen konnten in den letzten Jahren rasant gesteigert werden. In der Vergangenheit eingesetzte lösemittelhaltige Farben und Lacke werden seit einigen Jahren zunehmend von lösemittelfreien Beschichtungen ersetzt. Diese Lacke und Farben werden mit UV-Strahlung umweltschonend gehärtet und erreichen eine exzellente Widerstandsfähigkeit gegen organische Lösungsmittel, Chemikalien und mechanische Umgebungseinflüsse [1].

Schwierigkeiten bei dieser Technik bereitet jedoch die Durchhärtungskontrolle der Lacke und Farben. In existierenden Anlagen wird nicht der Lack selbst überwacht, sondern die Bestrahlungsstärke und -dosis als Maßzahlen für die Qualität der Durchhärtung herangezogen. Die in solchen Aushärtungsanlagen typischerweise verwendeten UV-Lampen besitzen elektrische Leistungen im Bereich von einigen hundert Watt bis hin zu ca. 20 kW. **Bild 1** zeigt eine solche Lampe, die in Produktionsanlagen Bestrahlungsstärken im Bereich einiger W/cm^2 erreichen. Durch eine Dotierung der Lampe mit Indium, Gallium oder z.B. Eisen kann das Emissionsspektrum auf die Absorption des Photoinitiators angepasst werden. Als Bestandteil eines

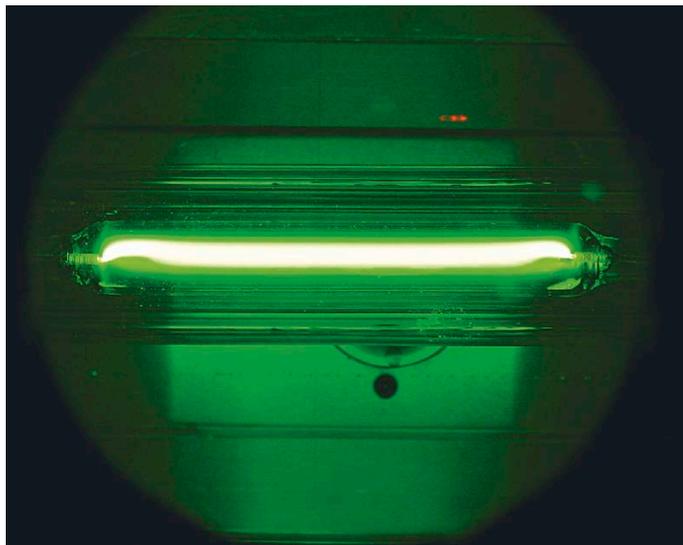


Bild 1: Hg-Mitteldruckstrahler für den Einsatz in UV-Härtungsanlagen

UV-Lacks startet der Photoinitiator die chemische Vernetzung des flüssigen Lacks. Für thermisch kritische Prozesse eignen sich zudem UV-LED-Module mit bis zu $16 W/cm^2$ Bestrahlungsstärke¹. In den meisten Anlagen werden flache Güter gehärtet, z.B. aus der Möbelindustrie. Deren Höhe beträgt oft nur 15 mm. Um hohe Bestrahlungsstärken zu erreichen, wird der Abstand des UV-Strahlers zum

¹ An einer $1000^\circ C$ heißen Lampe kann man nicht mit wenigen mm Abstand härten. Bei UV-LED-Modulen ist dies möglich, und aus dem geringen Abstand resultieren höhere Bestrahlungsstärken. Allerdings sind die Investitionskosten für UV-LEDs deutlich höher.

Bestrahlungsgut in UV-Anlagen möglichst gering ausgelegt und die Güter auf Transportbänder mit Geschwindigkeiten bis 35 m/min bewegt. Das zur Überwachung eingesetzte Messgerät ist bei begrenzter Bauhöhe einer hohen thermischen Belastung durch über $1000^\circ C$ heiße Lampen ausgesetzt.

Übliche Verfahren zur Überwachung von Aushärtungsanlagen beinhalten kompakte Breitbandradiometer in einem robusten Gehäuse mit einer Bauhöhe von 10–15 mm. Diese werden durch mobile Spektralradiometer ergänzt. Deren Vorteil liegt in der Rückführbarkeit der Bestrahlungsstärkemessung auf nationale Standards.

2 Breitbandradiometer

Breitbandradiometer bestehen aus einer Photodiode (Si, SiC, GaP) mit vorgesetztem optischen Filter. Durch die Auswahl des Filters kann der Messbereich grob auf einen UV-Spektralbereich angepasst werden. Eine normgerechte Einteilung [2] in UVA, UVB und UVC ist hingegen nicht möglich.

Nach einem einfachen Lampenwechsel, z.B. von Quecksilber-Strahlern auf Gallium-Strahler, sind mit Breitbandradiometer teilweise keine exakten Messungen der Bestrahlungsstärke und -dosis mehr möglich. Exemplarisch sind die Spektren dieser

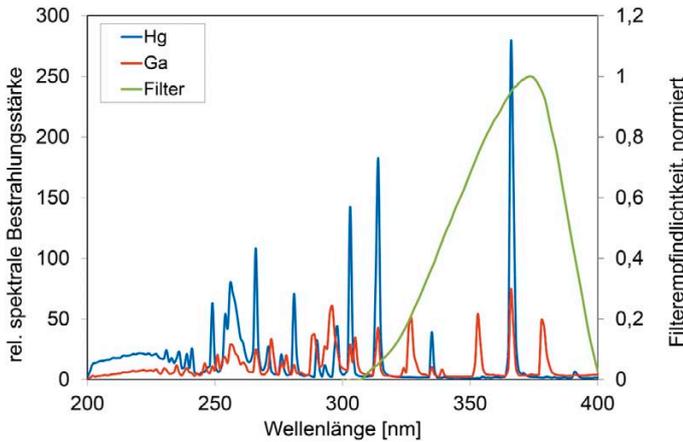


Bild 2: Emissionsspektren eines Quecksilber (Hg)- und eines Gallium (Ga)-Mitteldruckstrahlers und Empfindlichkeitsfunktion eines Breitbandradiometers

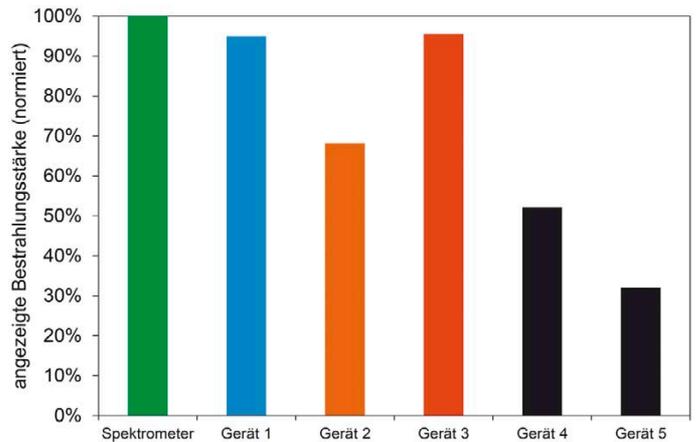


Bild 3: Normierte Bestrahlungsstärke aus einem Messgerätevergleich von fünf Breitbandradiometern und einem Spektralradiometer

beiden Lampen in **Bild 2** zusammen mit einer Empfindlichkeitsfunktion eines Breitbandradiometers dargestellt.

Die auf dem Messgerät angezeigte Bestrahlungsstärke entspricht der Gewichtung der spektralen Empfindlichkeit S_λ der verwendeten Empfängerdiode-Filter-Kombination mit dem Emissionsspektrum E_λ der UV-Lampe nach der optoelektronischen Wandlung. Hierzu wird bei der Kalibrierung mit bekannter Bestrahlungsstärke E einer Photospannung U_{photo} ein Kalibrierfaktor k_1 zugeordnet.

$$E = \int E_\lambda \cdot S_\lambda d\lambda = k_1 \cdot U_{photo} \quad (\text{Gl. 1})$$

Breitbandradiometer werden von ihren Herstellern jedoch durch individuelles Setzen von k_1 nur für einen Lampentyp kalibriert und können daher auch nur bei diesem Lampentyp korrekte Messergebnisse wiedergeben. Für die in **Bild 2** dargestellten Spektren liegt die Abweichung zum spektralradiometrischen Sollwert der Gallium-Lampe z.B. bei -18%, wenn das für Hg-Strahler kalibrierte Messgerät verwendet wird.

Breitbandradiometer eignen sich daher um laufende Anlagen zu kontrollieren, da in diesem Fall nur überprüft werden muss ob eine Lampe verschmutzt oder gealtert ist. Ebenso ist es möglich, baugleiche Anlagen miteinander zu vergleichen. Sobald sich jedoch das Spektrum der Lampe ändert, oder andere Lampentechnologien wie UV-LEDs eingesetzt werden, fallen die Messwerte der Geräte unterschiedlich aus.

Problematisch sind die willkürlichen, herstellereigenen

Empfindlichkeitsfunktionen der Geräte.

Vergleicht man Breitbandradiometer verschiedener Hersteller an der gleichen UV-Anlage, so zeigen sich herstellereigene Abweichungen, die eine vergleichbare Angabe der Bestrahlungsstärke (als Maßzahl) verhindern. **Bild 3** zeigt die normierten Bestrahlungsstärken von fünf Breitbandradiometern und einem Spektralradiometer an einer UV-Härtungsanlage mit Hg-Lampe. Es wird deutlich, dass zum Teil Abweichung von bis zu 40% auftreten. In der Praxis werden daher Messgerätevergleiche durchgeführt.

Für eine zuverlässige Härtung werden die UV-Anlagen in der Regel überdimensioniert. Durch eine genauere Messtechnik könnte die Lampenleistung in diesem Beispiel um 40% verringert werden. Für eine Anlage mit einer Lampenleistung von 20 kW könnte die CO₂-Emission so um

42 t pro Jahr reduziert werden.

Die Bestrahlungsstärke der Druck- und Lackieranlagen kann also mit Breitbandradiometern überwacht werden, die Einrichtung neuer Anlagen ist jedoch nur durch Messgerätevergleiche möglich. Als Folge werden Druck- und Lackieranlagen oft überdimensioniert, was die Wirtschaftlichkeit einschränkt und die Ökobilanz der Anlagen verschlechtert.

3 Spektralradiometer

Zu wissenschaftlichen Zwecken wird die Bestrahlungsstärke spektralradiometrisch gemessen. Dazu kommen Messgeräte zum Einsatz, die aus einem Spektrometer oder Monochromator, einer Kosinus-korrigierten Einkoppeloptik und ggf. einem Lichtwellenleiter bestehen. Die Simulation des Strahlungsverlaufs zwischen den optischen Komponenten eines Spektrometers in Czerny-Turner-Anordnung ist in **Bild 4** dargestellt.

3.1 Aufbau

Die Funktionsweise kann wie folgt skizziert werden: Der Eingangsspalt des Spektrometers liegt im Fokuspunkt des eingangsseitigen Kollimatorspiegels. Dieser parallelisiert die auftreffende Strahlung und reflektiert diese auf ein Beugungsgitter, das die Strahlung in die spektralen Anteile zerlegt und auf den ausgangsseitigen Fokussierspiegel leitet. Der Spiegel bündelt das Licht anschließend auf den Detektor. Der Abstand des Detektors zum ausgangsseitigen Spiegel wird als Fokusslänge bezeichnet und definiert, zusammen

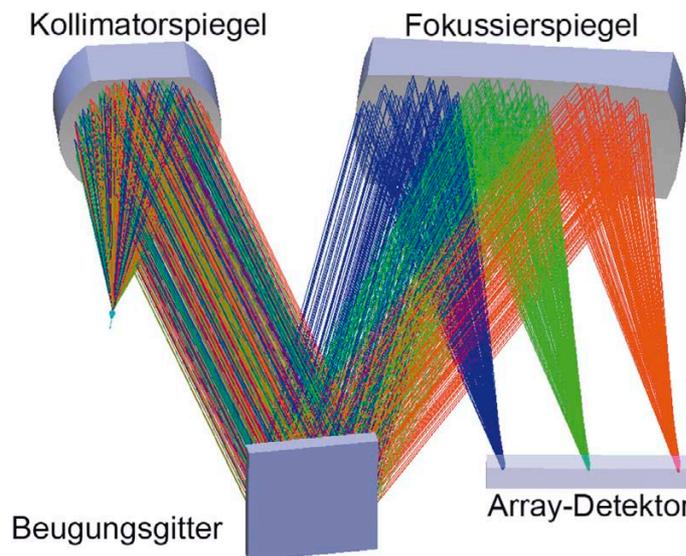


Bild 4: Simulation des Strahlengangs in einem Czerny-Turner-Arrayspektrometer



Bild 5: Mobiles Spektralradiometer mit Array-Spektrometer in einer Czerny-Turner-Variante

mit dem Beugungsgitter, die wesentlichen optischen Parameter des Spektrometers. Bei kompakten Array-Spektrometern, deren Zeilendetektor ein komplettes Spektrum parallel aufnimmt, beträgt die Fokusslänge in der Regel 40–75 mm. Vorteil der Czerny-Turner-Anordnung ist eine geringe Streulichtausbreitung im Spektrometer, welches insbesondere bei Messungen im UV-Bereich oder bei Spektren mit hoher Dynamik die Messgenauigkeit beeinflusst. Für Array-Spektrometer werden hier Streulichtunterdrückungen von ca. 10^{-3} bis 10^{-4} erreicht.

Durch mathematische Integration der spektralen Bestrahlungsstärke kann die Gesamtbestrahlungsstärke normgerecht berechnet werden². Zudem lässt sich diese Klasse der optischen Messgeräte rückführbar auf die nationalen metrologischen Institute (PTB, NIST) kalibrieren.

Durch die wellenlängenaufgelöste Messung kann über eine Gewichtung des Lampenspektrums mit der Absorption des Photoinitiators ein Produktionsprozess auch wirkungsbezogen optimiert und kontrolliert werden [3]. Dies ist beim Einsatz dotierter Strahler sinnvoll, da diese am Ende der Lebensdauer verstärkt ein Hg-Spektrum emittieren.

Für die mobile Messung in UV-Anlagen wurde ein kommerzielles Gerät in unsymmetrischer Czerny-Turner-Variante umgesetzt, das sich bei einer Bauhöhe von 14,4 mm unter engen Platzverhältnissen einsetzen lässt (**Bild 5**).

3.2 Technische Anforderungen

Für die Anwendung von Spektralradiometern in UV-Bandanlagen ist folgendes zu beachten:

mobil einsetzbar sein, d.h. ohne LWL- oder Kabelanbindung. Die Baugröße üblicher Spektrometer macht ihren Einsatz in Produktionsanlagen schwer bis unmöglich. Selbst sogenannte Minispektrometer sind mit einer Bauhöhe von 25–40 mm zu hoch.

Die wichtigsten Anforderungen und Randbedingungen lauten somit:

1. Geringe Bauhöhe
2. Umgebungstemperaturen bis 70°C und Temperaturwechselbeständigkeit
3. Streulichtunterdrückung
4. Echtzeitauswertung der Messdaten
5. zulässiger Maximalstrom der Lithiumbatterien (verhindern den Einsatz von Signalprozessoren)
6. Die Umsetzung muss so erfolgen, dass ungeschultes Personal spektralradiometrische Messungen durchführen kann

Die geringe Bauhöhe und die Streulichtunterdrückung wurden durch ein optimiertes Design erreicht. Darunter fällt die Einkopplung der Strahlung durch eine miniaturisierte Ulbrichtkugel, die eine Kosinuskorrektur und eine 90°-Umlenkung der Strahlung kombiniert. Außerdem wurde mittels hochintegrierter Elektronik ein Spektrometer mit einer Fokusslänge von 76 mm realisiert. Der prozentuale Anteil der Optik an der Gesamtfläche beträgt 57% (jeweils inkl. mechanischen Halterungen und Blenden). Weitere 12% werden für die Lithiumbatterien benötigt. Die verbleibenden 31% stehen für Elektronik und Grafikdisplay zur Verfügung.

Die Hauptkomponente der Elektronik bildet ein Mikroprozessor, hier ein 16Bit-Modell der MSP430-Familie von Texas Instruments. Durch unterschiedliche Low-Power-Modi kann eine Bereitschaftszeit von >2 Jahren erreicht werden.

Während der Messung stehen für die Aufbereitung der Daten pro Pixel jedoch nur 4 μ s zur Verfügung. Deshalb kann aus-

schließlich durch Hardware-Multiplizierer eines Mikroprozessors eine Dunkelsignalkorrektur und eine Kalibrierung in Echtzeit erreicht werden. Des Weiteren war es nötig, die Batteriespannung von nominalen 2,6–3,3 V für die CMOS-Zeile und die Analog-Digital-Wandlung aufzubereiten. Für die CMOS-Zeile wird z.B. eine Betriebsspannung von konstant 5 V bereitgestellt. Diese und eine Referenzspannung für die AD-Wandlung dürfen sich nicht mit der Batteriespannung ändern.

Während der Messung liegt der Entladestrom der Batterien bei ca. 20 mA wodurch über 300 Messungen mit einem Batteriesatz ermöglicht werden. Im Low-Power-Modus sinkt der Entladestrom auf 0,6 μ A. Mittels spektralradiometrischer Erfassung kann eine wirkungsbezogene Messung durch hinterlegte Photoinitiator-Absorptionsspektren erreicht werden. Dies ist sonst nur in PC-basierten Messgeräten möglich. Die resultierende Wiederholgenauigkeit einer solchen Messung liegt mit einer Standardabweichung von 2% auf einem hohen Niveau und ist nicht wesentlich schlechter als die eines Breitbandradiometers mit <1%.

3.3 Kalibrierung

Wichtigstes Kriterium einer spektralradiometrischen Messung ist die Gültigkeit der Kalibrierung, da diese Messgeräte nur kalibriert einsetzbar sind. Typische Kalibrierernormale sind die Quarzhalogenleuchte, Typ FEL 1000 W, im Spektralbereich 250–2500 nm und die Deuteriumlampe im Spektralbereich 200–400 nm. Der Kalibrierabstand beträgt 50–70 cm, weshalb bei der Kalibrierung unter 400 nm spektrale Bestrahlungsstärken zwischen 0,5 und 10 $\text{mW}/\text{m}^2/\text{nm}$ erreicht werden. **Bild 6** zeigt die Spektren dieser beiden Kalibrierquellen zusammen mit der typischen Bestrahlungsstärke einer 6 kW Hg-Lampe in einem produktionsüblichen Abstand. Zwischen der Anwendung des Messgerätes und der Kalibrierung liegen sieben Größenordnungen. Mit einer Messgerätedynamik von 10^4 bis 10^5 können keine typischen Kalibriernormale für das Messgerät verwendet werden. Möglich wäre die Verringerung des Kalibrierabstandes, wodurch sich aber noch kein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis erreichen lässt. Um dennoch eine Kalibrierung bei hohen Bestrahlungsstärken zu ermöglichen, lassen sich Hg-, Hg-Xe- oder Xe-Kurzbogenlampen als Kalibrierquellen einsetzen. Die spektrale Bestrahlungsstärke, die eine HBO 1000 W in 10 cm Abstand erreicht, ist in Bild 6 zusammen mit der spektralen Bestrahlungsstärke eines Hg-Xe-Kalibrierstrahlers [4] dargestellt.

² Also innerhalb festgelegter Grenzen (z.B. UVB = 280–315 nm) und mit definierter oder konstanter spektraler Empfindlichkeit.

Für den Kalibrator besteht die Herausforderung daher darin, die Teilbestrahlungsstärken geeigneter UV-Lampen auf die mobilen Spektralradiometer zu übertragen. Der Aufwand einer spektralen Kalibrierung bei hoher Bestrahlungsstärke wird jedoch durch eine universelle Einsetzbarkeit der Spektralradiometer gerechtfertigt. Mit gültiger Kalibrierung sind spektralradiometrische Messungen unterschiedlich dotierter Strahler (Hg, Ga, Fe) oder UV-LEDs möglich, deren Bestrahlungsstärken normgerecht gemessen und damit transferiert werden können. Auf diese Weise entfallen aufwendige Messgerätevergleiche.

4 Zusammenfassung

Ebenso wie Breitbandradiometer ermöglichen Spektralradiometer die Messung von Bestrahlungsstärken in UV-Härtungsanlagen. Darüber hinaus jedoch erlauben sie auch den Vergleich von Bestrahlungsmessungen, da die Kalibrierung auch bei unterschiedlichen Strahlern gültig bleibt und Bestrahlungsstärkeangaben normgerecht erfolgen.

Daraus resultiert vor allem eine geringere bewusste Überdimensionierung der Anlagen, da die benötigten Bestrahlungsstärken für die Aushärtung der Lacke und Farben nun individuell exakt gemessen werden können. Als Folge davon verringert sich auch die elektrische Leistungsaufnahme der Anlagen. Außerdem entfal-

len mit dem Einsatz von Spektralradiometern die in der Praxis aufwendigen Messgerätevergleiche, die sich mit Breitbandradiometern nicht vermeiden ließen.

Bei der Entwicklung des Spektralradiometers als mobiles Einsatzgerät mussten spezielle Anforderungen berücksichtigt werden, z.B. eine geringe Bauhöhe, Einsatzfähigkeit unter harten Umgebungsbedingungen und eine einfache Bedienung.

Literaturhinweise:

- [1] C. Decker, *Kinetic Study and New Applications of UV Radiation Curing*, 2002
- [2] DIN 5031-7:1984 *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Benennung der Wellenlängenbereiche*
- [3] DIN 5031-11:2011 *Radiometer zur Messung aktiver Strahlungsgrößen – Begriffe, Eigenschaften und deren Kennzeichnung*
- [4] S. Nevas, P. Sperfeld, *Hg-Xe: Development of a New Transfer Standard for High UV Irradiances*, MAPAN, Journal of Metrology Society of India, March 2010, Vol.25, No. 1, pp 53-62

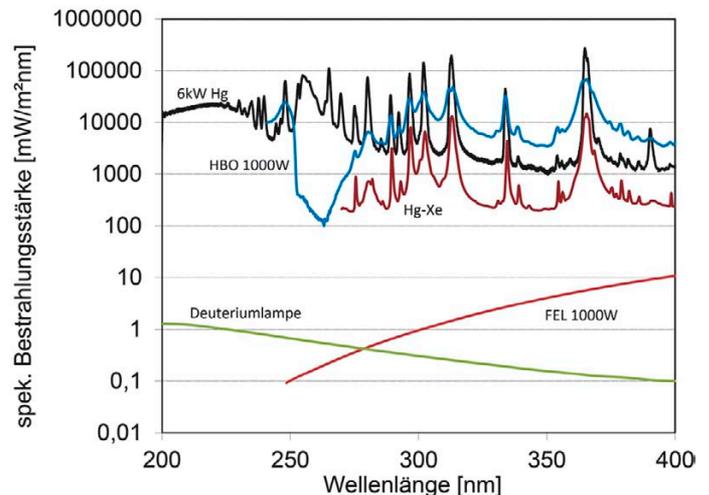


Bild 6: Spektrale Bestrahlungsstärken der Kalibrierlampen (Deuterium, FEL 1000 W, Hg-Xe) und Produktionslampen (HBO 1000 W, 6 kW Hg)

Ansprechpartner:

Dr. Mark Paravia
OpSyTec GmbH
Haid-und-Neu-Str. 7
D-76131 Karlsruhe
Tel. 0721/754087-11
Fax 0721/754087-19
eMail:
mark.paravia@opsytec.de
Internet: www.opsytec.de

