

IST METZ GmbH  
Lauterstrasse 14 - 18  
72622 Nürtingen

**„Umweltfreundliches Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-  
Aggregat zur UV-Härtung von lösungsmittelfreien Lacken  
und Farben“**

Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt  
gefördert unter dem Az: 22608 - 21/2 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

von  
Dr. Oliver Treichel

Nürtingen im Juli 2008

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>VERZEICHNIS VON BILDERN, ZEICHNUNGEN, GRAFIKEN UND TABELLEN.....</b>	<b>2</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>3</b>
<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>ENTWICKLUNGSARBEITEN UND ERREICHTE ERGEBNISSE.....</b>	<b>8</b>
<b>FAZIT .....</b>	<b>21</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>22</b>

## **Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen**

<i>Abbildung 1:</i>	<i>Aggregatquerschnitt mit Gitter für die thermodynamische Simulation</i>	9
<i>Abbildung 2:</i>	<i>Temperaturverteilung von durchströmender Luft im Aggregat-Schnitt</i>	10
<i>Abbildung 3:</i>	<i>Schematischer Aufbau eines UV-Sensorsystems</i>	11
<i>Abbildung 4:</i>	<i>3D-Darstellung der Blende zur Dämpfung der UV-Strahlung</i>	12
<i>Abbildung 5:</i>	<i>Querschnitt durch Lampenraum mit neuem, energie-optimierten Kühlkonzept</i>	12
<i>Abbildung 6:</i>	<i>3D-Konstruktion für das Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat</i>	13
<i>Abbildung 7:</i>	<i>Modulares Aggregatkonzept mit austauschbarer Reflektorgeometrie und Reflektorbeschichtung</i>	14
<i>Abbildung 8:</i>	<i>Testmuster für Hochleistungs-UV-Dioden Basiszelle</i>	15
<i>Abbildung 9:</i>	<i>Prototyp für Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat</i>	16
<i>Abbildung 10:</i>	<i>Raytracing-gestützte Optimierung der Reflektorgeometrie</i>	17
<i>Abbildung 11</i>	<i>Evolution der Effizienzsteigerung für das Strahler-/Reflektorsystem</i>	17
<i>Abbildung 12</i>	<i>UV-Sensorsystem für die Echtzeit Inline-Messung von UV-Strahlung</i>	18

## Zusammenfassung

Umweltrelevantes Ziel des in diesem Abschlussbericht präsentierten FuE Projektes war die Entwicklung eines weltweit neuen Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregates zur umweltschonenden UV-Härtung von lösungsmittelfreien Lacken und Farben für industrielle Anwendungen. Im Vergleich zu den vor Projektstart eingesetzten UV-Aggregaten wurde eine Halbierung des Energieverbrauchs bei gleichbleibender Produktqualität angestrebt. Erreicht werden sollte dieses Ziel unter anderem durch die Steigerung der Effizienz von UV-Strahler und Reflektor, sowie die Reduzierung des Energiebedarfs für die Aggregatkühlung. Weiter wurde eine Verringerung des im Härtingsprozess freigesetzten, umwelt- und gesundheitsgefährdenden Ozons, sowie eine Verlängerung der Einsatzdauer der verwendeten UV-Lampen angestrebt.

Die Entwicklungsarbeiten erfolgten in zwei Phasen. In der 1. Phase wurde ein, vor allem in Bezug auf die Geometrie und Reflexionsbeschichtung, neues Reflektorsystem entwickelt und aufgebaut. Weiter wurde eine deutlich effizientere Kühlung für das UV-Aggregat entwickelt. Durch die dargestellten Maßnahmen sowie konstruktive Änderungen konnte der für den Betrieb des neuen Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregates erforderliche Energieaufwand, verglichen mit konventionellen UV-Aggregaten, bei identischem Produktergebnis um 40 % reduziert werden. Die Einsatzdauer der verwendeten UV-Strahler wurde um Faktor 10, d. h. auf mehrere 1.000 Stunden, erhöht.

In der 2. Projektphase folgten Untersuchungen zum Einsatz von Hochleistungs-UV-Dioden bzw. Diodenarrays für die UV-Härtung von Farben und Lacken. Aufgrund der für die geplante industrielle Anwendung unzureichenden Leistungsdichte sowie den hohen Investitionskosten konnten mit den verfügbaren UV-Dioden, bzw. im Projekt entwickelten Diodenarrays, keine befriedigenden Härtingsergebnisse erzielt werden.

Auf Basis der zum Abschluss des FuE-Projekt zur Verfügung stehenden Ergebnisse soll bis zum Jahr 2009 eine UV-Aggregatbaureihe für Strahlerlängen  $\leq 500$  mm aufgebaut und in den internationalen Markt eingeführt werden. Darauf aufbauend ist eine Erweiterung der UV-Aggregatbaureihe für Lampenlängen bis 2.000 mm vorgesehen.

Die in diesem Abschlussbericht präsentierten Entwicklungsarbeiten wurden, mit Ausnahme eines Entwicklungsauftrages, weitgehend eigenständig ohne Mitwirkung von Kooperationspartnern von IST METZ durchgeführt.

Das in diesem Abschlussbericht präsentierte FuE-Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) im Rahmen eines Förderprojektes (Aktenzeichen: 22608) unterstützt.

## Einleitung

Als Ausgangssituation werden Druckprozesse für die Beschriftung, bzw. zur Erzielung von Design-Effekten, sowie zum Schutz von Oberflächen vor Korrosion und Witterungseinflüssen in praktisch allen Industriebereichen und Branchen als Standardprozess eingesetzt. Ca. 70 % der hierfür in Deutschland produzierten Lacke und Farben sind konventionelle, lösemittelhaltige Ein- und Zweikomponenten-Lacksysteme mit einem hohen Emissionsanteil an flüchtigen organischen Chemikalien. Diese, auch als VOC (Volatile-Organic-Compounds) bezeichneten Lösemittel sind in hohem Maße gesundheits- und umweltschädlich. Neben konventionellen lösemittelhaltigen Lacken konnten sich in den zurückliegenden Jahren wasserbasierte- und Pulverlack- sowie strahlhärtende Lacksysteme im Markt etablieren.

Bei wasserbasierten Farb- und Lacksystemen kommen meist die von lösungsmittelhaltigen Lacken bekannten chemischen Funktionalitäten und Vernetzungsmechanismen in weiterentwickelter Form zum Einsatz. Entsprechend erfordern Wasserlacke nach wie vor Anteile von Hilfslösemitteln, die vor der Aushärtung unter Energie-, Platz- und Zeitaufwand aus dem Lackfilm entfernt werden müssen. Infolgedessen sind, wenn auch in reduziertem Umfang, bei wasserbasierten Farb- und Lacksystemen immer noch VOC-Emissionen gegeben.

Pulver- und strahlenvernetzende Lacke unterscheiden sich in bezug auf die Applikationstechnik sowie die chemischen Vernetzungsmechanismen grundsätzlich von den wasserbasierten Materialien. Sie sind als besonders umweltfreundlich anzusehen, da nur hier eine völlige Lösemittel- und Emissionsfreiheit gegeben und nur bei strahlenhärtenden Beschichtungsstoffen und Pulverlacken ein umfassendes Recycling und die nahezu vollständige Wiederverwertung möglich ist. Bei strahlenhärtenden Farb- und Lacksystemen handelt es sich um flüssige, lösungsmittelfreie Materialien. Sie haben in den letzten 25 Jahren zunehmend technische Bedeutung und einen relativ hohen Entwicklungsstand erreicht. Technisch unterscheidet man:

- radikalisch vernetzende Bindemittel-Monomer-Kombinationen, insbesondere auf der Basis von ungesättigten Acrylaten oder Polyestern, deren Vernetzung entweder durch UV-Bestrahlung oder Elektronenbestrahlung (EB) gestartet wird.

Bei UV-härtenden Systemen werden dem Lack sogenannte Photoinitiatoren beigefügt, die UV-Strahlung absorbieren und danach Zerfallsprozesse durchlaufen, durch die die benötigten Startradikale erzeugt werden.

Bei Elektronenstrahl-härtenden Systemen werden keine zusätzlichen Bestandteile für den Radikalstart benötigt. Die eingestrahlteten Elektronen sind in der Lage, direkt Radikale zu erzeugen. Die Bestrahlungsanlagen sind jedoch wesentlich aufwendiger und kostspieliger als UV-Anlagen.

- kationisch vernetzende Epoxidharze, Epoxid-Polyol- oder Epoxid-Venylether-Kombinationen. Die Reaktion wird in der Regel ebenfalls durch UV-Bestrahlung ausgelöst. Hierzu werden Onium-Salze als Photoinitiatoren eingesetzt, bei deren Zerfall starke Säuren als Startagenzien entstehen.

Strahlenhärtende Systeme in Form von Druckfarben, Überdrucklacken, Klebstoffen, usw. spielen vor allem bei der Beschichtung von Papieren und Folien sowie von Holzoberflächen eine wichtige Rolle. Aufgrund der folgenden technologischen, ökologischen und auch ökonomischen Vorteile wurden in den zurückliegenden Jahren speziell bei strahlhärtenden Farb- und Lacksystemen Wachstumsraten von über 10% erzielt:

- Eliminierung der gesundheits- u. umweltschädigenden Lösungsmittel (VOC) Emissionen
- Schnelles Aushärten der Lackschicht innerhalb weniger Sekunden, dadurch ist ein schnelles Handling bzw. Weiterbedrucken des Objektes möglich.
- Sehr geringer Lackverbrauch durch reduzierte Schichtdicken < 50 µm möglich.
- UV-härtende Lacke sind zu 100 % recyclingfähig.

Die Kernkomponente von UV-Härteanlagen ist das UV-Aggregat zur Bestrahlung des Druckobjektes. Das UV-Aggregat besteht im Wesentlichen aus den Komponenten: UV-Lampe, Reflektor, Vorschaltgerät, Kühlung sowie Steuerung/Regelung und Sensorik für die Überwachung der UV-Härtungsanlage. Ein zu Projektstart in industriellen Anwendungen für die UV-Härtung eingesetztes Standard-Aggregat mit einer Strahlungsleistung von 200 W/cm hat einen durchschnittlichen Leistungsbedarf von ca. 14 kW pro Strahler. Für industrielle Anwendungen werden üblicherweise 4 – 5 UV-Strahler je Anlage installiert. Bei 2.000 Betriebsstunden pro Jahr ergibt sich hieraus ein Energieverbrauch von ca. 126 MWh pro Jahr und Anlage. Die IST METZ GmbH fertigt und installiert als führender Anbieter von UV-Härteanlagen weltweit jährlich mehr als 500 Anlagen. Hieraus ergibt sich ein installierter Gesamt-Energieverbrauch von 63.000 MWh pro Jahr.

Die zu Projektstart verfügbaren wissenschaftlichen Arbeiten konzentrierten sich vor allem auf die Untersuchung und Verbesserung der Vernetzung von UV-Lacken. Die Arbeiten zeigten, dass die Qualität der Vernetzung, außer von Prozessparametern wie Auftragsmenge, Maschinengeschwindigkeit und Strahlerleistung vor allem durch die Inertisierung, d.h. die Reduzierung von O<sub>2</sub> im Bereich der Lack-Aushärtungszone, entscheidend verbessert werden kann [1, 2, 3]. Ein weiteres Forschungsfeld bestand in der Untersuchung der Eindringtiefe und Durchhärtung von UV-gehärteten Lackschichten senkrecht zur Oberfläche, d.h. die 3. Dimension der Lackschicht, während und nach dem UV-Härtungsprozess bei Standard UV-Lacken [4] bzw. bei speziell pigmentierten Lacken [5, 6]. Weitere Forschungsarbeiten befassten sich mit der gezielten Erzeugung von Oberflächeneffekten, wie z.B. matte oder glänzende Lackoberflächen, sowie mit der Untersuchung von Oberflächenfehlern (z.B. Glanzschattierungen auf Oberflächen) [7].

Die zu Projektstart etablierte UV-Aggregattechnologie bot erhebliches Potential zur Einsparung von elektrischer Energie sowohl beim Start wie auch im Betrieb von UV-Aggregaten.

Zielsetzung des FuE Projektes war die Reduzierung des elektrischen Energiebedarfs von UV-Aggregaten um 50 % bei gleichbleibender Produktqualität durch Anpassung des emittierten UV-Spektrums und Optimierung von Steuerung, Reflektorgeometrie und Reflektor-

beschichtung sowie durch die Reduzierung des Abstands zwischen UV-Strahler und Objekt. Bei Realisierung der geplanten Energieeinsparung von 50 % ergibt sich allein für die jährlich von der IST Metz installierten UV-Anlagen eine Energieeinsparung von ca. 32.000 MWh pro Jahr. Dies entspricht dem jährlichen Durchschnittsverbrauch von 10.000 Haushalten bzw. einer Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um ca. 11.520 t pro Jahr. Zusätzliches Energieeinsparpotential entsteht durch die Nachrüstung von Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregaten in bereits installierte UV-Härteanlagen sowie durch die von IST Metz in den zurückliegenden Jahren realisierte Steigerungsrate von 10 % pro Jahr.

Berücksichtigt man, dass die in Deutschland verbrauchte Elektroenergie vorwiegend aus Kohlekraftwerken stammt, so ist die Reduzierung des Energieverbrauchs für energieintensive industrielle Anwendungen der erfolgversprechendste Weg zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Weiter wird durch die Senkung der Energie- und damit der Betriebskosten die Verdrängung von gesundheits- und umweltschädigenden, lösemittelhaltigen Lackieranlagen zugunsten von umweltfreundlichen UV-Härteanlagen beschleunigt. Bei erfolgreichem Projektabschluss können somit die folgenden ökonomischen- und Umweltvorteile erzielt werden:

- Erhebliche Energieeinsparung und damit CO<sub>2</sub>-Minderung
- Eliminierung von gesundheits- und umweltschädigenden Lösemittel- (VOC)-Emissionen
- Materialeinsparungen durch geringere Lackschichtdicken
- Effiziente Nutzung von Ressourcen durch 100%-tige Recyclingfähigkeit der Flüssiglacke
- Präzisere, schnellere und effizientere Produktion durch schnelle Aushärtung und Inline-Integration von vernetzten Fertigungsprozessen.

Als weiteres Ziel sollte das Energie-Einsparungspotential von Hochleistungs-UV-Dioden bzw. Diodenarrays zur Härtung von UV-Lack- und Farbsystemen untersucht werden.

Die Aufgabenstellung in Form der geplanten Reduzierung des Energiebedarfs um 50 % bei gleichbleibender Produktqualität sah erstmals einen systematischen, ganzheitlichen Ansatz zur Untersuchung und Entwicklung von Komponenten sowie des Gesamtsystems für das geplante Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat vor. In diesem ganzheitlichen Ansatz wurden die Grundlagen für wesentliche, Wirkungsgrad beeinflussende optische, elektrisch/elektronische und thermische Komponenten, wie Reflektorgeometrie und -beschichtungen, UV-Lampe sowie für den Kühlkreislauf in engem Zusammenspiel mit der Gesamtkonstruktion des umweltfreundlichen Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregates entwickelt und in Form von Versuchsmustern und Prototypen aufgebaut.

Nachfolgend werden die zu lösenden Aufgabenstellungen mit Bezug auf die im Projekt zu entwickelnden Komponenten für das geplante energiesparende UV-Aggregat dargestellt:

Die Betrachtung der Leistungsbilanz einer modernen, vor Projektstart dem Stand der Technik entsprechenden Mitteldruck Hg UV-Lampe zeigte, dass ca. 28% der eingespeisten elektrischen Leistung in Form von UV-Strahlung emittiert werden. Die verbleibenden 72%

werden als sichtbares Licht (21%) sowie IR- (34%) und konvektive Strahlung (17%) emittiert. Ein zentraler Lösungsansatz zur Reduzierung des Energieverbrauches bestand darin, den Anteil der emittierten UV-Strahlung durch Optimierung der Lampendotierung sowie die gezielte Reflexion des sichtbaren- und IR-Strahlungsanteils zu erhöhen. Ca. 55 % der von der Lampe emittierten Strahlung wird von dem Reflektorsystem auf das Substrat reflektiert. Entsprechend haben sowohl die Geometrie wie auch die Oberflächeneigenschaften des Reflektorsystems einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch und den Wirkungsgrad des UV-Aggregates.

Grundsätzlich unterscheidet man parabolische und elliptische Reflektorgeometrien. Für die UV-Härtung sind sowohl das parabolische wie auch das elliptische Reflektorprofil nicht immer optimal. Um eine gleichmäßige Trocknung von Lacken und Farben sicherzustellen wird vielmehr eine speziell an die Anforderungen angepasste Reflektorgeometrie gefordert, die ein flächiges Strahlprofil mit konstanter Strahldichte auf der gesamten Substratfläche erzeugt. Zur Entwicklung einer Geometrie für die optimale Ausleuchtung des Substrates waren im Projekt numerische Ray-Tracing-Simulationen vorgesehen. Die Ergebnisse der Simulationen sollten als Grundlage für die Entwicklung und den Aufbau eines Reflektorsystems mit einheitlicher Strahldichte in der Objektebene verwendet werden. Weiter bot die Entwicklung von speziellen, UV-reflektierenden Schichtsystemen erhebliches Potential zur Steigerung des Wirkungsgrades von UV-Härteanlagen. Im Projekt sollten unterschiedliche Beschichtungen sowie Schichtsysteme in Bezug auf ihre UV-reflektierenden und für Wellenlängen > 400 nm transparenten Eigenschaften untersucht werden.

Als weitere Aufgabe sollte durch die Verringerung der von UV-Lampen abgestrahlten Wärme der Abstand zwischen Strahler und Objekt von ca. 55 mm (vor Projektstart) auf < 30 mm reduziert werden, ohne dass empfindliche Substrate bzw. Trägermaterialien (Kunststoffe, Folien, usw.) beschädigt werden. Da die UV-Leistung mit abnehmendem Abstand zwischen Strahler und Substrat linear zunimmt, war gleichzeitig eine erhebliche Steigerung des optischen Wirkungsgrades geplant.

Mit den aufgelisteten Maßnahmen sollte der optische Wirkungsgrad von UV-Lampen erhöht und gleichzeitig die im Prozess abzuführende Abwärme erheblich reduziert werden. Entsprechend war eine Verringerung des Energiebedarfs für die benötigte Kühlleistung geplant.

In der 2. Phase des FuE-Projektes sollte der Einsatz von Hochleistungs-UV-Dioden für die Härtung von Farben und Lacken untersucht werden. Bereits vor Projektstart wurden Hochleistungs-UV-Dioden mit einer Leistung von bis zu 100 mW (optisch) bekannt. UV-Dioden bieten durch eine vereinfachte Ansteuerung, wesentlich niedrigere Arbeitstemperaturen sowie kleine Einbauabmessungen im Vergleich zu konventionellen UV-Lampen erhebliche Vorteile. Aufgrund der für die UV-Härtung von Farben und Lacken günstigen Ausgangsvoraussetzungen wurde, aufbauend auf den Ergebnissen der 1. Projektphase, eine weitere Reduzierung des Energieverbrauchs sowie die Senkung der Ozon-Emissionen bei speziell für den UV-Diodeneinsatz geeigneten Anwendungen mit kleinen zu bearbeitenden Flächen erwarten.

## Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen, im FuE-Projekt von IST METZ durchgeführten Arbeitsschritte, sowie die angewandten Methoden und erzielten Ergebnisse dargestellt.

Zu Projektstart wurden umfangreiche Recherchen zu existierenden nationalen und internationalen Patenten, sowie auf dem Markt verfügbaren UV-Aggregaten, insbesondere unter dem Gesichtspunkt Energieverbrauch und nutzbare UV-Leistung, durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse aus Recherchen folgten umfangreiche Vorversuche zur Evaluierung und Auswahl erfolgversprechender Strategien für die Entwicklung des geplanten UV-Aggregates mit reduziertem Energieverbrauch bei gleich bleibender UV-Ausbeute. Konkret wurden die folgenden Ansätze untersucht:

1. Konventionelle (KVG) sowie elektronische (EVG) Vorschaltgeräte
2. Geometrie und Dotierung von UV-Strahlern
3. Betriebsparameter für UV-Strahler (insbes. Strom und Spannung)
4. Einfluss der Reflektorgeometrie und Reflektoroberflächen bzw. -beschichtungen
5. Kühlkonzepte für den Lampenraum

Die aus den Vorversuchen erarbeiteten Ergebnisse zeigten, dass sich erfolgversprechende Ansätze zur Reduzierung des Energieverbrauchs von UV-Aggregaten vor allem durch die Optimierung der Geometrie des Lampenraums sowie der Kühlung ergeben. Als weiteres Ergebnis wurde mit den in Voruntersuchungen erarbeiteten Informationen von IST METZ eine Datenbank aufgebaut, die die wesentlichen Parameter von auf dem Markt verfügbaren UV-Aggregaten, insbesondere zu Trockenleistung und Energie-Einsparpotenzialen, systematisch erfasst.

Weiter folgten Vorversuche zur Realisierung einer ozonfreien Lampe. Hierzu wurden unterschiedliche Spektralbereiche im UVA, UVB und UVC-Bereich sowie 4 verschiedene Glas-typen in Bezug auf ihre Eignung zur Erhöhung der Trocknungsleistung untersucht. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zeigten, dass bei Verringerung der Ozonemission die Trocknungsleistung um  $\geq 30\%$  sinkt. Da die Ozonreduzierung zwangsläufig mit einer Leistungsreduzierung verbunden ist, wurde dieser Entwicklungspunkt im weiteren Projekt-verlauf zurückgestellt.

Einen Schwerpunkt der im Projekt von IST METZ durchgeführten Entwicklungsarbeiten bildeten numerische Simulationsberechnungen zur Optimierung der Geometrie des Lampenraums sowie der Kühlung von Gehäusebaugruppen (z. B. Kühlleitbleche, usw.). Als Ergebnis der Raytracing-Simulationen konnte die Reflektorgeometrie soweit optimiert, bzw. die Energieausbeute soweit gesteigert werden, dass die Strahlerleistung durch die realisierte

Effizienzsteigerung von ursprünglich 200 W/cm Lampenlänge bei gleichem Trocknungsergebnis zukünftig auf ca. 110 W/cm reduziert werden konnte.

Ebenfalls Gegenstand der Simulationsrechnungen war die thermodynamische Auslegung und Feinabstimmung der Kühlung für das geplante Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat. Das Ziel bestand darin, die durch die erforderliche Kühlleistung bzw. durch die Energiebilanz vorgegebene Luftmenge mit möglichst geringem Aufwand durch das Aggregat zu führen. Das Konzept zur Kühlung des UV-Aggregates sah einen internen Kühlkreislauf für den Lampenraum sowie einen äußeren Gehäuse- bzw. Bauraum-Kühlkreislauf vor. Mit Hilfe von thermodynamischen Simulationsrechnungen wurden die Strömungs- bzw. Druckverluste sowohl für den internen- wie auch für den Bauraum-Kühlkreislauf deutlich minimiert. Als weiteres Ergebnis konnte die Zahl der Iterationsschritte für die applikationsspezifische Auslegung und Optimierung von UV-Aggregaten durch die Simulation der thermodynamischen Prozesse deutlich, d. h. voraussichtlich um bis zu 50 %, reduziert werden. In der folgenden Abbildung 1 wird ein für die thermodynamische Optimierung des Kühlkreislaufs generiertes Gitter am Beispiel eines Aggregat-Querschnitts gezeigt.

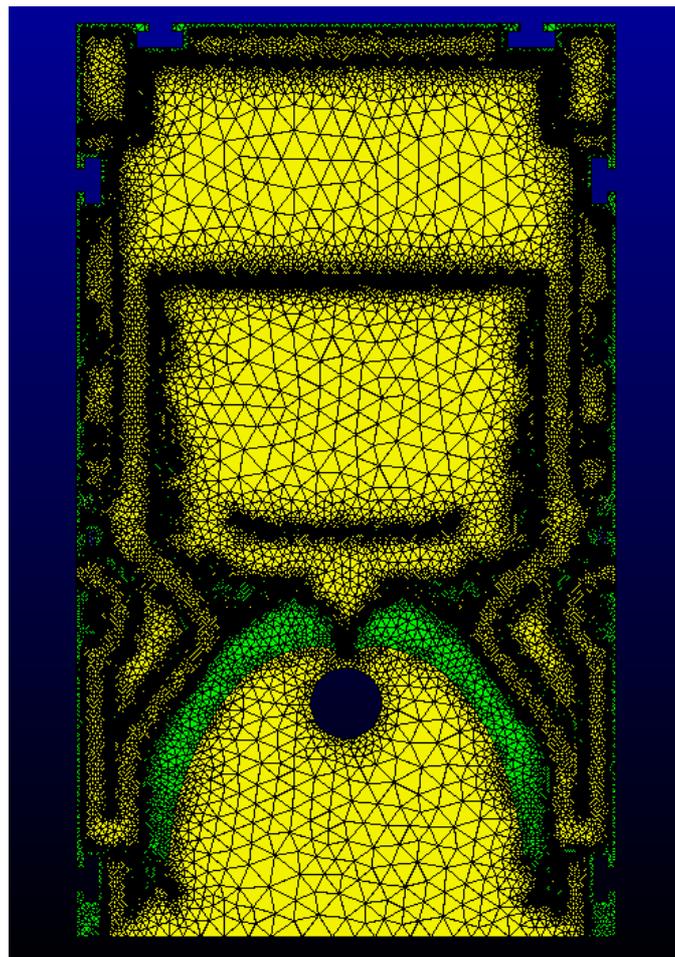
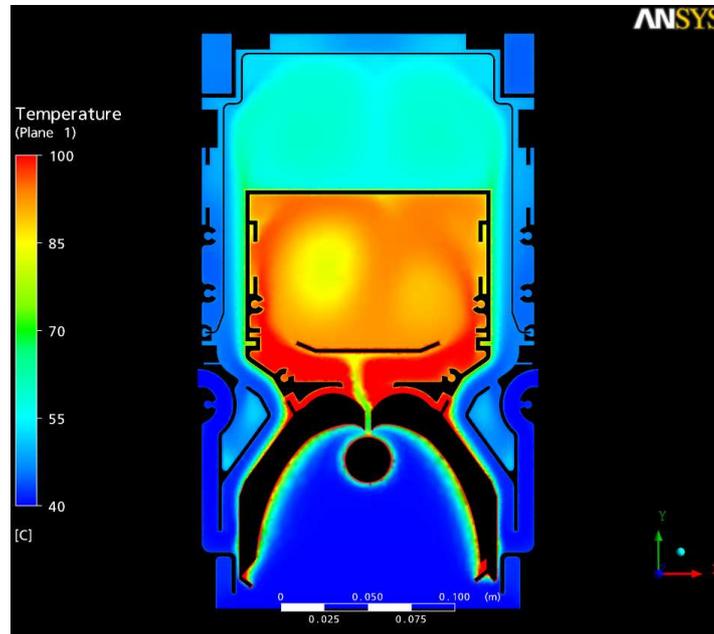


Abbildung 1: *Aggregatquerschnitt mit Gitter für die thermodynamische Simulation*

In Abbildung 2 wird beispielhaft ein Ergebnis der von IST METZ im FuE-Projekt durchgeführten Simulationsrechnungen, in der sowohl der interne- wie auch der äußere Kreislauf für die Strahler- und Bauraumkühlung optimiert wurde, gezeigt.



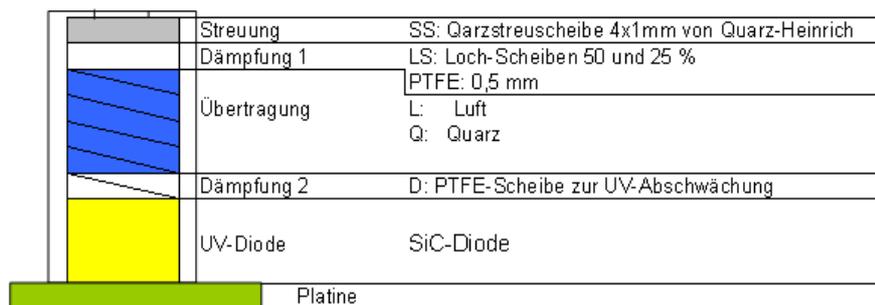
*Abbildung 2: Temperaturverteilung von durchströmender Luft im Aggregat-Schnitt*

In Zusammenarbeit mit dem Auftragnehmer eta-plus wurden unterschiedliche Dotierungen in Bezug auf die Wirkung zur Steigerung der Effizienz von UV-Strahlern untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Strahlungsausbeute durch Erhöhung der Dotierung nicht beliebig gesteigert werden kann. Durch vorwiegend empirische Untersuchungen konnte eine partielle Steigerung der Strahlungsemission erzielt werden. Konkret konnte die Strahlungsausbeute durch Änderung der Dotierung im Bereich von 200 – 400 nm erhöht werden. Im Wellenlängenbereich von 400 – 440 nm ergaben die Messungen dagegen eine Reduzierung der Strahlungsausbeute um bis zu 9 %. Die Reduzierung der Strahlungsleistung ist vermutlich auf die Ga-Dotierung zurückzuführen. Weiter erfolgten in Zusammenarbeit mit dem Auftragnehmer eta-plus umfangreiche Alterungsversuche über eine Zeitspanne von bis zu 1.175 Stunden.

Weiterhin wurde eine Software für die Ansteuerung des energieoptimierten UV-Strahlersystems konzipiert, programmiert und in Testreihen erprobt.

Ebenfalls gemeinsam mit dem Auftragnehmer eta-plus wurde eine UV-Sensorik für die Inline Messung in UV-Aggregaten entwickelt und aufgebaut. Die Ergebnisse aus Voruntersuchungen hatten gezeigt, dass bei der geplanten Integration der UV-Sensorik in der Nähe von UV-Lampen erhebliche Probleme zu lösen sind. Insbesondere die unzureichende Langzeit-Standfestigkeit und die Verschmutzung der UV-Sensoren, sowie die hohe Temperaturbelastung in Strahlernähe führten zu einer frühzeitigen Drift und Zerstörung der Sensoren.

Im ersten Entwicklungsschritt stand die iterative Optimierung der Sensorstandzeit im Vordergrund. Konkret wurden die Standzeit-begrenzenden Bauteile und Komponenten des UV-Sensors selektiert und in Laboruntersuchungen einzeln in Bezug auf Eigenschaften wie Drift- und Langzeitverhalten untersucht. Aufgrund der für Langzeituntersuchungen erforderlichen Zeitspannen waren diese Testreihen sehr zeitaufwendig. Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen wurden beim Auftragnehmer eta-plus UV-Sensoren aufgebaut und in Testreihen untersucht. In Abbildung 3 wird der schematische Aufbau sowie ein Bild des von eta-plus entwickelten UV-Sensormusters gezeigt.



*Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines UV-Sensorsystems*

Aufgrund der in den Laborversuchen aufgetretenen, vor allem thermischen Probleme, wurde das Komponentenportfolio für die UV-Sensorik nochmals diversifiziert und verschiedene Detektoren, Diffusoren und Eintrittsoptiken systematisch in Bezug auf ihre Einsatzmöglichkeiten für die geplante UV-Sensorik untersucht. Weiter wurden die ausgewählten Komponenten in Langzeittests erprobt. Als Ergebnis wurden mehrere stabile Kombinationen von Detektoren, Diffusoren und Eintrittsoptiken identifiziert. Die UV-Sensoren wurden mehrfach im FuE-Projekt überarbeitet und optimiert. Im Vordergrund der Optimierungsarbeiten stand vor allem die Reduzierung der Sensordrift, die Steigerung der Messgenauigkeit sowie die Sicherstellung der Standzeit.

Gegen Ende des FuE-Projektes wurde bei der Entwicklung der UV-Sensorik ein Durchbruch erzielt, durch den die Sensordrift deutlich reduziert und die Messgenauigkeit gesteigert werden konnte. Ausschlaggebend für die Verbesserung der Sensoreigenschaften war die Substitution des bis dahin zur Dämpfung der UV-Strahlung verwendeten, aus Teflon hergestellten Strahlungsabschwächers durch eine speziell für diese Aufgabe entwickelte Blende (siehe Abbildung 4). Im Gegensatz zum bisher verwendeten Teflon-Abschwächer zeigte die Blende auch über lange Einsatzzeiträume keine Alterung, wodurch ein deutlich stabileres Messverhalten für das UV-Sensorsystem in Laborversuchen nachgewiesen werden konnte.

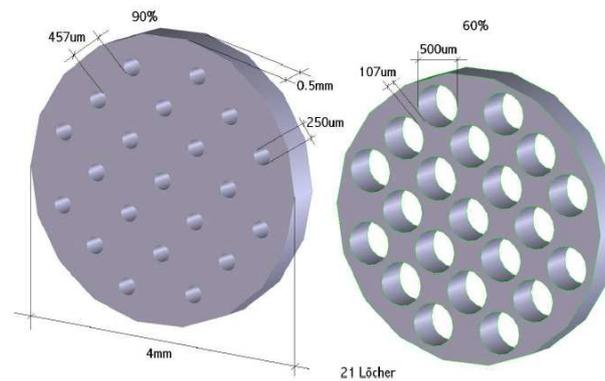


Abbildung 4: 3D-Darstellung der Blende zur Dämpfung der UV-Strahlung

Ebenfalls Gegenstand der Arbeiten war die Entwicklung eines energieoptimierten Luft-Kühlungskonzeptes für das Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat. Die vorbereitenden numerischen Simulationen für die thermodynamische Auslegung und Optimierung der Kühlung wurden bereits zuvor beschrieben und in den Abbildungen 1 und 2 gezeigt.

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Simulationsrechnungen wurden die Konstruktionsarbeiten für die neue Reflektorgeometrie sowie für das Gesamt-UV-Aggregat durchgeführt. In der folgenden Abbildung 5 wird ein Querschnitt durch das neu im FuE-Projekt entwickelte UV-Aggregatgehäuse mit energietechnisch optimierter Kühlung gezeigt.

**Aufbau Reflektor**  
**Kühlung Inlay / Lampe:**

Kühlkreislauf Lampe

Kühlkreislauf Reflektor

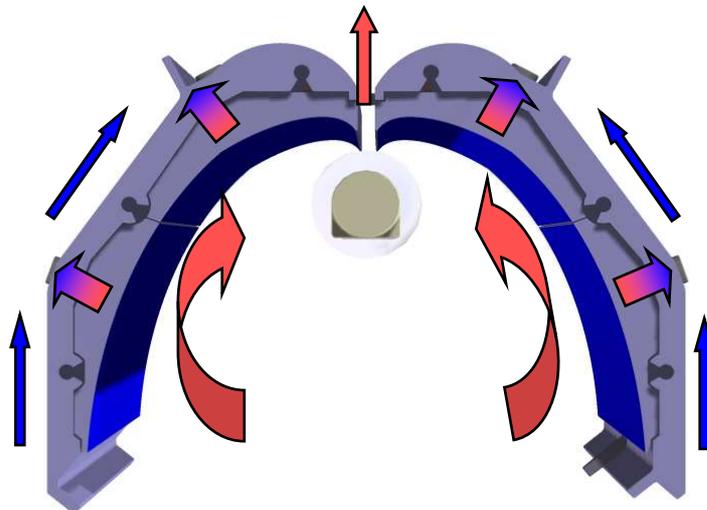


Abbildung 5: Querschnitt durch Lampenraum mit neuem, energie-optimiertem Kühlkonzept.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde das im FuE-Projekt entwickelte Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat in Bezug auf Gewicht optimiert. Hierzu wurde der Einsatz von Magnesium-Strangpressprofilen für das neu geplante UV-Aggregat untersucht. Da die spezifische Dichte von Magnesium ca. 1/3 niedriger als die Dichte von Aluminium ist, kann durch den Einsatz von Magnesium eine deutliche Reduzierung des Aggregatgewichtes erreicht werden.

In der folgenden Abbildung 6 wird eine 3D-Konstruktionszeichnung für das im FuE-Projekt von IST METZ entwickelte Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat gezeigt.

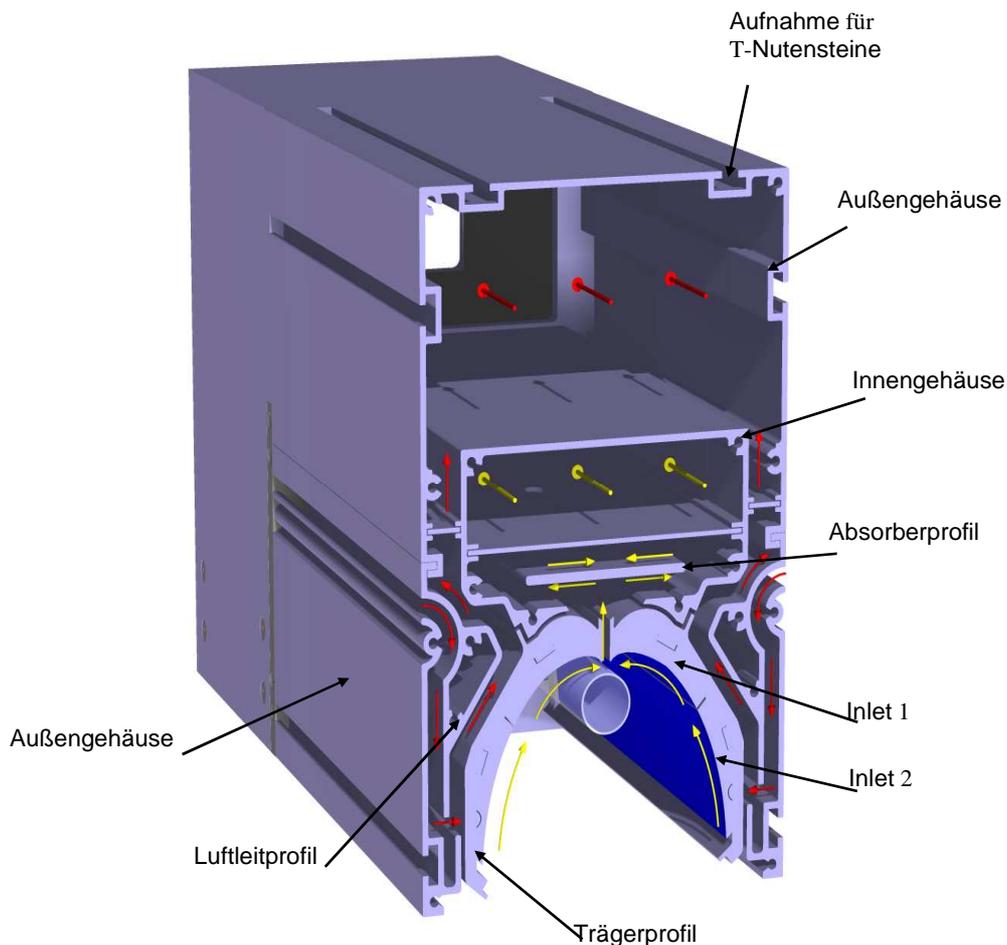
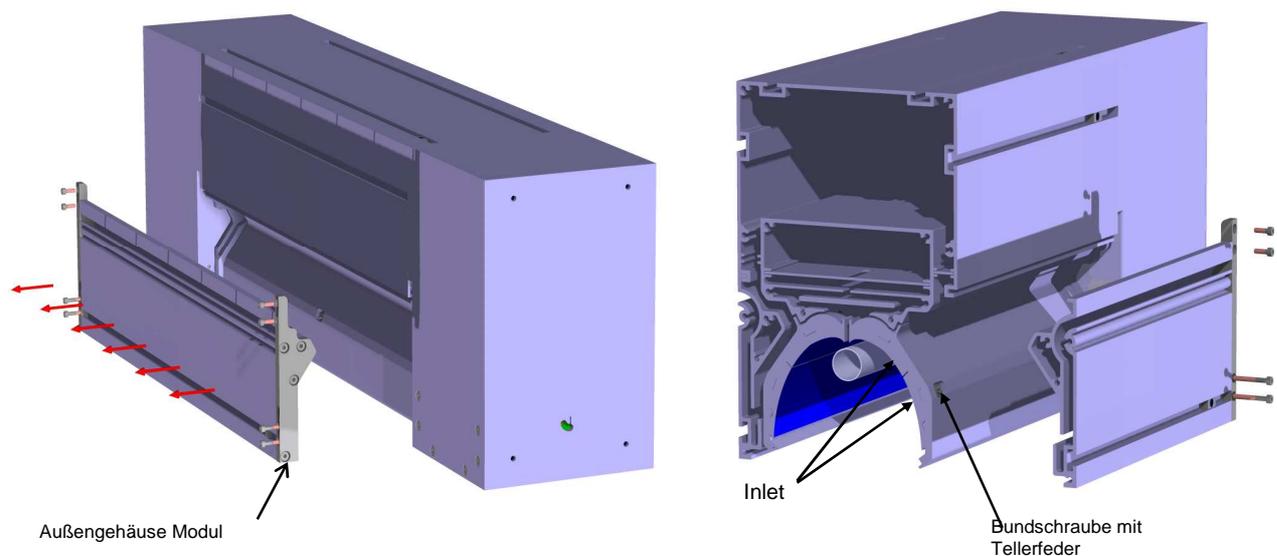


Abbildung 6: 3D-Konstruktion für das Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat

Das Konzept für das Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat wurde modular gestaltet, so dass durch den Austausch der Inlays applikationsspezifisch angepasste Reflektorgeometrien bzw. Reflektorbeschichtungen in das Aggregat integriert werden können (Abbildung 7). Damit ist z. B. wahlweise die Anpassung an UV-Applikationen durch Integration von Kaltlichtspiegeln, bzw. an UV- und IR-Anwendungen durch Integration von Alu-Reflektoren möglich.



*Abbildung 7: Modulares Aggregatkonzept mit austauschbarer Reflektorgeometrie und Reflektorbeschichtung*

In einem weiteren Entwicklungsschritt wurde das im FuE-Projekt entwickelte Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat für den Einsatz mit kleineren Lampenlängen von 300 – 550 mm skaliert.

Die als wesentliches Ergebnis des FuE-Projektes realisierte Steigerung des UV-Aggregat-Wirkungsgrades wurde vor allem durch eine Vergrößerung der Reflektorfläche erreicht. Die Herstellung dieser vergrößerten Reflektorfläche erforderte umfangreiche Änderungen im Herstellungsprozess sowie die Anpassung von Beschichtungs- und Qualitätssicherungsprozessen.

Zu Projektabschluss stand ein erster Prototyp für das Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat zur Verfügung. Die Vorbereitungen zur Durchführung von Feldversuchen wurden weitgehend abgeschlossen. Zu Projektende waren die Feldversuche mit dem im FuE-Projekt entwickelten Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat noch nicht begonnen.

Einen weiteren Schwerpunkt im FuE-Projekt bildeten Untersuchungen zur Definition und Spezifikation der Anforderungen sowie zur Konzeption, Entwicklung und Realisierung von Hochleistungs-UV-Dioden Basiszellen für die Härtung von UV-Farben bzw. Lacken. In Vorversuchen wurden wesentliche Parameter, wie die emittierten Wellenlängen und optischen Strahlungsleistungen, sowie zur Realisierung der notwendigen hohen Packungsdichte, usw., ermittelt und ein Konzept für die Basiszelle von IST METZ erarbeitet. Konkret wurde eine Basiszelle, bestehend aus 10 LEDs, definiert und spezifiziert sowie eine Simulation der Diodenanordnung zur Optimierung der Homogenität des Strahlungsfeldes durchgeführt. Im Anschluss wurden geeignete Hochleistungs-UV-LEDs ausgewählt sowie ein Platinen-Layout für eine Hochleistungs-UV-Dioden Basiszelle entwickelt und aufgebaut.

Weiter wurde ein Testmuster für die Hochleistungs-UV-Dioden Basiszelle bei IST METZ aufgebaut und in Bezug auf ihre Grundfunktionen verifiziert. In der folgenden Abbildung 8 wird der Testaufbau mit dem Basiszellen-Testmuster gezeigt.

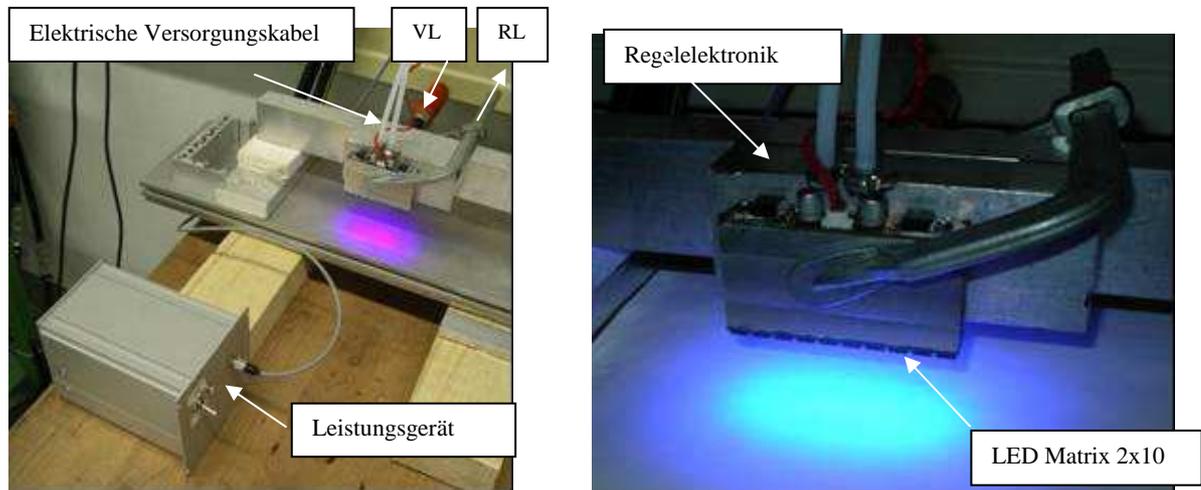


Abbildung 8: *Testmuster für Hochleistungs-UV-Dioden Basiszelle*

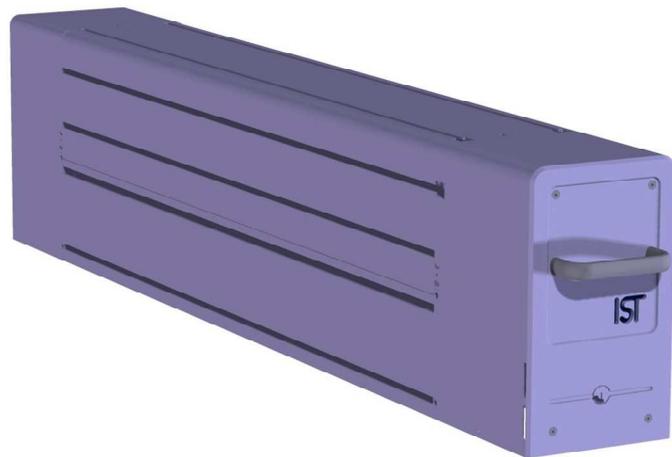
Das gezeigte Basiszellen-Testmuster bestand aus 2 x 10 LED-Zellen, wobei jeweils 10 LED-Zellen in Reihe betrieben wurden. Die Dioden emittierten UV-Strahlung mit einer Wellenlänge von 365 nm (Linienbreite ca. 10 nm FWHM). Der Strom für den Betrieb der Basiszelle wurde, bezogen auf einen konstanten UV-Output, geregelt. Der Trägerkörper wurde wassergekühlt, mit einer Kühlleistung von 2l/min, betrieben. Eine Untergrenze für die Kühlleistung wurde nicht untersucht. Die UV-Basiszelle wurde so konzipiert und aufgebaut, dass sie in allen Richtungen frei kaskadierbar war, ohne dass an den Übergangsstellen zwischen den Basiszellen Brüche in der Bestrahlungshomogenität entstanden.

Als Ergebnis der Laborversuche zeigte sich, dass die im FuE-Projekt entwickelten UV-Dioden-Basiszellen nicht die für den Einsatz in Industrieapplikationen, wie z.B. in der Druck-Laminier- und Klebetechnik, erforderliche Leistungsdichte zur Verfügung stellten. Ein weiteres Hemmnis für den Einsatz von diodenbasierten UV-Härtungssystemen in industriellen Anwendungen bestand in den relativ hohen Investitionskosten.

Als weiterer einschränkender Faktor hat sich gezeigt, dass bis zu Projektende keine auf die speziellen Anforderungen von LED-basierten Härtingsanlagen abgestimmten Farb-, Lack- oder Klebstoffsysteme mit dem erforderlichen, schmalbandigen Absorptionsverhalten der Fotoinitiatoren zur Verfügung standen.

Als Fazit zeichnet sich ab, dass die LED-Technologie zu Projektabschluss lediglich als Komplementärtechnik für spezielle Nischenanwendungen von Interesse ist.

Als wesentliches Ergebnis des FuE-Projektes stand zu Projektabschluss ein Prototyp für das neue Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat zur Verfügung, der vor allem durch die Entwicklung eines neuen, hocheffizienten Reflektors sowie einer neuen Luftkühlung im Vergleich zu konventionellen UV-Aggregaten ca. 40 % weniger Energie zur Realisierung identischer Härtungsergebnisse benötigte. In Abbildung 9 wird der im FuE-Projekt entwickelte Prototyp für das Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat gezeigt.



#### **Technische Spezifikation:**

- Leistung: 200 W/cm
- Abluftmenge: 60 m<sup>3</sup>/h
- getrennte Luftführung Reflektor / Lampe
- Dimmbereich: 30-100%
- Schnellwechsellampe FLC<sup>®</sup>
- Inlay-Technologie

*Abbildung 9: Prototyp für Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat*

Erreicht wurde dieses Ziel durch verschiedene Maßnahmen. Zum Einen wurde durch die Raytracing-gestützte Optimierung der Reflektorgeometrie sowie durch die Entwicklung von neuen, speziell an die Anforderungen der geplanten Anwendung angepasste selektive Reflektorbeschichtungen der auf das Substrat reflektierte UV-Strahlungsanteil von konventionell 60 % - 70 % auf 93 % gesteigert. Weiter absorbiert das neu entwickelte Reflektorsystem einen deutlich größeren Anteil der nicht für die UV-Härtung nutzbaren Strahlung. In der folgenden Abbildung 10 wird schematisch die optimierte Reflektorgeometrie dargestellt.

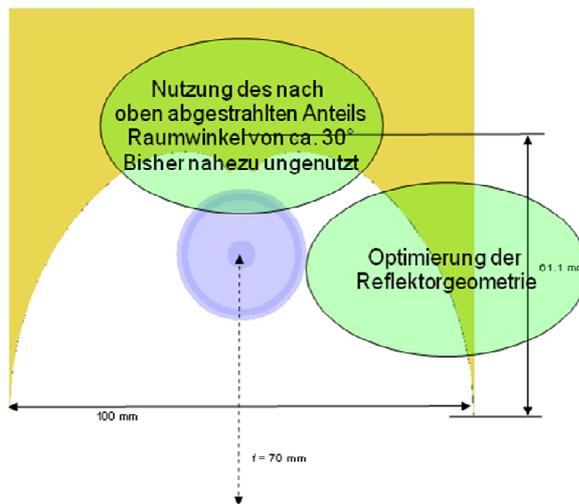


Abbildung 10: *Raytracing-gestützte Optimierung der Reflektorgeometrie*

In der folgenden Abbildung 11 wird die im Projektverlauf durch die einzelnen Entwicklungsschritte erzielte Wirkung auf die Effizienz des Strahler-/Reflektorsystems dargestellt.

Spezifische Lampenleistung [W/cm]

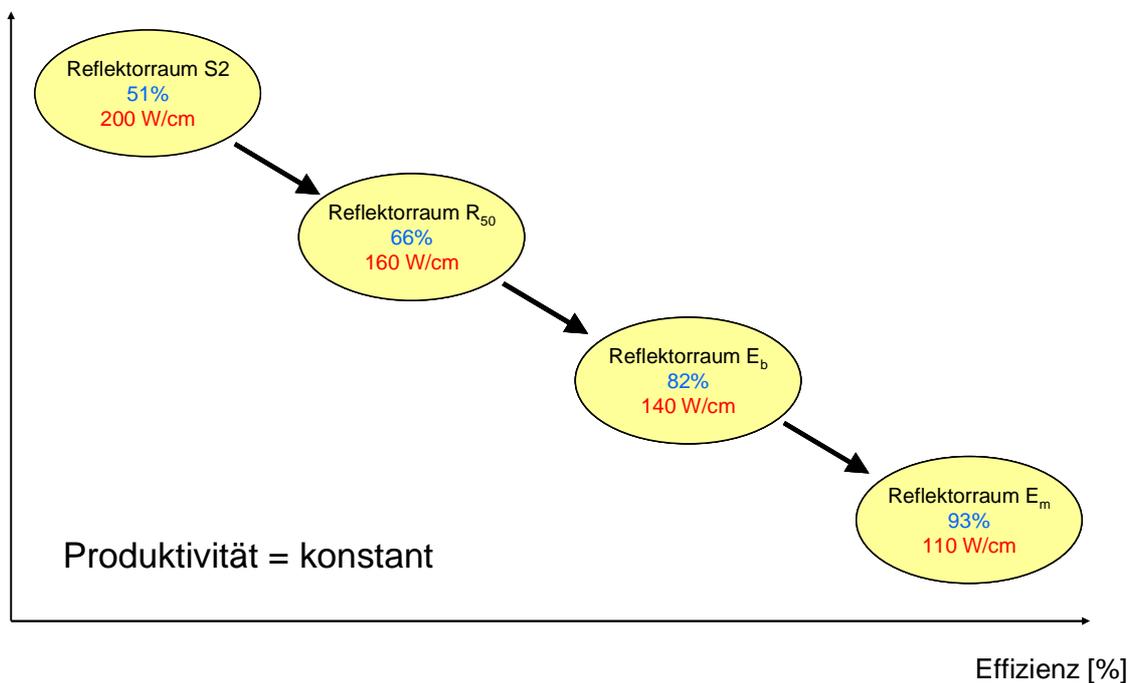
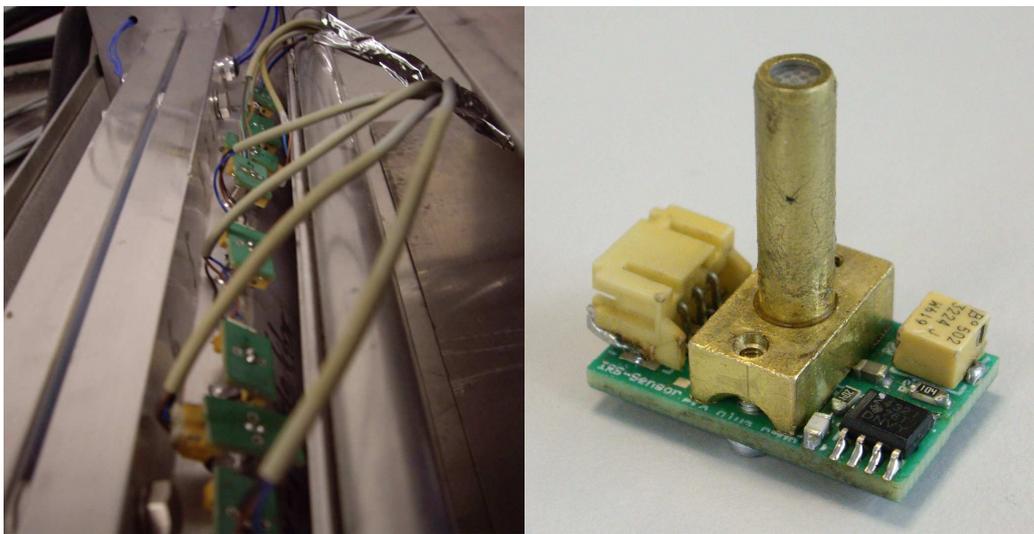


Abbildung 11: *Evolution der Effizienzsteigerung für das Strahler-/Reflektorsystem*

Einen weiteren wesentlichen Beitrag zur Erreichung des Projektziels bezüglich der angestrebten Effizienzsteigerung leistet das ebenfalls im FuE-Projekt von IST METZ entwickelte neue, rein luftbasierte Kühlkonzept für UV-Aggregate. Durch die im FuE-Projekt realisierte

Optimierung der Strömungs- bzw. Druckverluste im internen Kühlkreislauf für den Lampenraum, wie auch im äußeren Gehäuse bzw. Bauraum-Kühlkreislauf, wurden im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik deutliche Energieeinsparungen erzielt. Weiter wurde die bis dahin für den Einsatz von Luftkühlungssystemen vorhandene Limitierung auf UV-Aggregate mit Strahlungsleistungen bis max. 160 W/cm deutlich, d. h. auf 200 W/cm angehoben.

Als ein weiteres Ergebnis wurde in Zusammenarbeit mit dem Auftragnehmer eta-plus ein neues, in den Reflektor integrierbares sowie erstmals Langzeit-standstabiles und drifffreies UV-Sensorsystem für die Echtzeit-Inline-Messung der UV-Strahlung im laufenden Härtingsprozess entwickelt, realisiert und verifiziert. In der folgenden Abbildung 12 wird ein Prototyp für das im FuE-Projekt entwickelte Echtzeit Inline-UV-Sensorsystem gezeigt.



*Abbildung 12: UV-Sensorsystem für die Echtzeit Inline-Messung von UV-Strahlung*

Parallel zu dem in diesem Abschlussbericht dargestellten Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat wurde ein elektronisches Vorschaltgerät mit deutlich gesteigerter Effizienz für eine Leistung bis 32 kW entwickelt und aufgebaut. Durch Kombination des neuen elektronischen Vorschaltgerätes mit dem im FuE-Projekt realisierten Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat konnten weitere Energieeinsparungen im Bereich von 10 % – 15 % erzielt werden.

Aktuell existiert weltweit kein mit dem neu entwickelten Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregatsystem vergleichbares UV-Aggregat, das auch nur annähernd die im FuE-Projekt realisierte Kombination von Effizienz und Leistung zur Verfügung stellt.

Abweichend von der ursprünglichen Planung führten die Arbeiten zur Entwicklung von Hochleistungs-UV-Dioden bzw. Diodenarrays für die Härtung von UV-Lack- und Farbsystemen nicht zu dem angestrebten Ziel. Zum Einen konnte mit dem im FuE-Projekt entwickelten Diodenarray nicht die von Industrieanwendungen geforderte Leistungsdichte realisiert werden. Weiterhin erwiesen sich die relativ hohen Investitionskosten als ein Hemmnis für den Einsatz der UV-Dioden.

Nachfolgend erfolgt eine ökonomische und ökologische Bilanzierung der im FuE-Projekt erzielten Ergebnisse. Ziel des von IST METZ durchgeführten FuE Projektes war die Halbierung des elektrischen Energiebedarfs von UV-Aggregaten bei gleichbleibender Produktqualität. Realisiert werden sollte dieses Ziel durch die Anpassung des emittierten UV-Spektrums und die Optimierung von Reflektorgeometrie bzw. Reflektorbeschichtung, der Steuerung sowie durch die Reduzierung des Abstands zwischen UV-Strahler und Objekt. Nachfolgend wird der Beitrag der einzelnen Optimierungsmaßnahmen auf die Reduzierung des Energiebedarfs bilanziert:

<b>Maßnahme</b>	<b>Ausgangssituation zu Projektstart</b>	<b>Projektergebnis</b>	<b>Faktor</b>
Reduzierung der spez. Lampenleistung bei gleichbleibendem Trocknungsergebnis	160 W/cm	200 W/cm	1,25
Steigerung der Strahler-Effizienz	65 %	93 %	1,43
Effizienzsteigerung durch Einsatz der parallel zum FuE-Projekt entwickelten Hochleistungs-EVG	85 %	95 %	1,12
<b>Gesamtfaktor</b>			<b>1,80</b>

Als wesentliches Ergebnis des FuE-Projektes wurde eine deutliche Reduzierung des Energieverbrauchs für das Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat um Faktor 1,8 (dies entspricht 40 %) bei gleichbleibendem Produkt- bzw. Trocknungsergebnis erreicht. Zusätzlich ergeben sich bedeutende ökologische und Kostenvorteile durch Steigerung der UV-Lampen Standzeit um bis zu Faktor 10, (d. h. von mehreren 100 h auf mehrere 1.000 h)

Von IST Metz jährlich weltweit Anlagen mit einer Gesamtleistung von 3,6 MW installiert. Daraus errechnet sich für einen durchschnittlichen 2-Schicht Betrieb ein Verbrauch von 15.000 MWh. Bei einer Reduzierung des Energiebedarfs um 40 % können somit Einsparungen von bis zu 6.000 MWh pro Jahr bei identischem Arbeitsergebnis mit dem neu von IST METZ entwickelten Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat erzielt werden. Weitere Einsparungen sind durch die Nachrüstung von bereits existierenden Anlagen sowie durch die von IST METZ in den zurückliegenden Jahren realisierte Steigerungsrate von 10 % pro Jahr realisierbar. Da die in Deutschland verbrauchte Elektroenergie vorwiegend aus Kohlekraftwerken stammt, ist die Reduzierung des Energieverbrauchs für energieintensive industrielle Anwendungen der erfolgversprechendste Weg zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Weiter wird durch Senkung der Energie- und damit der Betriebskosten die Verdrängung von gesundheits- und umweltschädigenden, lösemittelhaltigen Lackieranlagen zugunsten von umweltfreundlichen UV-Härteanlagen beschleunigt.

Aufbauend auf dem erfolgreich abgeschlossenen FuE-Projekt sind folgende Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse von IST METZ geplant.

Als Ergebnis des FuE-Projektes steht ein Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat zur Verfügung, das im ersten Schritt voraussichtlich 2009 für Strahler-Baulängen von 500 bis 2000 mm unter dem Produktnamen MBS-5 HP in den internationalen Markt eingeführt werden soll.

Ein Jahr nach dem erfolgreichen Abschluss des FuE-Projektes, d.h. 2009, ist die Präsentation des auf den Ergebnissen des FuE-Projektes basierenden Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregates MBS-5 HP auf internationalen Fachmessen geplant. Weiterhin wird das neue MBS-5 HP Aggregatsystem auf der von IST METZ veranstalteten, international besuchten Hausmesse "UV-Days 2009" vorgestellt.

Als vertriebsunterstützende Maßnahme sind weiterhin eine Internetpräsentation auf der IST METZ Homepage, sowie Fachaufsätze in der 4 x jährlich erscheinenden hauseigenen Zeitschrift "SPECIALIST" vorgesehen. Zusätzlich zu den dargestellten Maßnahmen sind Fachvorträge zum Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat auf Konferenzen, wie z. B. den RadTech und FOGRA Konferenzen geplant.

## Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das ursprünglich im Antrag angestrebte Ziel, die Halbierung des Energieeinsatzes für die Härtung von UV-vernetzenden Farben und Lacken, mit geringen Abstrichen erreicht wurde. Bereits unmittelbar nach Projektabschluss konnte ein Prototyp für das Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat präsentiert werden, der mit konventionellen UV-Aggregaten vergleichbare Härtungsergebnisse bei einem um 40 % reduzierten Energieeinsatz zur Verfügung stellt. Nach Abschluss des FuE-Projektes ist die Weiterführung der Entwicklungsarbeiten im Hause IST METZ geplant, die eine weitere deutliche Senkung des Energiebedarfs erwarten lassen.

Durch die nach Projektabschluss vorgesehene, kontinuierliche Weiterentwicklung des Prototypen zu einem marktreifen Produkt ist eine zügige Überführung der im FuE-Projekt entwickelten, energie- und materialschonenden UV-Härtungstechnologie in die industrielle Praxis möglich. Die Markteinführung des Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregates unter dem Produktnamen MBS-5 HP soll für kleine Lampenlängen  $\leq 400$  mm bereits im Jahr 2009 erfolgen. In den folgenden Jahren ist eine Ausweitung der Produktpalette für das MBS-5 HP UV-Aggregatsystem auf Strahlerlängen bis 2.000 mm geplant.

Im Gegensatz zu den dargestellten, Strahler-basierten UV-Aggregaten führten die Entwicklungsarbeiten für das UV-Dioden-basierte Härtungssystem nicht zu dem gewünschten Ergebnis. Sobald höhere Leistungsdichten sowie günstigere Einkaufspreise für Hochleistungs-UV-Dioden auf dem Markt verfügbar sind, kann dieser Entwicklungsansatz noch einmal überprüft werden.

Auch nach dem erfolgreichen Abschluss des FuE-Projektes werden die Entwicklungsarbeiten zum Niedrigenergie-Hochleistungs-UV-Aggregat mit dem Ziel, weitere Effizienzsteigerungen durch die Optimierung von Komponenten und Baugruppen wie Reflektor, Kühlung, Steuerung/Regelung, usw., zu realisieren, bei IST METZ weitergeführt.

## Literaturverzeichnis

- [1] Neumann, W.; Görlich, W.: "Funktionelle Abhängigkeit der Vernetzung von UV-Lacken unter dem Einfluss der Beschichtungsparameter Auftragsmenge, Maschinengeschwindigkeit, Strahlerleistung und Inertisierung", 25. Münchener Klebstoff- und Veredelungs-Symposium 2000, chemisch und strahlenchemisch härtende Systeme, Tagungsband, S. 89-96
- [2] Neumann, W.: "Abhängigkeit der Vernetzung von UV-Lacken", Coating 2001, Nr. 2., S. 58-62
- [3] Bolte, G.: "Sauerstoff-Reduktion hilft die UV-Härtung zu optimieren: UV-Technologie im Druckprozess (Teil 2)", Deutscher Drucker, Jg. 37 (2001), Nr. 3, S. g16
- [4] Meichsner, G.: "Information aus der Tiefe – Untersuchung der Durchhärtung UV-gehärteter Lacke", Farbe Lack, Jg. 110 (2004), Nr. 6, S. 64-73
- [5] Sedderz, A.: "Untersuchung zur Durchhärtung pigmentierter UV-Lacke", Diplomarbeit, Fachhochschule Esslingen 2003, S. 1-68
- [6] Hocken, J.; Abramczyk, R.: "Zinksulfid als Weißpigment in UV-härtenden Lacken", Coating 2000, Nr. 6, S. 199-205
- [7] Kuen, T.: "Matt/Glanz-Effekte bei UV-Lackierungen – Sind diese Fehler vorhersehbar und vermeidbar?", FOGRA-Symposium "Fortschritt durch Forschung: Fehler vermeiden, Kosten sparen", 27. April 2000, München, Tagungsband S. 15-19