

IST METZ GmbH
Lauterstrasse 14 - 18
72622 Nürtingen

**"Umweltfreundliches Verfahren für die effiziente
Beschichtung von 3D-Objekten mit lösungsmittelfreien
UV-härtenden Lacken unter O₂-reduzierten Bedingungen"
(3D-Inert)**

Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem Az: 26153 - 21/2 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

von
Dr. Oliver Treichel

Nürtingen im Juni 2011

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS VON BILDERN, ZEICHNUNGEN, GRAFIKEN UND TABELLEN.....	2
ZUSAMMENFASSUNG	3
EINLEITUNG	4
HAUPTTEIL.....	8
FAZIT	22
LITERATURVERZEICHNIS.....	23

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1:	<i>Würfelförmiges 3D-Testobjekt (Alu 100-150mm Kubus) und Q-Panel</i>	8
Abbildung 2:	<i>Ray-Tracing Simulation für ein vereinfachtes Stoßdämpfermodell</i>	9
Abbildung 3:	<i>monolithisch aufgebauter Reflektor mit Ein- und Auslauftunnel</i>	10
Abbildung 4:	<i>Blick in den Ein- und Auslauftunnel sowie auf den monolithischen Reflektor</i>	10
Abbildung 5:	<i>3D-Testobjekt 18" Kfz-Felge vor der Einschleusung</i>	13
Abbildung 6:	<i>Prinzipieller Ablauf des UV-Vernetzungsprozesses</i>	14
Abbildung 7:	<i>Mit pigmentiertem UV-Lack beschichteter Stoßfänger</i>	16
Abbildung 8:	<i>erfolgreich mit UV-Lack beschichtetes Pumpengehäuse</i>	16
Abbildung 9:	<i>erfolgreich mit UV-Klarlacken und pigmentierten UV-Lacken beschichtete Kunststoffkörper sowie für die Beschichtung von Kunststoffkörpern verwendeter Reflektoraufba</i>	17
Abbildung 10:	<i>Ray-Tracing Simulationen für dynamisch mit einer Rotationsgeschwindigkeit von 5 U/min bzw. 15 U/min beschichtete Kfz-Felgen</i>	17
Abbildung 11:	<i>"3D-Inert"- Prozesskammer für die UV-Vernetzung von UV-Lacken auf großen 3D-Objekten unter statisch inerten Umgebungsbedingungen</i>	18

Zusammenfassung

Umweltrelevantes Ziel des von der IST METZ GmbH und dem Kooperationspartner LANKWITZER Lackfabrik GmbH & Co. KG durchgeführten FuE Projektes war die Entwicklung eines neuen umweltfreundlichen Verfahrens, das erstmals die Beschichtung von geometrisch komplexen 3-dimensionalen Objekten mit Kantenlängen von bis zu 500 mm mit umweltschonenden, lösemittelfreien UV-härtenden Lacksystemen ermöglicht. Durch die Reduzierung des O₂-Gehaltes im Vernetzungsbereich sollte der für die Lackhärtung erforderliche UV-Energieeintrag bzw. der Photoinitiatoranteil drastisch reduziert, bzw. alternativ der Abstand zwischen UV-Strahler und zu vernetzender Oberfläche entsprechend vergrößert werden. Konkret wurde bei Verringerung des Rest O₂-Gehaltes auf $\leq 1\%$ eine Reduzierung des Photoinitiatoranteils um 80% bei gleich bleibender, bzw. zum Teil sogar steigender Qualität der Lack- und Prozesseigenschaften (z.B. geringe Vergilbungsneigung, höhere Prozess-Verarbeitungsgeschwindigkeit und Reduzierung der UV-Strahlerzahl bzw. der installierten UV-Strahlungsleistung) angestrebt. Als weiteres Ziel sollte durch den verringerten Photoinitiatoranteil die Eindringtiefe des UV-Lichtes erhöht, und dadurch eine bessere Vernetzung in der Tiefe sowie eine stärkere Haftung der Beschichtung am Untergrund realisiert werden. Als weiteres umweltrelevantes Ziel sollten die für die Trocknung von lösemittelhaltigen Lacken erforderlichen Trocknungsöfen und Abkühlzonen bei der Beschichtung von komplex geformten 3-dimensionalen Objekten mit Kantenlängen bis 500 mm durch die geplante UV-Beschichtung eliminiert und damit eine Reduzierung des Energieverbrauchs um 50 % erzielt werden. Die Ergebnisse zur UV-Vernetzung von Lacken sollen beispielhaft an aus Metall- sowie Kunststoff-Werkstoffen hergestellten 3D-Objekten unter O₂-reduzierten Bedingungen sowie unterschiedlichen Rest O₂-Konzentrationen mit nicht pigmentierten (Klarlack) und pigmentierten Lacken (Schwarz- und Weißlacke) verifiziert werden.

Im FuE-Projekt wurden parallel zwei Lösungsansätze, zum Einen ein kontinuierlicher, anlagen- und verfahrenstechnischer- (IST) sowie ein speziell an die Anlagentechnik angepasster Lack-Formulierungsansatz (LANKWITZER) zur Realisierung des umweltschonenden Verfahrens für die UV-Härtung von 3D-Objekten unter O₂-reduzierten Umgebungsbedingungen entwickelt und untersucht. Im zweiten Schritt sollte die Eignung eines neuen gepulsten Inert UV-Verfahrens zur Reduzierung des Energie- und Ressourcenaufwandes sowie zur Effizienzsteigerung beim Beschichtungs- wie auch beim UV-Härtungsprozess verifiziert werden.

Auf Basis der nach erfolgreichem Projektabschluss zur Verfügung stehenden Ergebnisse sollte ein UV-Aggregat für die effiziente Beschichtung von komplexen 3-dimensionalen Objekten mit Kantenlängen bis zu 500 mm mit lösungsmittelfreien UV-härtenden Lacken unter O₂-reduzierten Bedingungen aufgebaut und gemeinsam von den Partnern IST METZ und LANKWITZER in den internationalen Markt eingeführt werden.

Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse wurden in einer Entwicklungskooperation von den Firmen IST METZ GmbH und LANKWITZER Lackfabrik GmbH & Co. KG erarbeitet.

Das in diesem Abschlussbericht präsentierte FuE-Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) im Rahmen eines Förderprojektes (Aktenzeichen: 26153) unterstützt.

Einleitung

Als **Ausgangssituation** wird aufgrund von Umwelterfordernissen und gesundheitspolitischen Notwendigkeiten eine Reduzierung bzw. Eliminierung der durch flüchtige organische Lösungsmittel (sog. VOC's) erzeugten Emissionen gefordert (siehe z.B. EU-VOC-Verordnung sowie 31.BImSchV). Entsprechend ist die Entwicklung maßgeschneiderter, umweltfreundlicher Beschichtungsverfahren und Lacksysteme ein zentrales Anliegen von Anlagenherstellern und Lackproduzenten. Zusätzlich wird eine spürbare Reduzierung des Energieverbrauchs für die Aushärtung von Farb- und Lackbeschichtungen, die Steigerung von Fertigungseffizienz und Durchsatzgeschwindigkeit, sowie die Schonung von Ressourcen und ein weitgehendes Materialrecycling angestrebt. Eine Technologie, die den angestrebten Zielen bereits weit entgegen kommt, bzw. sie in einigen Bereichen bereits erfüllt, ist die UV-basierte Härtung von Lack- und Farbbeschichtungen. Die UV-Härtungstechnologie zeichnet sich vor allem durch folgende Vorteile aus:

- Einsatz von lösemittelfreien und damit emissionsfreien UV-Lacksystemen,
- niedriger Energieverbrauch, da die Werkstücke nicht aufgeheizt und anschließend abgekühlt werden müssen sowie die dadurch bedingte Minimierung der CO₂-Emissionen,
- geringer Materialverbrauch durch Reduzierung der Lackschichtdicke >50% (40-60 µm)
- 100% Recyclingfähigkeit durch Wiederverwendbarkeit des Overspray-Materials,
- schnelle Aushärtung in 0,5–20 sec, danach kann das Produkt weiter verarbeitet werden,
- kein zusätzliches Aufheizen des zu lackierenden Werkstücks durch die UV-Härtung. Dies spart Zeit und Energie; andererseits können dadurch auch temperatursensible Substrate, wie z. B. Folien, Kunststoffe, usw., problemlos beschichtet werden.

Für die konvektive thermische Härtung von Lacken ist ein Energieaufwand von 3,0 kWh/m² erforderlich. Bei Anwendung der IR-Trocknung beträgt der Energieaufwand immerhin noch 1,5 kWh/m². Dagegen kann durch Einsatz der aktuell verfügbaren UV-Härtungstechnologie der Energieaufwand im Vergleich zur konvektiven Trocknung um Faktor 7, bzw. zur IR-Trocknung um Faktor 3 auf 0,5 kWh/m² reduziert werden.

Im grafischen Gewerbe sowie in der Metall- und Kunststoffindustrie werden bereits in großem Umfang UV-vernetzende Farben und Lacke für das Bedrucken bzw. die Beschichtung von 2D-Objekten eingesetzt. So werden im Rollendruck in mehr als 75%, im Bogen-Offsetdruck in mehr als 60% der Anwendungen umweltschonende UV-vernetzende Farb- bzw. Lacksysteme verwendet. Dagegen beträgt der Anteil von UV-Lacken bei der Beschichtung von 3-dimensionalen Bauteilen zu Projektstart deutlich < 10%. Aktuell werden vorzugsweise 3D-Bauteile mit kleinen Abmessungen (< 170 mm Kantenlänge) und einfachen Geometrien unter Einsatz von konventionellen UV-Aggregaten mit UV-Lacken beschichtet. Um mit den zu Projektstart im Jahr 2008 verfügbaren UV-Anlagen zufriedenstellende Beschichtungsergebnisse erzielen zu können, müssen zurzeit vor allem folgende Kriterien erfüllt sein:

- Der Abstand zwischen den zu vernetzenden Flächen des 3D-Objektes und dem UV-Strahler muss ≤ 200 mm betragen,
- unabhängig von Ort und Neigungswinkel der zu vernetzenden Oberfläche muss ein konstanter Abstand zwischen UV-Strahler und 3D-Objektoberfläche, bzw. eine konstante Strahldichte gewährleistet sein.

Die wesentlichen Probleme bei der Beschichtung von 3D-Bauteilen mit UV-Lacken entstehen dadurch, dass abhängig vom Einfallswinkel der UV-Strahlung auf die Oberfläche des 3D-Bauteils, sowie durch Abschattung, usw., stark unterschiedliche Lack-Trocknungszeiten erforderlich sind. So ist die hochviskose UV-Farb- bzw. Lackschicht in der senkrecht zur Strahlrichtung ausgerichteten Ebene (maximale Strahlungsdichte) oft nach wenigen Sekunden vollständig vernetzt, während der Vernetzungsprozess auf den parallel zur Strahlrichtung ausgerichteten Flächen (geringe Strahlungsdichte) auch nach mehreren Minuten noch nicht abgeschlossen ist und aufgrund der langen Trocknungszeit Fehlstellen, wie z.B. Schlieren, Tropfenbildung, usw., entstehen. Nur wenn unabhängig von Neigungswinkel und Abstand der Oberflächen des 3D-Objektes ein gleichmäßiger Abstand von ≤ 200 mm zum UV-Strahler sichergestellt ist, wird eine fehler- bzw. klebfreie Oberfläche mit ausreichender Härte, Medienbeständigkeit sowie speziell bei Metalluntergründen mit ausreichender Korrosionsschutzbeständigkeit erreicht. Da diese Voraussetzungen nur in Ausnahmefällen erfüllt sind (i. d. Regel bei Beschichtung von ebenen, parallel zum UV-Strahler ausgerichteten Flächen) werden 3D-Bauteile zurzeit zu > 90 % konventionell mit umwelt- und gesundheitsschädigenden lösemittelhaltigen sowie energieaufwendig zu verarbeitenden, thermisch härtenden Lacken beschichtet. So werden z.B. aktuell im Automotivbereich lösemittelhaltige, thermisch härtende Lacke für die Beschichtung von blanken-, grundierten- oder vorlackierten 3D-Stahlteilen, wie Stoßfänger, Lenkungsteile, Achsen oder Alu-Radfelgen, usw., eingesetzt.

Ein weiteres, bei der UV-Vernetzung in Normalatmosphäre auftretendes Handicap entsteht durch die O_2 -Inhibierung, die die Umsetzung von UV-Fotoinitiatoren in der Lackschicht massiv beeinträchtigt. Die UV-Vernetzung beruht auf einer O_2 -empfindlichen Radikalketten-Polymerisation. Das O_2 -Biradikal unterbricht die Polymerkettenbildung, was zu schwach vernetzten bzw. klebrigen Lackoberflächen führt. Bei der industriellen Anwendung der UV-Härtung wird dieser Effekt zur Zeit durch Überdosierung der UV-Strahlungsdichte und Fotoinitiatoren, sowie durch den Einbau von Amininen in das Farb- bzw. Lackmaterial weitgehend kompensiert. Demgegenüber haben Untersuchungen gezeigt, dass bei Reduzierung des O_2 -Gehaltes auf < 1 % (10.000 ppm) der Fotoinitiatoreinsatz um bis zu 80 % bei gleichzeitig verbesserter Beschichtungsqualität reduziert werden kann. Weiter ist eine deutliche Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit sowie Verringerung der Zahl der erforderlichen UV-Strahler möglich. Zusätzlich wird durch Minimierung des Initiatoranteils eine höhere Eindringtiefe der UV-Strahlung und dadurch bedingt eine bessere Vernetzung der Farb- bzw. Lackschicht in der Tiefe sowie eine bessere Haftung an dem zu beschichtenden Substrat erreicht. In der industriellen Praxis werden die dargestellten Vorteile bereits vor Projektstart bei der Beschichtung von 2D-Objekten mit UV-härtenden Farben und Lacken genutzt. Dabei erfolgt die O_2 -Reduktion üblicherweise durch Spülen der zu vernetzenden Farb- bzw. Lackschicht mit den Gasen N_2 oder CO_2 . Zu Projektstart wurden bereits ca. 80 % der industriellen Endlosdruck-Anwendungen von Rolle zu Rolle effizient und energieschonend in einer, vor-

zugsweise durch N₂-Inertisierung erzeugten, O₂-reduzierten Umgebung durchgeführt. Da CO₂ ca. 1,6 mal schwerer als Luft bzw. N₂ ist, sind bei der CO₂-Inertisierung entsprechende technische Vorkehrungen zu schaffen und Sicherheitsvorschriften zu beachten. Bei beiden für die O₂-Reduktion verwendeten Gasen treten keine Absorptionen in dem für die Vernetzung relevanten UV-Strahlungsbereich auf.

Im Gegensatz zum Rollendruck (2D-Objekt) gestaltet sich die Beschichtung von 3D-Objekten mit UV-vernetzenden Lacken in inerter Umgebung wesentlich schwieriger. Als gravierendes Problem entstehen bei der kontinuierlichen UV-Härtung von 3D-Objekten sowohl beim Einschleusen wie auch beim Ausschleusen aus der inerten Umgebung erhebliche Leckageverluste, die kontinuierlich überwacht und ausgeglichen werden müssen. Weiter wird z.B. durch Hohlräume und den Sog der 3D-Objekte O₂ in die Inertisierungskammer eingeschleust, das sich dort anreichert und mit der Zeit den Wirkungsgrad der Inertisierung entsprechend reduziert. Weitere Probleme entstehen durch Grenzschichteffekte, die ein Anhaften der O₂-haltigen Umgebungsluft auf der Objekt-Oberfläche bewirken und so eine kontrollierte Inertisierung der zu vernetzenden Oberfläche im Fertigungsprozess behindern.

Als **Zielsetzung** sollte im FuE-Projekt ein neuer erfolgversprechender Ansatz, der im Wesentlichen auf einer Senkung des Schwellwerts für die UV-Vernetzung durch Reduzierung des O₂-Anteils im Vernetzungsbereich basiert, untersucht und der Funktionsnachweis erbracht werden. Entsprechend bestand das zentrale Ziel des von den Partnern IST METZ und LANKWITZER durchgeführten FuE-Projektes in der Entwicklung eines Verfahrens sowie dem Aufbau einer Prototypenanlage, mit der erstmals die effiziente und energiesparende Beschichtung von großen 3D-Bauteilen (Kantenlängen ≤ 500 mm) mit UV-härtenden Lacken bzw. Farben unter O₂-reduzierten Umgebungsbedingungen im diskontinuierlichen bzw. kontinuierlichen Betrieb nachgewiesen werden kann.

Konkret sollten sowohl ein "statisches" wie auch ein neues "gepulstes" Verfahren für die UV-Härtung von großen 3D-Objekten unter inerten Umgebungsbedingungen im FuE-Projekt entwickelt und in Versuchsreihen bezüglich ihrer technischen Realisierbarkeit, ökologischen Vorteile, wie z. B. Energieeffizienz und Ressourcenschonung, sowie die für die spätere Übertragung in industrielle Anwendungen wichtigen ökonomischen Vorteile untersucht werden. In der folgenden Tabelle werden die wesentlichen, im FuE-Projekt angestrebten Zielstellungen gegenüber dem bei Projektstart für die industrielle UV-Härtung von 3D-Objekten verfügbaren Stand der Technik zusammengefasst dargestellt:

Parameter	Stand der Technik	"3D-Inert"
Umgebungsatmosphäre	UV-Härtung in Luft	UV-Härtung in inerter Umgebung
3D-Objektgröße	≤ 250 mm Kantenlänge	≤ 500 mm
Abstand UV-Strahler/Objektebene	≤ 200 mm	≥ 500 mm
Fotoinitiatoranteil		Reduzierung um 80 %
Energieeinsatz		Reduzierung um bis zu 50 %

Berücksichtigt man, dass die elektrische Energie in Deutschland vorwiegend aus Kohlekraftwerken stammt, so ist die Reduzierung des Energieverbrauchs für energieintensive Anwendungen der erfolgversprechendste Weg zur Reduzierung des CO₂-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 werden somit die folgenden ökonomischen- und Umweltvorteile erzielt:

- Erhebliche Energieeinsparung und damit CO₂-Minderung,
- Eliminierung von gesundheits- und umweltschädigenden Lösemittel- (VOC)-Emissionen,
- Materialeinsparungen durch geringere Lackschichtdicken,
- Reduzierung des Fotoinitiatoranteils,
- Effiziente Nutzung von Ressourcen durch 100%-tige Recyclingfähigkeit der Flüssiglacke,
- Präzisere, schnellere und effizientere Produktion durch schnelle Aushärtung und die Möglichkeit zur Inline-Integration in vernetzte Fertigungsprozesse.

Zur Lösung der **Aufgabenstellung** war im Projekt zum Einen die Entwicklung eines kontinuierlichen anlagen- und verfahrenstechnischen- (IST METZ), sowie eines speziell daran angepassten Lack-Formulierungsansatzes (LANKWITZER) geplant. In einem ersten Schritt sollten dazu Untersuchungen zur Klärung der grundsätzlichen Anforderungen an die UV-Vernetzung für diskontinuierliche bzw. kontinuierliche Härtungsprozesse unter O₂-reduzierten Bedingungen durchgeführt werden. Darauf aufbauend war die Entwicklung und Realisierung eines UV-Strahler- und Inertgas-basierten Anlagenkonzeptes, das erstmals eine Vergrößerung des Abstandes zwischen zu härtender 3D-Objektfläche und UV-Strahler von < 200 mm auf ≥ 500 mm ermöglicht, vorgesehen. Durch die Optimierung von Strahlerdotierung, Lackchemie und Anlagenparameter, usw. sowie ggf. Vorbehandlung der zu beschichtenden Oberflächen sollten die Haft- und Härtungsbedingungen für die UV-Vernetzung auf 3D-Objekten zum Teil erstmals ermöglicht bzw. optimiert werden. Eine weitere Aufgabe bestand in der rezeptiven Entwicklung und Formulierung geeigneter UV-Rohstoffe speziell für die Inert-UV-Härtung von 3D-Objekten. Hierzu sollten Rohstoffe, wie Bindemittel, Oligomere, Monomere, Additive usw. für Klarlacke wie für pigmentierte Lacke in Abhängigkeit von der Anwendung auf unterschiedlichen Substraten, wie z.B. Stähle und industrierelevante Kunststoffe ausgewählt und in Bezug auf ihre spezifischen Anforderungen und Eigenschaften für die Inert-UV-Härtung untersucht werden. Im Anschluss waren Funktionstests zur Verifizierung des ausgewählten Anlagenkonzeptes und UV-Rohstoffe geplant. Neben der klassischen diskontinuierlichen- (z. B. mit N₂ oder CO₂ befüllte Wanne) und kontinuierlichen Erzeugung (kontinuierliche Begasung mit N₂) einer O₂-reduzierten Umgebung sollte im Projekt die Eignung eines neuen Verfahrens für die kombinierte UV-Bestrahlung und gepulste Inertisierung zur energieeffizienten, ressourcenschonenden UV-Härtung von 3D-Objekten untersucht werden. Darauf aufbauend war die Entwicklung und der Aufbau einer Prototypenanlage für die UV-Bestrahlung und kombinierte kontinuierliche bzw. gepulste Inertisierung vorgesehen. In Applikationsversuchen sollte der Funktionsnachweis an realen 3D-Aufgabenstellungen, wie der Beschichtung von Aluminium-Radfelgen mit 500 mm Durchmesser oder KFZ-Stoßfängern erbracht und die Anlage auf Grundlage der Ergebnisse optimiert werden.

Hauptteil

Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen, im FuE-Projekt 3D-Inert von IST METZ und dem Partner LANKWITZER durchgeführten **Arbeitsschritte**, sowie die erzielten Ergebnisse dargestellt.

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden bei IST METZ umfangreiche UV-Messungen für die Referenzierung und den Abgleich der im 3D-Inert Projekt eingesetzten Messgeräte durchgeführt. Damit sollte eine Referenz für die bei den Partnern im Projektverlauf ermittelten Messwerte geschaffen werden. Weiter wurde ein bei IST METZ vorhandenes UV-Aggregat zum Vergleich von Messergebnissen mit den Simulationsrechnungen vermessen. Parallel dazu wurden beim Partner LANKWITZER umfangreiche Voruntersuchungen zur Bewertung und Auswahl von Rohstoffen und Basismaterialien durchgeführt. Konkret wurden monomere und polymere bzw. oligomere Bindemittel ausgewählt und die Haftigenschaften auf Stahl-, Aluminium-, lackierten, wassertauchgrundierten, KTL- und pulverbeschichteten Oberflächen untersucht. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde eine Vorauswahl für die im weiteren Projektverlauf eingesetzten Bindemittel getroffen.

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Voruntersuchungen wurde ein Prozessraum zur Erzeugung von statisch inerten Bedingungen aufgebaut und zusammen mit Schnittstellen für die Realisierung der geplanten gepulsten 3D-Inerthärtung in das vorhandene Aggregatssystem integriert. Mit dieser aus konventionellen Komponenten aufgebauten Testanlage wurden umfangreiche Untersuchungen in inerter Umgebung, u.a. zur Bewertung der Produktperformance bei Reduzierung des Fotoiniatoranteils durchgeführt. Für diese Untersuchungen wurde ein 3D-Testobjekt in Form eines Würfels, der an den Seiten mit Blechen bestückt werden kann, ausgewählt und aufgebaut (siehe Abbildung 1).

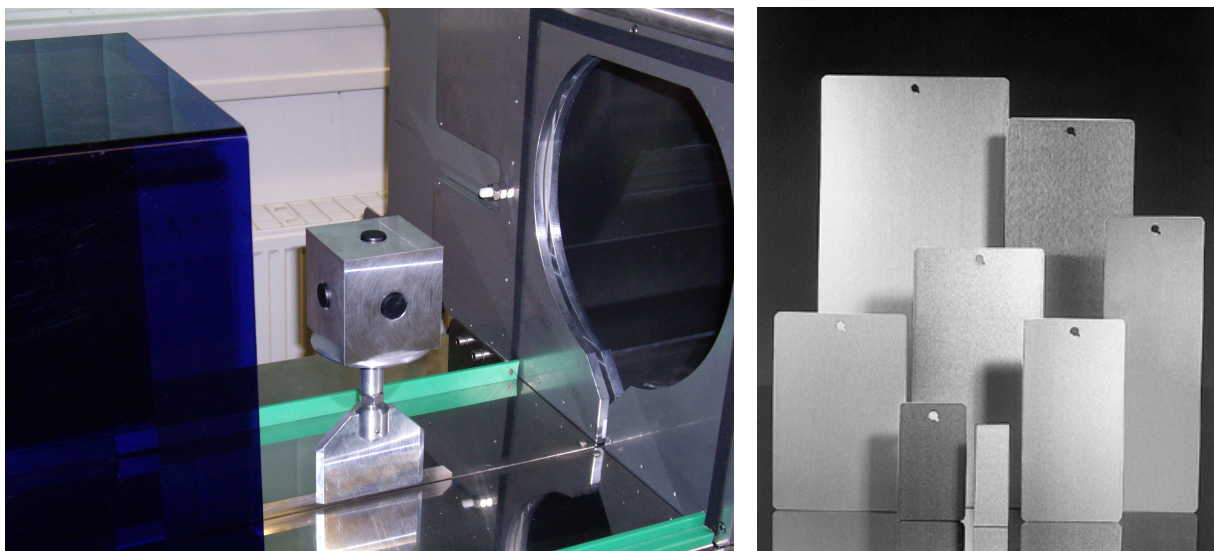


Abbildung 1: Würfelförmiges 3D-Testobjekt (Alu 100-150mm Kubus) und Q-Panel

Ein weiterer Arbeitspunkt bestand in der Modellierung des Prozessraums, sowie in theoretischen Betrachtungen und Untersuchungen zur Auswahl von geeigneten Düsen für den geplanten gepulsten Inert-Härtungsprozess. Konkret wurde die Eignung von unterschiedlich dimensionierten und geometrisch gestalteten Düsen, wie z.B. Rund- und Flachdüsen, bei IST METZ untersucht und eine Düsenform ausgewählt. Ein weiterer Schwerpunkt bestand in Untersuchungen zur Anordnung der Düsen im Prozessraum. Ebenfalls wurden erste Überlegungen zur Skalierung des 3D-Inert UV-Aggregatsystems für größere 3D-Bauteile mit Abmessung bis zu $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$ durchgeführt.

Parallel zur Modellierung des Prozessraums erfolgten in Zusammenarbeit mit dem Partner LANKWITZER umfangreiche Laborversuche zur UV-Härtung von Lacken auf 3-dimensionalen Musterteilen. Dabei wurden unterschiedliche Lackarten sowie Substrate und Proben-Vorbehandlungsverfahren in Bezug auf ihre Eignung für die geplante effiziente Beschichtung von 3D-Objekten mit UV-härtenden Lacken unter O_2 -reduzierten Bedingungen untersucht und die Ergebnisse ausgewertet.

Zur Generierung von computergestützten numerischen 3D-Modellen für die bei IST METZ geplanten Simulationsrechnungen wurden 3D Testobjekte vermessen. Darauf aufbauend folgten erste Simulationsberechnungen an komplexen 3D-Bauteilen, wie 18“ Kfz-Felgen und Stoßdämpfern. Abbildung 2 zeigt beispielhaft das Ergebnis der optischen Simulationsrechnung für das vereinfachte Modell eines Kfz-Stoßdämpfers.

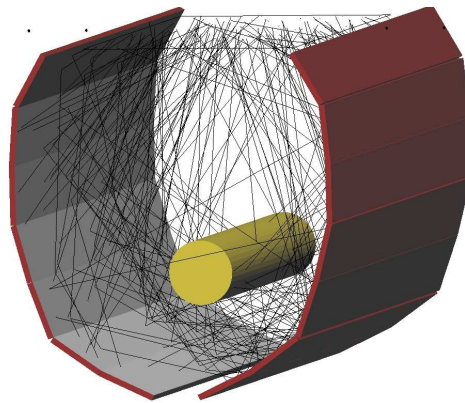


Abbildung 2: Ray-Tracing Simulation für ein vereinfachtes Stoßdämpfermodell

Als wichtiges Ergebnis haben die thermodynamischen Simulationen gezeigt, dass die gepulste Inertisierung der 3D-Objektoberflächen nicht zu dem gewünschten Ergebnis führt. Vor allem für die angestrebten Dimensionen der 3D-Objekte, die auch die minimale Größe des Prozessraumes definieren, wie auch für die N_2 -Flussmenge konnte keine technisch bzw. wirtschaftlich sinnvolle Lösung für die gepulste Inertisierung gefunden werden.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis wurde als Alternative zur gepulsten Inertisierung ein monolithisches, d.h. gasdichtes Reflektorsystem in Form einer Zylinderhalbschale für eine hybride Inertisierung von 3D-Objekten mit Kantenlängen von $\leq 250 \text{ mm}$ entwickelt und aufgebaut. Bei dieser hybriden Variante wird der Inert-Gasstrom aus dem Aggregat auf die zu härtenden 3D-Oberflächen geführt. Weiter werden die zu inertisierenden Oberflächen des

3D-Objektes durch Ausblasen eines "Inertgas-Vorhangs" unmittelbar vor und hinter dem 3D-Objekt gegenüber der Umgebungsatmosphäre abgeschottet. Durch diesen "Inertgas-Vorhang" in Kombination mit dem als Halbzylinder ausgeführten gasdichten Reflektorraum wurde im 3D-Inert Projekt eine Reduzierung des für die UV-Härtung erforderlichen Inertgas-Volumens gegenüber konventionellen Reflektoraufbauten von bis zu 25 % erzielt. Abbildung 3 zeigt den von IST METZ für die hybride Intertisierung entwickelten und realisierten Versuchsaufbau. In der Mitte des Bildes ist deutlich das UV-Aggregat mit dem monolithischen Reflektor, sowie rechts und links davon der Ein- und Auslauftunnel zu erkennen. In den Ein- und Auslauftunnel sind die Düsen für die N₂-Zuführung integriert (blaue Schläuche)

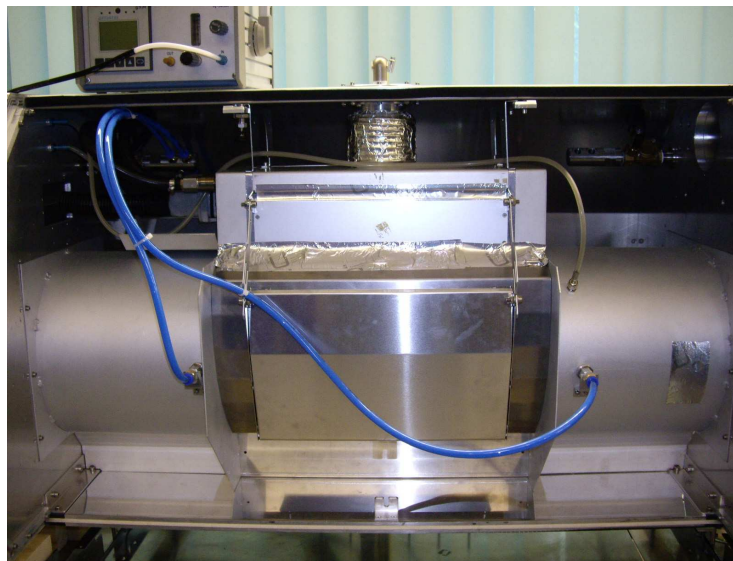


Abbildung 3: monolithisch aufgebauter Reflektor mit Ein- und Auslauftunnel

Abbildung 4 zeigt den Ein- und Auslauftunnel sowie den in der Mitte angeordneten, durch die URS-A Beschichtung rötlich schimmernden monolithischen Reflektor. Im Auslauftunnel ist rechts die Halbkugel der Schlitzdüse für die Erzeugung des N₂-Vorhangs erkennbar.

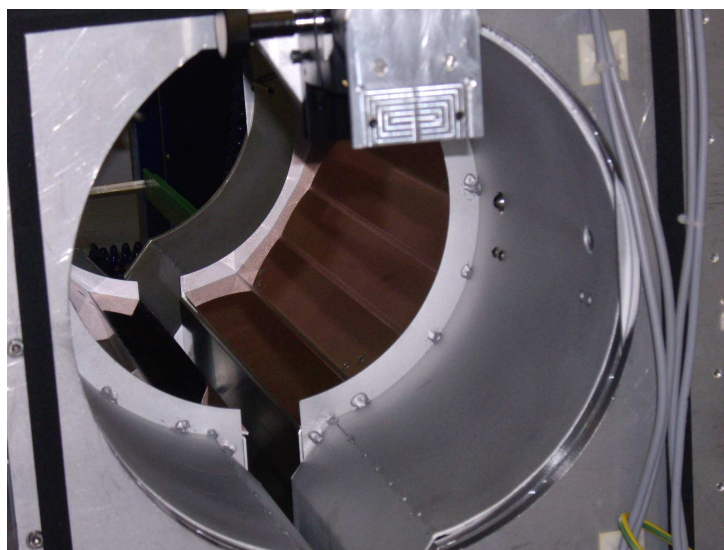


Abbildung 4: Blick in den Ein- und Auslauftunnel sowie auf den monolithischen Reflektor

Parallel zur Entwicklung und dem Aufbau des monolithischen Reflektorsystems wurden beim Partner LANKWITZER Untersuchungen zur Materialbewertung mit verschiedenen Rezepturen für farblose UV-Lacksysteme an praxisnahen 3D-Objekten, konkret auf Stahl-Achsen, Aluminium-Radfelgen sowie auf Stoßdämpfern durchgeführt. Die Auswertung der Versuchsreihen zeigte positive Haftergebnisse auf Stahl- und Aluminium-, sowie auf KTL- und pulverbeschichteten Oberflächen. Aufgrund dieser guten Ergebnisse wurden die Versuche beim Partner LANKWITZER auf pigmentierte UV-Lacksysteme ausgedehnt. Hier zeigte sich, dass ein Teil der in Kombination mit Klarlacksystemen positiv bewerteten Bindemittel bei Verwendung in Schwarz pigmentierten UV-Lacken nicht die gestellten Anforderungen erfüllen. Entsprechend wurden einige der zuvor für Klarlacksysteme positiv bewerteten Bindemittel für den Einsatz in pigmentierten Lacksystemen ausgeschlossen. Im weiteren Projektverlauf wurden Problemstellungen, wie z.B. die UV-Härtung von schwarzen Einschichtlacken an den bei Stoßdämpfern vorhandenen Hinterschneidungen, unter inerten Umgebungsbedingungen auf der bei IST METZ installierten, aus konventionellen Komponenten aufgebauten Versuchsanlage durchgeführt.

Aufbauend auf die Beschichtungsversuche folgten umfangreiche Untersuchungen zur Bewertung von neuen Lacktypen, Substraten und Proben-Vorbehandlungsverfahren in Bezug auf ihre chemische Beständigkeit, sowie die Härtungs- und Haftungseigenschaften. Hierzu wurden UV-Lacke auf Kfz-Achsen aufgetragen und getestet. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass vor allem mit KTL und Pulverlacken auf Polyester/Epoxidbasis gute Haftungswerte $< Gt1$ (Gitterschnitt nach DIN EN ISO 2409) mit den lackierten Oberflächen erzielt wurden. Nur bei einer 1K-Hydrotauchgrundierung auf Hybridbasis variierte die Haftung in den Versuchsreihen stark, so dass keine konstante Qualität erzielt werden konnte.

Weiter wurde die Beständigkeit der UV-Lacke gegenüber chemischen Substanzen geprüft. Die Auswertung der Versuche ergab, dass die chemische Beständigkeit gegenüber Hydrauliköl, Prüfkraftstoff, Konservierungsmittel und Kaltreiniger erfüllt wird. Lediglich bei der Beständigkeit gegenüber Bremsflüssigkeit besteht noch Optimierungsbedarf. Auch die standardisierten Versuche zur Bewertung des Korrosionsschutzes, wie 6-Runden VAD-Wechseltest, Salzsprühtest (240 h), Schwitzwassertest (240 h) und die Multischlagprüfung bestätigten die Erwartungen.

Einen weiteren Schwerpunkt bildeten Untersuchungen zur Aushärtung von UV-Lacken auf Kfz-Felgen in Inertgas-Atmosphäre. Dabei wurden unterschiedliche 1K- und 2K UV-Clear-Coat Formulierungen auf verschiedenen 2K-Hydro-Base-Coats in Inertgas-Atmosphäre gehärtet. In den Versuchsreihen wurden sowohl der O_2 -Gehalt als auch die UV-Dosen (3 J/cm^2 und $4,5 \text{ J/cm}^2$) variiert. Die Analyse der Ergebnisse zeigte, dass eine optimale Durchhärtung und hohe Korrosionsbeständigkeit des Lackes mit einem O_2 -Gehalt von $\leq 2\%$ erreicht wird. Konkret wurden im Projekt die Korrosionsbeständigkeit, CASS-Test (240 h), Kupferchlorid-Essigsäure-Salzsprühnebelprüfung (DIN 50021, ISO 9227CASS), Prüfung mit simulierter Steinschlagbeanspruchung (DIN EN ISO 20567-1) und Schwitzwassertests (DIN EN ISO 6270-2) für die Bewertung der Lackqualität durchgeführt. Weiter zeigten sowohl der 1K- als auch der 2K UV-Clear-Coat eine sehr gute schmutzabweisende Wirkung bei Temperaturen bis $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Diese Versuchsbedingungen entsprechen einem Easy-to-Clean Effekt bei Verschmutzung von Kfz-Felgen mit Bremsstaub.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen folgte ein Applikationstest. Hierbei wurden komplette Aluminium-Räder mit Hydro-Base-Coat und anschließend mit 1K- und 2K UV-Clear-Coat beschichtet, anschließend zerschnitten und den zuvor beschriebenen Korrosions-Beständigkeitstests unterzogen. Abweichend von den Ergebnissen aus den Laboruntersuchungen zeigte die Aluminiumrad-Oberfläche nach dem Schwitzwassertest (240 h) Fleckenbildung.

Als Zwischenergebnis konnte festgestellt werden, dass die mit dem Versuchsaufbau zur hybriden Inertisierung an 3D-Objekten mit Kantenlängen ≤ 250 mm durchgeführten Laboruntersuchungen die Erwartungen weitgehend bestätigt haben. Konkret wurde der N_2 -Verbrauch gegenüber zu Projektstart existierenden konventionellen Inert UV-Härtungen in den Versuchsreihen um bis zu 25 % reduziert.

Aufbauend auf diesem Zwischenergebnis folgte bei IST METZ die Konzeption und Entwicklung der Prototypenanlage, die gegenüber der Laboranlage eine Erweiterung der Objektdimensionen von 250 mm auf 500 mm ermöglichen sollte. Zur Vorbereitung der Konstruktionsarbeiten für die Prototypenanlage wurden die Anforderungen zur UV-Härtung von 3D-Objekten mit Kantenlängen bis 500 mm in Ray-Tracing Simulationen untersucht. Als wichtiges Ergebnis zeigten diese Simulationen, dass eine einfache lineare Skalierung der Anlage für die hybride Inertisierung von 3D-Objekten mit Kantenlängen bis zu 500 mm nicht möglich ist. Insbesondere die Skalierung des mit Hilfe von Düsen realisierten Inertgas-Vorhangs konnte nicht zufriedenstellend gelöst werden. Entsprechend wurden alternative Ansätze und Varianten, wie z.B. die Eignung eines mehrstufigen Inertgas-Vorhangs für die Lösung des Problems untersucht. Auch diese Ansätze wurden aufgrund des erforderlichen großen Inertgas-Volumenstroms sowie der hohen Investitions- und Betriebskosten im FuE-Projekt verworfen.

Ein erfolgversprechender, durch die Simulationsrechnungen bestätigter und entsprechend im Projekt weiter verfolgter Lösungsansatz bestand in der Beflutung des UV-Prozessraums mit einem konstanten, statischen Inertgas-Volumenstrom. Bei diesem Lösungsansatz bestand eine wesentliche Aufgabe in der Miniaturisierung der geometrischen Abmessungen des Prozessraums, ohne dass dadurch die als Ziel angestrebte UV-Härtung von 3D-Objekten mit Kantenlängen bis 500 mm beeinträchtigt wird. Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Simulationsberechnungen wurden die Konstruktionsarbeiten durchgeführt, sowie eine Prototypen-Anlage für die UV-Härtung von 3D-Objekten mit Kantenlängen bis 500 mm unter inerten Umgebungsbedingungen bei IST Metz aufgebaut und in Funktionstests verifiziert.

Parallel zu den Konstruktionsarbeiten wurden beim Partner LANKWITZER umfangreiche Versuchsreihen zum Auftrag von UV-Lacken auf Kfz-Stoßdämpfer mit einer Hochdruckpistole sowie eine ESTA-Pistole durchgeführt:

- Mit der Hochdruckpistole konnte die geforderte Trockenschichtdicke von 30 - 50 μm nicht realisiert werden, da bei jedem Versuch eine Überschichtung entstand die das Durchhärten des UV-Lackes bis zu den untersten Schichten behinderte.
- Durch die elektrostatische Beschichtung mit einer ESTA-Pistole wurden sowohl der Verlauf als auch die Trockenschichtdickenverteilung verbessert. Jedoch war die Verteilung der Lackschicht auf dem Objekt aufgrund von lokalen Über- bzw. Unterschichtungen nicht ausreichend homogen.

Für die Lösung der dargestellten Probleme wurde der Einsatz einer oder mehrerer ESTA-Glocken mit ESTA-Pistolen bzw. mit normalen Hochdruckpistolen favorisiert.

Es folgten Untersuchungen für die Auswahl von geeigneten Monomer- bzw. Oligomermaterialien zur Einstellung eines definierten Glanzgrades und Korrosionsschutzes mit schwarz pigmentierten UV-Lacken, sowie ein Screening von Monomeren und Oligomeren zur Reduzierung bzw. Eliminierung der Vergrauung von Base-Coats für den Farbton Sterlingsilber.

Aufbauend auf den beim Partner LANKWITZER beim Lackauftrag erarbeiteten Ergebnissen wurde ein geeignetes Testobjekt in Form einer kompletten 18" Kfz-Felgen ausgewählt und unter praxisähnlichen Bedingungen mit den im 3D-Inert Projekt vom Partner LANKWITZER entwickelten Lacksystemen beschichtet. Im Anschluss an diverse Detailuntersuchungen wurden die beschichteten 18" Kfz-Felgen in der im 3D-Inert Projekt entwickelten Prozesskammer unter inerten Umgebungsbedingungen UV-ernetzt. Konkret wurden die Versuchsreihen mit zwei verschiedenen UV-Dosen von 3 J/cm^2 und $4,5 \text{ J/cm}^2$, sowie mit einem Rest O_2 -Gehalt von $\leq 2\%$ durchgeführt. Dieser Rest O_2 -Gehalt hat sich als sinnvolle Obergrenze für industrielle UV-Härtungsprozesse bewährt. In Abbildung 5 wird die Prototypenanlage mit einer 18" Aluminium Kfz-Felge vor der Einschleusung in den Prozessraum gezeigt.



Abbildung 5: 3D-Testobjekt 18" Kfz-Felge vor der Einschleusung

Als ein wichtiges Ergebnis wurde in den Laborversuchen bestätigt, dass die für die Vorbereitung und Parameterermittlung im Vorfeld durchgeführten Ray-Tracing Studien eine gute Prognose der realen Bestrahlungsintensität, sowie eine zuverlässige Vorhersage der durch die Rotation des 3D-Objektes verursachten lokalen UV-Dosis und Homogenität über die Freiformfläche ermöglichen. Weiter ist es in den Laborversuchen mithilfe der relativ präzisen Ray-Tracing Simulation erstmals gelungen, ein 3D-Objekt mit einer einzigen, vergleichsweise klein dimensionierten UV-Lampe sehr effizient unter den erschwerten dynamischen Bedingungen zu bestrahlen.

Weitere Schwerpunkte der Laborversuche bestanden in der Untersuchung von unterschiedlichen Peakdosis-Varianten und Inertisierungsgrade. Das ausgewählte Testobjekt zeichnete sich vor allem durch das breite Spektrum der für spätere Praxisanwendungen relevanten Anforderungen, z.B. in Bezug auf die 3D-Geometrie, die Oberflächenbeschaffenheit und Vorbehandlung, sowie die Umweltaanforderungen (z.B. Kratzfestigkeit, Steinschlag, chemische Beständigkeit usw.) aus.

Nach Fertigstellung der UV-Inertgashärtungsanlage wurden die als Testobjekt ausgewählten 18" Aluminium Kfz-Felgen zunächst mit 2K Hydro-Base-Coats, sowie anschließend mit ausgewählten 1K und 2K-UV-Klarlacken beschichtet sowie mit UV-Dosen von 3 J/cm^2 und $4,5 \text{ J/cm}^2$ in der Prototypenanlage unter inerten Umgebungsbedingungen vernetzt. Abbildung 6 zeigt den prinzipiellen Ablauf des UV-Vernetzungsvorganges unter inerten Umgebungsbedingungen für die ausgewählte Kfz-Felge.

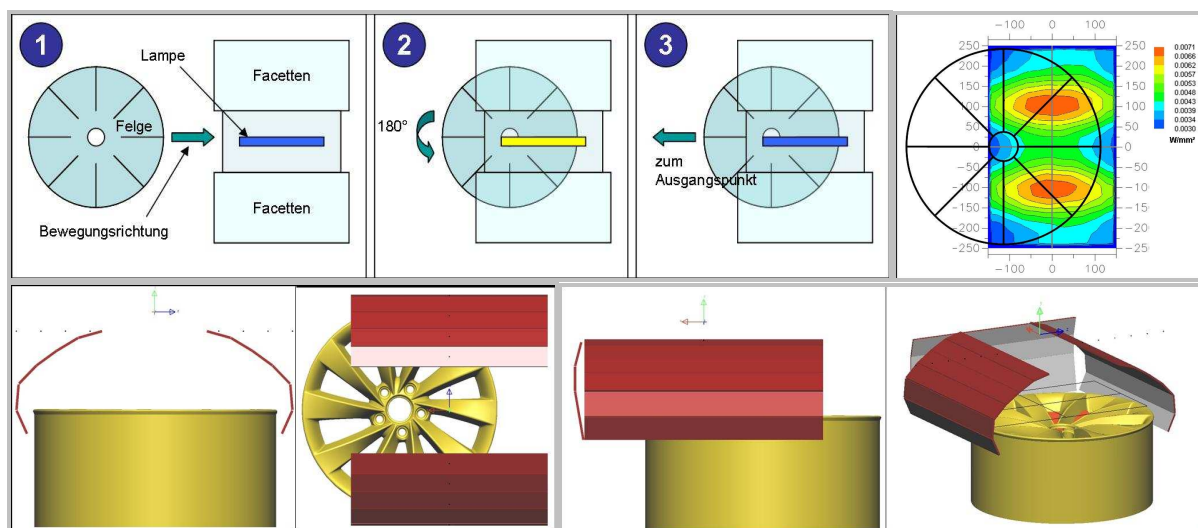


Abbildung 6: Prinzipieller Ablauf des UV-Vernetzungsprozesses

Im nächsten Schritt wurden die UV-lackierten Kfz-Felgen beim Partner LANKWITZER in Osterwieck entsprechend den Anforderungen der Räderindustrie geprüft. Als Ergebnis der kann festgehalten werden, dass der 100 %-tige monocure UV-Klarlack sämtliche Anforderungen in Bezug auf die chemische-, mechanische- und Korrosionsschutzbeständigkeit erfüllt. Konkret wurde die Korrosionsschutzbeständigkeit mit dem 240 h CASS-Test, die Kupferchlorid-Essigsäure-Salzsprühnebelprüfung gemäß DIN 50021, der ISO 9227 CASS Test, die Prüfung mit simulierter Steinschlagbeanspruchung nach DIN EN ISO 20567-1 (Verfahren B), sowie der 240 h Schwitzwassertest nach DIN EN ISO 6270-2 durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte nach dem Schwitzwassertest keine Fleckenbildung. Auch die schmutzabweisende Wirkung konnte sowohl beim 1K- als auch beim 2K-UV-Clear-Coat bis zu Temperaturen von $250 \text{ }^\circ\text{C}$ nachgewiesen werden. Lediglich die zur Erzielung einer optimalen Verlaufs- und Oberflächenglätte eingesetzte Additivkombination neigte bei längerer Lagerung zu Gelteilchenbildung. Dieses Problem konnte durch die Modifikation der Additivierung unter Beibehaltung der bisher erzielten positiven Eigenschaften gelöst werden.

Auch der 100%-ige Dual-Cure UV-Klarlack erfüllte, mit Ausnahme der Dampfstrahltest-Beständigkeit im Anschluss an den Kondenswassertest, die Anforderungen der Räderindustrie. Probleme traten nur in Kombination mit einem speziellen 2K Hydro-Base-Coat auf. Nach dem Wechsel des 2K Hydro-Base-Coat wurden sämtliche Anforderungen erfüllt.

Aufbauend auf den mit 18“ Kfz-Felgen erarbeiteten positiven Ergebnissen wurde die UV-Beschichtung und UV-Vernetzung mit der im 3D-Inert Projekt entwickelten Prototypenanlage an weiteren 3D-Testobjekten, konkret an einer Achse, einem Kfz-Stoßfänger und einem Pumpengehäuse untersucht:

UV-Achslackierung: Im 3D-Inert Projekt wurden beim Partner LANKWITZER umfangreiche Versuche zur Optimierung der Haftung von als Grundlage für Achslackierungen eingesetzten Hydrotauchgrundierungen und Pulverlacken unter Beibehaltung der chemischen Beständigkeit gegen FAM-Prüfkraftstoff und Bremsflüssigkeit durchgeführt. Dabei wurden Lösungsansätze sowohl mit einem Serienbindemittel als auch einem neuen, im Coil-Coating Bereich eingesetzten Bindemittel untersucht. Beide Bindemittel zeigten eine sehr gute Grundhaftung auf den mit obigen Materialien beschichteten Untergründen und blankem Stahlblech (Gardobond OC). Durch die Modifikation der beiden gut haftenden UV-Harze mit höherfunktionellen Monomeren konnte zwar die Medienbeständigkeit verbessert werden, die Haftung auf lackiertem Untergrund war jedoch nicht mehr gegeben. Entsprechend wurde dieser Ansatz nicht weiter im Projekt verfolgt.

Weitere Versuche mit Haftharzen (teils nicht reaktive Inertharze) in Kombination mit höherbeständigeren UV-Bindemitteln zeigten einige gute Medienbeständigkeit und Haftung auf den verschiedenen Untergründen, scheiterten jedoch aufgrund von Blasenbildung und weißem Anlaufen in dem 240 h Kondenswassertest. Letztendlich wurden 2 bis 3 höherfunktionelle Kombinationsbindemittel für die beiden gut haftenden Basisbindemittel ermittelt, die sowohl eine gute Haftung nach Gitterschnittprüfung \leq GT 1, sowie eine gute chemische Beständigkeit gegen die beiden kritischen Prüfmedien FAM Prüfkraftstoff und Bremsflüssigkeit gewährleisten. Die anschließenden Korrosionsschutzprüfungen auf blankem Stahlblech zeigten ebenfalls positive Ergebnisse. Die Ergebnisse wurden auf unterschiedlichen Untergründen verifiziert und die Rezeptur optimiert.

UV-Stoßdämpferlackierung: Für die geplante UV-Beschichtung von Stoßdämpfern wurden verschiedene Monomere, Oligomere und Mattierungsmittel in Bezug auf ihre Eignung zur Realisierung des angestrebten Glanzgrades sowie der Korrosionsbeständigkeit für UV-härtende pigmentierte Schwarzlack untersucht. Hierzu wurden pigmentierte UV-Lacke auf die Prüfuntergründe Q-Paneel, Gardobond WH (eisenphosphatierter Untergrund) und Gardobond 26 (Zinkphosphatierter Untergrund) appliziert und in der Prototypenanlage unter O₂-reduzierter Atmosphäre gehärtet. Anschließend wurde beim Partner LANKWITZER die Korrosionsschutzbeständigkeit im Salzsprühtest, Schwitzwassertest und VDA-Wechseltest geprüft. In Abbildung 7 wird ein mit einem pigmentierten schwarzen UV-Lack beschichteter, sowie in der Prototypenanlage vernetzter Stoßdämpfer gezeigt.



Abbildung 7: Mit pigmentiertem UV-Lack beschichteter Stoßfänger

Die Auswertung der Ergebnisse zur Salzsprühtest-Beständigkeit nach der DBL 7391.60 an beschichteten Stoßdämpfern zeigte anstelle des Soll-Wertes ≤ 1 mm eine Unterwanderung von 2 mm. Durch die Optimierung der Lackformulierung in Form einer Erhöhung der Quervernetzung mittels höherfunktioneller Harze wurde die angestrebte Steigerung der Korrosionsschutzbeständigkeit erzielt. Die restlichen Anforderungen hinsichtlich Schwitzwasserbeständigkeit und VDA-Wechseltestbeständigkeit wurden erfüllt.

Aufgrund der sehr präzisen Ergebnisse aus den Ray-Tracing Simulationsrechnungen war kein wesentlicher Optimierungsbedarf an der Prototypenanlage erforderlich. Entsprechend konnte die Prototypenanlage ohne wesentliche Modifikation für die weiteren Applikationsversuche verwendet werden. In den Applikationsversuchen wurde die Eignung der Prototypenanlage zur UV-Härtung unter inerten Umgebungsbedingungen für weitere komplexe 3D-Geometrien und Substratmaterialien untersucht. Konkret wurde ein Pumpengehäuse, bei dem speziell die Lackierung der rotationssymmetrisch auf dem Pumpengehäuse angeordneten Kühlflächen ein bisher für konventionelle UV-Anlagen unlösbares Problem darstellte, erfolgreich mit der im 3D-Inert Projekt entwickelten Prototypenanlage beschichtet (siehe Abbildung 8).

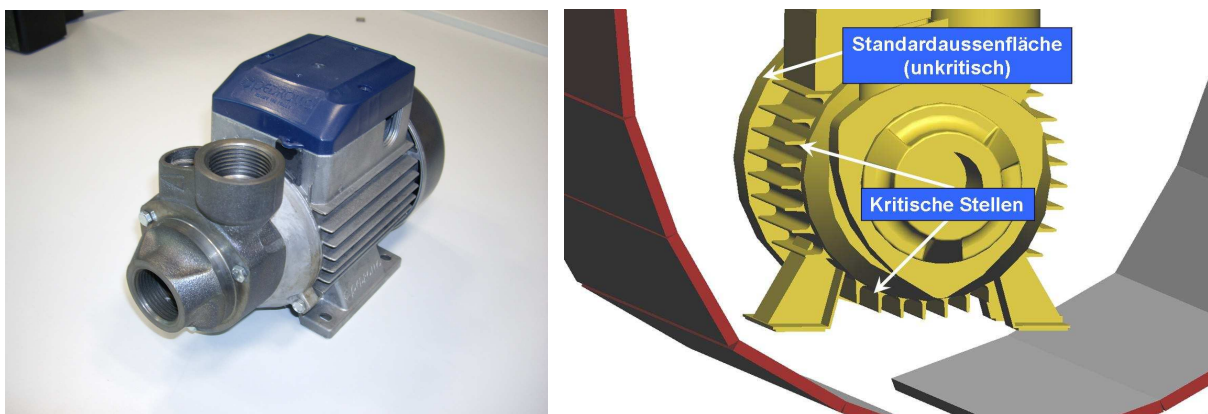


Abbildung 8: erfolgreich mit UV-Lack beschichtetes Pumpengehäuse

Als weitere Applikation wurde die Beschichtung von unterschiedlich geformten Kunststoffkörpern mit UV-vernetzenden Lacken erfolgreich im 3D-Inert Projekt untersucht. Abbildung 9 zeigt die mit UV-Klarlacken bzw. pigmentierten UV-Lacken beschichteten Kunststoffkörper sowie den im 3D-Inert Projekt für die Beschichtung von Kunststoffkörpern verwendeten Reflektoraufbau.

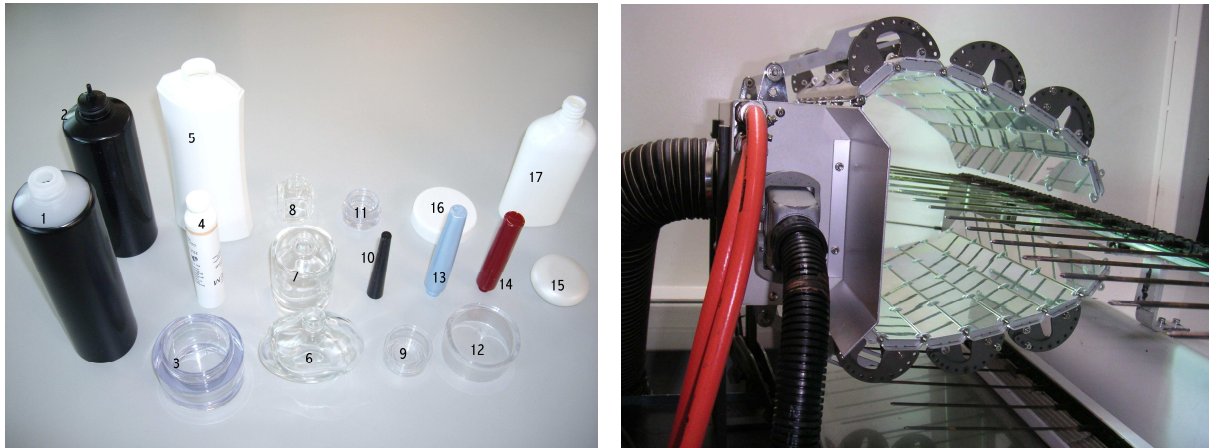


Abbildung 9: erfolgreich mit UV-Klarlacken und pigmentierten UV-Lacken beschichtete Kunststoffkörper sowie für die Beschichtung von Kunststoffkörpern verwendeter Reflektoraufbau

Im letzten Entwicklungsschritt wurde die 3D Ray-Tracing Simulation dahingehend erweitert, dass sowohl reale 3D-Geometrien mit beliebigen Dimensionen bzw. Durchmessern, sowie dynamische Prozesse, wie z.B. die in der Inert-Kammer rotierende Kfz-Felge, numerisch simuliert und optimiert werden können (Abbildung 10). Ein Vergleich von mit der dynamische 3D-Simulation berechneten mit den in den Laborversuchen gemessenen Ergebnisse zeigte eine gute Übereinstimmung.

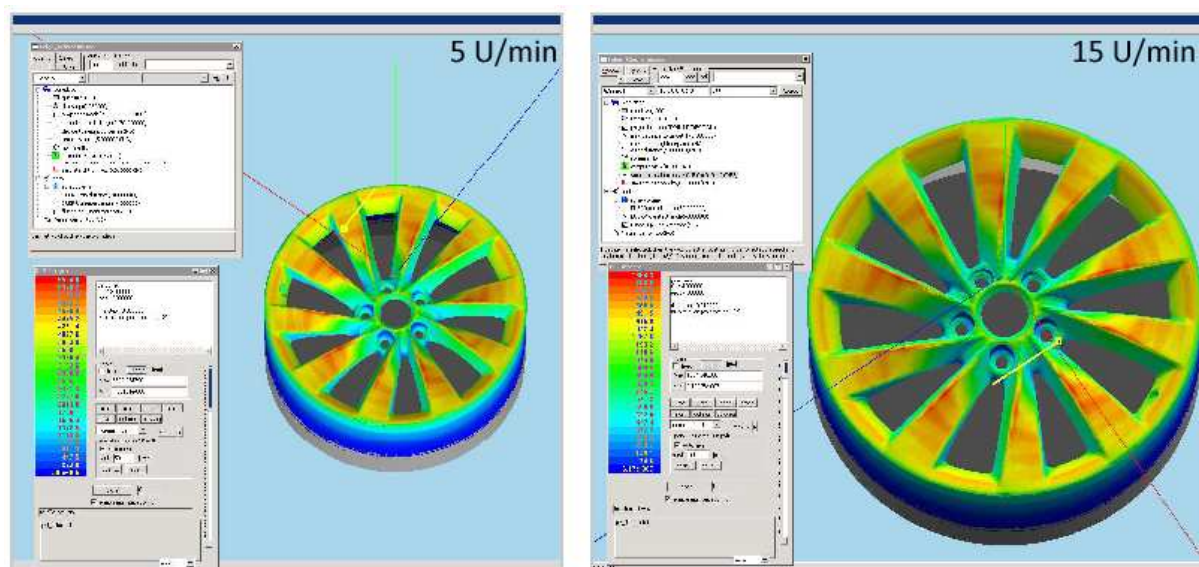


Abbildung 10: Ray-Tracing Simulationen für dynamisch mit einer Rotationsgeschwindigkeit von 5 U/min bzw. 15 U/min beschichtete Kfz-Felgen

Ein **Vergleich der** im 3D-Inert Projekt erarbeiteten **Ergebnis mit der ursprünglichen Zielsetzung** zeigt, dass die wesentlichen Ziele entsprechend der Planung im Antrag erreicht wurden.

Als wichtiger technologischer Erfolg steht zu Projektabschluss eine Prototypenanlage zur Verfügung, mit der erstmals UV-Klarlacke und pigmentierte UV-Lacke auf großen, komplex geformten 3D-Bauteilen mit Kantenlängen von bis zu 500 mm unter inerten Umgebungsbedingungen vernetzt werden können. In Abbildung 11 wird die im 3D-Inert Projekt entwickelte Prozesskammer mit optimierter Reflektorgeometrie für die Vernetzung von UV-Lacken auf komplex geformten 3D-Objekten mit Kantenlängen bis zu 500 mm gezeigt.

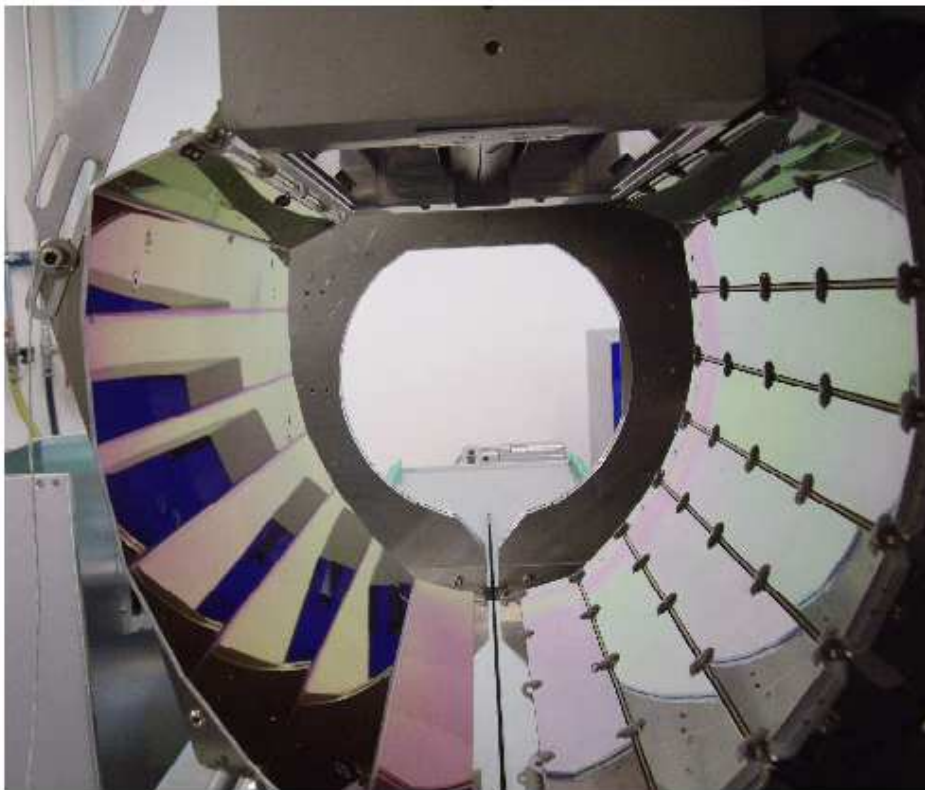


Abbildung 11: "3D-Inert"- Prozesskammer für die UV-Vernetzung von UV-Lacken auf großen 3D-Objekten unter statisch inerten Umgebungsbedingungen

Als weiteres wichtiges Ergebnis konnte dadurch, dass anstatt von bisher 2 bis 4 UV-Strahlern zukünftig nur noch 1 UV-Strahler pro Anlage benötigt wird, der Energieeinsatz pro Anlage um Faktor 2 bis 4, d.h. um 50% bis 75%, reduziert werden. Erreicht wurde dieses Ziel zum Einen dadurch, dass durch die Inertisierung der Prozessumgebung mit N_2 der für die Lackhärtung erforderliche UV-Energieeintrag bzw. Photoinitiatoranteil drastisch reduziert, bzw. alternativ der Abstand zwischen UV-Strahler und zu vernetzender Oberfläche entsprechend vergrößert werden kann. Zum Anderen wurde die Reflektorgeometrie im 3D-Inert Projekt so entwickelt und realisiert, dass eine optimale Ausnutzung der vom Strahler emittierten UV-Strahlung sichergestellt werden kann.

Proportional zur Reduzierung der bisher erforderlichen 2 bis 4 UV-Strahler auf zukünftig lediglich 1 UV-Strahler pro UV-Anlage konnte auch der Prozessraum in axialer Richtung um 50% bis 75% reduziert werden. Zusätzlich wurde durch die Optimierung der Reflektorgeometrie eine Reduzierung des Prozessraums in radialer Richtung erreicht. Durch diese Reduzierung des Prozessraums konnte eine Halbierung des für die Inertisierung verwendeten N_2 gegenüber konventionellen Inert UV-Prozessen erzielt werden. Konkret wird zurzeit für die Inertisierung in konventionellen UV-Druckanwendungen ein N_2 -Volumenstrom von 30 m^3/h bis 80 m^3/h benötigt. Dagegen wurde im 3D-Inert Projekt für die Inertisierung der Prozessumgebung zur Vernetzung der UV-Lacke auf einer 18" Felge im ein N_2 Volumenstrom von 15 m^3/h bei einem Rest O_2 -Gehalt von 200 ppm gemessen. In Abbildung 11 wurde bereits die optimierte Reflektorgeometrie mit einem reduziertem Prozessraum gezeigt.

Einen weiteren wesentlichen Beitrag zur Energieeinsparung leistet das im 3D-Inert Projekt entwickelte Ray-Tracing Simulationswerkzeug, mit dem der UV-Vernetzungsprozess bzw. die prozessspezifischen Parameter, wie die Bestrahlungsintensität, Bestrahlungsdauer, usw., im Vorfeld individuell an die spezifischen Anforderungen der 3D-Objekte und dynamischen Anforderungen im Prozessraum, wie Rotation, Linearbewegung, usw., angepasst und optimiert werden können. Weiterhin trägt die im 3D-Inert Projekt entwickelte Ray-Tracing Simulation wesentlich zur Reduzierung von Produktionsausschuss und Lackmaterial, sowie Energie- und Zeitaufwand bei der Konfiguration und dem Einfahren von UV-Vernetzungsprozessen für neue 3D-Produkte bei.

Nach wie vor existiert weltweit kein vergleichbares UV-Aggregatsystem, das wie der neu im 3D-Inert Projekt entwickelte Prototyp eine effiziente Vernetzung von UV-Klarlacken und pigmentierten UV-Lacken auf großen, komplex geformten 3D-Objekten mit Kantenlängen bis zu 500 mm unter industriellen Umgebungsbedingungen ermöglicht.

Abweichungen der Ergebnisse von der ursprünglichen Zielsetzung ergaben sich lediglich in Bezug auf die im Antrag geplante gepulste Inertisierung. In den zu Projektbeginn durchgeführten Simulationsrechnungen hat sich gezeigt, dass mit der gepulsten Umspülung des zu beschichtenden 3D-Objektes nicht die im 3D-Projekt in Bezug auf gleichmäßige Lackvernetzung und Oberflächenqualität angestrebten Ergebnisse erreicht werden. Entsprechend wurden alternative Inertisierungs-Verfahren untersucht und mit einem hybriden Verfahren, basierend auf einer statischen Volumen-Inertisierung in Kombination mit einem optimierten Prozessraum ein Verfahren realisiert, mit dem die im 3D-Inert Projekt angestrebten Ziele erreicht und zum Teil sogar übertroffen werden können.

Nachfolgend folgt eine **ökologische und ökonomische Bewertung der im FuE-Projekt erzielten Ergebnisse**. Ziel des von IST METZ in Zusammenarbeit mit dem Partner LANKWITZER durchgeführten FuE Projektes war die Entwicklung eines Verfahrens sowie der Aufbau einer Prototypenanlage, mit der erstmals die effiziente und energiesparende Beschichtung von großen 3D-Bauteilen mit Kantenlängen bis zu 500 mm mit UV-härtenden Lacken bzw. Farben unter O_2 -reduzierten Umgebungsbedingungen im diskontinuierlichen

bzw. kontinuierlichen Betrieb realisiert und nachgewiesen werden können. Damit steht erstmals ein geeignetes Verfahren für die Substitution von gesundheits- und umweltbelastenden, thermisch härtenden Lacken für die Beschichtung von großen 3D-Objekten in der Automobil-Zuliefer- und Kunststoffindustrie (z. B. Aluminium-Radfelgen, Achsen, Stoßfänger, Lenkungscomponenten, usw.) durch umweltschonende UV-härtende Lacke zur Verfügung. Zusätzlich zur Reduzierung der VOC-Emissionen können durch den erstmaligen Einsatz von UV-härtenden Lacksystemen erstmals große 3D-Objekte direkt "In-Line" verarbeitet werden, wodurch der Aufwand für die Nachbearbeitung bzw. Reparaturlackierung von 3D-Objekten, der bei komplexen Karosserieteilen bis zu 40 % beträgt, drastisch reduziert werden kann.

Als weiteres Ziel wurde eine Halbierung des elektrischen Energiebedarfs von UV-Aggregaten, sowie eine Reduzierung des Fotoinitiatoranteils um bis zu 80% bei gleichbleibender Produktqualität angestrebt. Realisiert werden sollte dieses Ziel durch die Entwicklung einer neuen Reflektor- und Prozesskammergeometrie, die eine Reduzierung des Energieeintrags bei gleichbleibender Oberflächenqualität ermöglichen sollte, sowie durch die Inertisierung des Prozessraums. Nachfolgend wird der Beitrag der einzelnen Optimierungsmaßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs bilanziert:

Maßnahme	Ausgangssituation zu Projektstart	Projektergebnis	Faktor
Reduzierung des Energieeintrags bzw. der Zahl der UV-Strahler	2 - 4 UV-Strahler pro Produktionsanlage	1 UV-Strahler pro Produktionsanlage	2 - 4
Reduzierung des Fotoinitiator-Anteils	UV-Räderklarlack: 6 - 8 %	UV-Räderklarlack: 3 - 4 %	2
	UV-Einschichtlack schwarz für Metall: 6 - 10 %	UV-Einschichtlack schwarz für Metall: 1 - 2,5 %	3 - 5
Reduzierung des N ₂ Verbrauchs für die Inertisierung der Prozessumgebung	30 m ³ /h – 80 m ³ /h (UV-Vernetzung in konventionellen Druckanwendungen)	15 m ³ /h (für die UV-Vernetzung einer 18" Kfz-Felge)	2

Die ökonomische Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass durch die Reduzierung von bisher 2 bis 4 UV-Strahlern auf zukünftig 1 UV-Strahler die Investitionskosten für eine 3D-Inert UV-Anlage, abhängig von der Komplexität der Geometrie des zu beschichtenden 3D-Objektes, um 10% bis 50% gesenkt werden können. Bei den Betriebskosten für die 3D-Inert UV-Anlage wurde entsprechend der Zahl der eliminierten UV-Strahler bzw. der entsprechenden UV-Strahlungsleistung ebenfalls eine Reduzierung um 50% bis 75% erreicht.

Aufbauend auf dem erfolgreich abgeschlossenen FuE-Projekt sind folgende **Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse** geplant. Die im 3D-Inert Projekt entwickelte Prototypenanlage für die kontinuierliche, effiziente und energiesparende Beschichtung von großen 3D-Objekten mit Kantenlängen bis zu 500 mm mit UV-härtenden Lacken bzw. Farben unter O₂-reduzierten Umgebungsbedingungen soll unmittelbar nach Projektabschluss zu einem Produkt weiterentwickelt, sowie noch im Jahr 2011 gemeinsam von den Partnern IST METZ und LANKWITZER unter der Bezeichnung "MBS[®] 3D - Inert" in den Markt eingeführt und vermarktet werden. Zur Unterstützung der Markteinführung plant der Partner LANKWITZER den Bau eines Technikums, in dem die 3D-Inert UV-Anlage zukünftig interessierten Anwendern unter praxisnahen Umgebungsbedingungen präsentiert werden kann.

Bei IST METZ wird die Erschließung von neuen Märkten, u.a. in den Bereichen: bedrucken von Tuben und Hülsen, lackieren von Kosmetikbehältern und Kosmetikverpackungen, Autoteile sowie industrielle Applikationen, mit der im 3D-Inert Projekt entwickelten "MBS[®] 3D - Inert" Anlage angestrebt. Hierzu wurde im Juni 2011 von IST METZ ein Artikel in der renommierten Fachzeitschrift JOT [1] veröffentlicht. Zusätzlich ist die Präsentation der "MBS[®] 3D - Inert" Anlage auf internationalen Fachmessen sowie auf der von IST METZ veranstalteten, international besuchten Hausmesse "UV-Days 2011" geplant.

Als Vertrieb-Unterstützende Maßnahme sind weiterhin eine Internetpräsentation auf der IST METZ Homepage, sowie Fachaufsätze und Fachvorträge 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 Vernetzung von UV-Farben und UV-Lacken erreicht wurde. Bereits zu Projektabschluss konnte eine Prototypenanlage für die kontinuierliche, effiziente und energiesparende Beschichtung von großen 3D-Bauteilen mit Kantenlängen bis zu 500 mm mit UV-härtenden Lacken unter O₂-reduzierten Umgebungsbedingungen präsentiert werden. In anschließenden Labortestreihen wurde der Nachweis für die Realisierung der im 3D-Inert Projekt angestrebten Ziele, wie die UV-Härtung von großen 3D-Objekten mit Kantenlängen bis 500 mm, sowie die Halbierung des Energie- und N₂-Verbrauchs bestätigt und zum Teil sogar übertroffen.

Nach Projektabschluss soll der im 3D-Inert Projekt entwickelte Prototyp kontinuierlich zu einem marktreifen Produkt weiterentwickelt und noch im Jahr 2011 unter der Bezeichnung "MBS[®] 3D - Inert" in den Markt eingeführt werden. Zur Unterstützung der Markteinführung plant der Partner LANKWITZER eine Technikumsanlage, in der die "MBS[®] 3D - Inert" Anlage interessierten Anwendern unter praxisnahen Umgebungsbedingungen vorgeführt werden kann.

Im Gegensatz zur Planung im Antrag führten die Entwicklungsarbeiten zur Realisierung einer gepulsten Inertisierung von Beschichtungen auf 3D-Objektoberflächen nicht zu dem gewünschten Ergebnis. Dieser Ansatz wurde im Projekt verworfen und ein alternatives hybrides Inertisierungsverfahren, basierend auf einer statischen Volumen-Inertisierung in Kombination mit einem optimierten Prozessraum entwickelt, mit dem der erfolgreiche Nachweis der im 3D-Inert Projekt angestrebten Ziele erbracht wurde.

Literaturverzeichnis

- [1] JOT Nr. 2011-06: "UV-Lack auf komplexen 3D-Bauteilen"