

- ENTWURF –

## BEWILLIGUNGSEMPFÄNGER



Abschlussbericht zum Förderprojekt:

***Einheitliche Versorgungs- und Ansteuerungselektronik für konventionelle und LED-basierte UV-Aggregate zur Vorbereitung und Beschleunigung der Umrüstung auf umweltschonende LED-Technologie im Bereich der industriellen Lackhärtung (LEDprepared)***

Art des Berichtes:

Abschlussbericht zum Vorhaben mit dem Aktenzeichen 23693/01-21/2, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

Verfasser: Thomas Kirschner, Stefan Lechler

Nürtingen im März 2017

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>32693/01- 21/2</b>	Referat	<b>21</b>	Fördersumme	<b>199.000 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Einheitliche Versorgungs- und Ansteuerungselektronik für konventionelle und LED-basierte UV-Aggregate zur Vorbereitung und Beschleunigung der Umrüstung auf umweltschonende LED-Technologie im Bereich der industriellen Lackhärtung (LEDprepared)</b>			
<b>Stichworte</b>					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
<b>18 Monate</b>		<b>16.03.2015</b>		<b>31.12.2016</b>	
Zwischenberichte		halbjährlich			
<b>Bewilligungsempfänger</b>		IST METZ GmbH Lauterstr. 14 - 18 72622 Nürtingen		Tel 07022 6002-0 Fax 07022 6002-76	
				Projektleitung Thomas Kirschner	
				Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b>		eta plus electronic gmbh Lauterstraße 29 72622 Nürtingen			
 <b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b> Die weltweit installierte Gesamtleistung konventioneller UV-Bestrahlungsaggregate im Bereich intermittierender Bestrahlungsprozesse beträgt ca. 128 MW, was im Ein-Schichtbetrieb (1700 h/a) mit einem jährlichen Energieverbrauch von ca. 218 GWh einhergeht. Von diesem Energieverbrauch könnten mindesten 25 % und teilweise bis zu 90 % durch Einsatz der UV-LED-Technologie eingespart werden. Ebenfalls könnte durch den Einsatz der UV-LED-Technologie eine signifikante Menge an umweltschädlichem Quecksilber eingespart werden. Der flächendeckende Einsatz der UV-LED-Technologie im Bereich intermittierender Lackhärtungsprozesse scheitert derzeit vor allem daran, dass es keine für beide UV-Technologien kompatible, elektrische Versorgungsstruktur gibt. Der wesentliche innovative Ansatz des vorliegenden Projektes vereinigt die elektrische Versorgung und Ansteuerung konventioneller UV-Gasentladungsstrahler und von UV-LED-Arrays. Auf diese Art und Weise werden Anwender der UV-Technologie in der Zukunft mit nur einer Versorgungsinfrastruktur beide Technologien parallel betreiben können oder in der Lage sein, ohne großen Aufwand und mit reduziertem Invest von der konventionellen auf die energiesparendere und umweltschonende UV-LED-Technologie zu wechseln. So werden die derzeit vorhandenen Markteintrittsbarrieren für die UV-LED-Technologie überwunden und die energetischen Einsparpotenziale der UV-LED-Technologie kurz- bis mittelfristig erschlossen.					
 <b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b> Die Energieversorgung, sowohl für konventionelle Gasentladungsstrahler als auch für UV-LED-Arrays, wird in dem Lösungsansatz das elektronische Vorschaltgerät übernehmen. Dies zu realisieren ist aufgrund der sich widersprechenden Anforderungen des Betriebs von UV-LED-Arrays und konventionellen UV-Miteldruckstrahlern zwar technisch hoch anspruchsvoll, jedoch ein evidenter Teil des Lösungsansatzes. Genau auf diese Weise können einerseits auch bestehende Anlagenperipherien mit UV-LED-Aggregaten nachgerüstet werden und andererseits wird durch die im EVG vorgenommene Resonanzwandlung bei hohen Frequenzen ein sehr guter energetischer Wirkungsgrad von über 96 % erreicht. Derartige Wirkungsgrade werden von den bisher üblichen LED-Treiberplatinen nicht erreicht.					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Der Lösungsansatz sah vor, ein elektronisches Vorschaltgerät für die Energieversorgung, sowohl von konventionellen Gasentladungsstrahlern, als auch von UV-LED-Modulen heranzuziehen. Hierzu wurde ein universell anwendbares Anpassnetzwerk realisiert. Dabei wurde konzeptionell ein modularer Aufbau verfolgt, mit dem beliebige Anzahlen von LED-Strängen versorgt werden können. Hervorzuheben ist, dass mit dem entwickelten Konzept auch unterschiedliche Stranglängen versorgt werden können. Ebenfalls wurde ein von Zuleitungskabellängen und deren Induktivitäten unabhängiger Einsatz der Matchbox erreicht. Die steuerungstechnische Einbindung der Zusatzelektroniken in die SPS-Steuerung wurde mittels eines neuen Gateways erreicht. Dieses ermöglicht eine Kommunikation via Profibus. Zu lösende Kernproblematiken bestanden in der Auslegung und Entwicklung der Wärmeabführung aus der Leistungselektronik sowie der Realisierung eines möglichst kompakten Elektronikaufbaus, mit dem Ziel, die Elektronik auch in begrenzten Bauräumen ohne Veränderung der Gehäusegeometrie gängiger UV-Aggregate einsetzen zu können. Diese Herausforderungen wurden durch umfangreiche Simulationen zum Heat-Management sowie einen räumlich hocheffizienten Stapelaufbau überwunden und die anvisierten Ziele vollständig erreicht. Ebenfalls wurde ein über den Profibus ablaufender Erkennungsprozess für konventionelle UV-Aggregate und UV-LED-Aggregate entwickelt. Dabei ist im Falle der UV-LED-Aggregate das Gateway, im Falle konventioneller UV-Aggregate das Lampenmodul der jeweilige Profibus-Teilnehmer. Die weitere, automatische Unterscheidung verschiedener UV-LED-Module und UV-Gasentladungslampen ist in den entwickelten Erkennungsprozess mit eingebettet. Je nach erkanntem Aggregatgrundtyp und spezieller Ausgestaltung der UV-Quelle (LED oder Gasentladungslampe) kommen spezielle SPS-Routinen zum Einsatz. Eine zwischen Luft- und Wasserkühlung vollkompatible elektrische Schnittstelle ermöglicht prinzipiell die vollständige zukünftige Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf alle Strahlervarianten. Das angestrebte Projektziel einer vollständigen Kompatibilität auf beliebige Aggregat- und UV-Quellentypen konnte somit erfolgreich realisiert werden.

Abschließend wurden die Projektergebnisse in einen luft- und einen wassergekühlten Prototypen überführt sowie erfolgreich demonstriert. Diese decken ein breites Leistungs- und Anwendungsprofil ab.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Mit der Öffentlichkeitsarbeit wurde bereits begonnen. So wurden bereits erste Datenblätter, Flyer und Werbeprospekte entworfen. Die im vorliegenden Projekt entwickelte Technologie soll unter dem Namen UV Hot Swap in den Markt eingeführt werden. Die Erstpräsentation der neuen Hot Swap fähigen UV-Aggregate wird auf den UV-Days 2017 bei IST METZ in Nürtingen stattfinden. Ebenfalls soll die neue Technologie breitenwirksam über Kanäle wie gezielte Fachpublikationen, die Teilnahme an Messen und Kongressen, sowie die Direktansprache bereits vorhandener und ggf. auch neuer Kontakte erfolgen.

## ***Fazit***

Die im vorliegenden Projekt verfolgte Zielstellung wurde vollständig erreicht.

Auf Basis der erzielten Ergebnisse steht zukünftig eine Technologie zur Verfügung, mit der schnell und einfach unter Heranziehung derselben Peripherie zwischen konventionellen UV-Gasentladungsstrahlern und UV-LED-Modulen gewechselt werden kann. Die Projektergebnisse erlauben die Bereitstellung eines breiten Leistungs- und Anwendungsfeldes. Auf diese Weise wird eine derzeit noch bestehende Markteintrittsbarriere für die UV-LED-Technologie in Kürze dauerhaft überwunden; dies wird dazu beitragen, die UV-LED-Technologie stärker am Markt zu etablieren und die energetischen Einsparpotenziale der UV-LED-Technologie weiter zu erschließen.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>PROJEKTKENNBLETT .....</b>	<b>1</b>
<b>VERZEICHNIS VON BILDERN, ZEICHNUNGEN, GRAFIKEN UND TABELLEN ....</b>	<b>4</b>
<b>1. ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>5</b>
<b>2. EINLEITUNG .....</b>	<b>6</b>
<b>3. ENTWICKLUNGSARBEITEN UND ERREICHTE ERGEBNISSE .....</b>	<b>10</b>
<b>FAZIT .....</b>	<b>25</b>

## Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

### Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Stand der Technik – Unterschiedliche elektrische Versorgung und Ansteuerung konventioneller UV-Mitteldruckstrahler und UV-LED-Aggregate .....	7
Abbildung 2: LEDprepared bzw. „Hot Swap“ Konzept zur einheitlichen elektrischen Versorgung und Ansteuerung konventioneller UV-Mitteldruckstrahler und von UV-LED-Aggregaten. ....	8
Abbildung 3: Logische Sicht auf LED-Aggregat .....	11
Abbildung 4: Grobkonzept der Steuerstruktur .....	11
Abbildung 5: Fotografie des aufgebauten Platinenmusters am Messstand .....	12
Abbildung 6: Simulationsergebnis zum in Abbildung 5 gezeigten Aufbau, Verteilung der Vorschaltgeräteleistung auf mehrere LEDs über eine Anpassschaltung (Matchbox) .....	13
Abbildung 7: Labormuster des Gateway zur steuerungstechnischen Einbindung .....	14
Abbildung 8: Fotografie des Testaggregats .....	15
Abbildung 9: Strömungssimulation der Luftkühlung .....	16
Abbildung 10: Thermosimulation Luftkühlung .....	16
Abbildung 11: Thermosimulation der Wasserkühlung .....	17
Abbildung 12: 3D-CAD-Modell der in das Testaggregat integrierten Matchbox-Einheiten .....	17
Abbildung 13: Links: CAD-Zeichnung (Schnitt) des luftgekühlten Aggregates. ....	18
Abbildung 14: Links: Foto der Elektronikbaugruppe für luftgekühlte Aggregate. ....	19
Abbildung 15: Links: Foto der Schnittstellen des luftgekühlten Aggregates .....	19
Abbildung 16: Blockdiagramm der elektronischen Schnittstelle .....	20
Abbildung 17: Übersicht des realisierten Steuerungsablaufes .....	21
Abbildung 18: Links: Foto der des luftgekühlten Aggregates (mit Vorschaltgerät) .....	23

### Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Volumina der UV-Technologie im Bereich der intermittierenden Prozesse mit derzeitigem Anteil der UV-LED-Technologie .....	6
Tabelle 2: Technische Daten der Prototypen .....	23

## 1. Zusammenfassung

Das vorliegende FuE-Vorhaben der Partner IST METZ GmbH und eta plus electronic gmbh verfolgte die Zielstellung, Markteintrittsbarrieren zur Einführung der energiesparenden, quecksilberfreien und damit umweltschonenderen LED-Technologie im UV-Härtungsbereich zu überwinden und damit deren Etablierung voranzutreiben und zu beschleunigen. Dazu planten die Projektpartner die Entwicklung einer neuartigen elektrischen Ansteuerung und Versorgung, welche erstmals universell sowohl für konventionelle UV-Gasentladungslampen, als auch für UV-LED-Lichtquellen eingesetzt werden kann. Auf diese Weise müssen potenzielle Kunden sich bei ihren Planungen und Investitionsentscheidungen nicht auf eine der beiden Technologien festlegen. Weiterhin sind sie in der Lage, zu einem späteren Zeitpunkt schnell und einfach von einer auf die andere UV-Quelle umzurüsten, da die Versorgungsinfrastruktur kompatibel zu beiden Technologien ist. Ebenfalls entfällt so die Notwendigkeit, bei Bedarf nach konventioneller und LED-basierter UV-Technologie zwei voneinander getrennte Versorgungsinfrastrukturen in Form von Schaltschränken und Elektronikmodulen zu unterhalten. In Anlehnung an das markteinführungsvorbereitende Konzept „HDready“ im Bereich der Fernsehapparate, nennen die Projektpartner das vorliegende Konzept künftig „Hot Swap“ (bisheriger Arbeitsname „LEDprepared“): Die Versorgungsinfrastruktur ist jederzeit in der Lage die moderne, kostensparende und umweltschonendere UV-LED-Technologie zu betreiben.

Das Projekt zielte insbesondere auf die Anwender intermittierender UV-Bestrahlungsprozesse im Industriebereich ab, bei denen durch den Einsatz von LED-Technologie Einsparpotenziale im Energieverbrauch von bis zu 90 % gegenüber den nicht für den Taktbetrieb geeigneten, konventionellen UV-Mitteldruckstrahlern existieren. Durch die beschleunigte Umrüstung auf UV-Technologie im Bereich intermittierender Bestrahlungsprozesse kann der hierfür weltweit benötigte Energie- und Ressourcenbedarf und somit ebenfalls der Ausstoß an klimaschädlichem CO<sub>2</sub> zukünftig nachhaltig drastisch reduziert werden.

Die angestrebten Projektergebnisse konnten vollständig erreicht werden; aufgrund der Notwendigkeit einige unerwartete technische Herausforderungen zu überwinden, war dafür jedoch eine Verlängerung der Projektlaufzeit um 3 ½ Monate erforderlich.

## 2. Einleitung

Industriell getaktete UV-Bestrahlungsprozesse, sogenannte intermittierende Prozesse, wurden zu Projektbeginn und werden derzeit immer noch auf Basis konventioneller, dauerhaft eingeschalteter UV-Mitteldruckstrahler durchgeführt. Diese konventionellen UV-Gasentladungsstrahler werden mittels getakteter Shutter in regelmäßigen Abständen abgeschattet. Dies liegt daran, dass UV-Mitteldruckstrahler nicht kurzfristig zu- und abgeschaltet werden können, ohne deren Lebensdauer signifikant zu reduzieren. Die dauerhafte Leistungsaufnahme von durchschnittlich ca. 12 kW pro Strahler wird daher bis heute billigend in Kauf genommen. Zur Anwendung kommen intermittierende UV-Bestrahlungsprozesse zur Lackhärtung insbesondere im Bereich komplexer Effekt- und Schutzlackierungen in der 3D-Lackierung, dem Körperdruck (Tuben, Becher etc.), dem Bogen-Verpackungsdruck sowie dem Bogen-Akzidenzdruck. In den genannten Bereichen können Energieeinsparungen von bis zu 90 %, mindestens jedoch von 25 % durch den Einsatz der UV-LED-Technologie erreicht werden. Diese Betrachtung basiert auf der Fähigkeit von UV-LEDs, schnell und einzeln an- und ausgeschaltet werden zu können und einer Gesamtzeit mit verschlossenem Shutter von ca. 25 % in getakteten Prozessen. Weiteres Einsparpotenzial der UV-LED-Bestrahlungstechnologie leitet sich ab aus Standby-Zeiten aufgrund von Betriebsstörungen, Jobwechsel oder Anlagenumrüstung (ca. 5 bis 10 % der Betriebszeit, im Bereich Bogen-Verpackungsdruck bis zu 30 %) sowie Hochlauf- und Nachkühlphasen (ca. 2,5 % der Betriebszeit) von konventionellen UV-Strahlern. Geschätzt wurden aber im Jahr 2014 nur ca. 2 % der intermittierenden UV-Bestrahlungsprozesse mittels UV-LED-Technologie durchgeführt. Eine Potenzialabschätzung auf Basis der Werte aus 2014 ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 1: Volumina der UV-Technologie im Bereich der intermittierenden Prozesse mitzeitigem Anteil der UV-LED-Technologie

Applikationen von „Intermittierenden Prozessen“	Installierte UV-Strahler (durchschn. Leistung)	Installierte Gesamtleistung	Anteil UV-LED-Technologie
Körperdruck	1.000 (2 kW)	2.000 kW	Max. 5 %
Bogen-Verpackungsdruck	6.000 (16 kW)	96.000 kW	< 1 %
Bogen-Akzidenzdruck	1.000 (12 kW)	12.000 kW	Max. 10 %
3D-Lackierung	3.000 (6 kW)	18.000 kW	< 1 %
<b>Summe</b>	<b>11.000 (11,6 kW)</b>	<b>128.000 kW</b>	<b>&lt; 2 %</b>

Die weltweit installierte Gesamtleistung konventioneller UV-Bestrahlungsaggregate betrug 2014 ca. 128 MW, was im Ein-Schichtbetrieb (1700 h/a) mit einem jährlichen Energieverbrauch von ca. 218 GWh einhergeht. Von diesem Energieverbrauch könnten mindestens 25 % und teilweise bis zu 90 % durch Einsatz der UV-LED-Technologie eingespart werden. Ebenfalls könnte durch den Einsatz der UV-LED-Technologie eine signifikante Menge an umweltschädlichem Quecksilber eingespart werden.

Der flächendeckende Einsatz der UV-LED-Technologie im Bereich intermittierender Lackhärtungsprozesse scheidet bis heute vor allem daran, dass es keine für beide UV-Technologien kompatible, elektrische Versorgungsstruktur gibt. Entsprechend müssen potenzielle Anwender zwei komplette UV-Bestrahlungsanlagen mit den konventionellen UV-Aggregaten sowie den UV-LED-Aggregaten und insbesondere deren kompletter elektrischer Infrastruktur nebeneinander

inander betreiben oder sich auf eine der beiden Technologien festlegen. Neben den beträchtlichen Kosten fließt in die wirtschaftliche Betrachtung auch der erhebliche Platzbedarf für Schaltschränke und elektronische Komponenten ein. Konventionell wird bei einer Festlegung auf eine der beiden Technologien zugunsten der langjährig bekannten, etablierten Quecksilber-Mitteldruckstrahler-Technologie entschieden.

An dieser Stelle setzte das geplante Innovationsvorhaben an, das genau diese Lücke durch die Entwicklung einer universell einsetzbaren, für beide Technologien kompatible Energieversorgung und Aggregatansteuerung geschlossen hat. Auf Basis der neu entwickelten Technologie wird die energiesparendere UV-Technologie sich sehr viel schneller mit all ihren Vorteilen im Bereich der intermittierenden UV-Bestrahlungsprozesse etablieren und durchsetzen.

Der zu Projektbeginn aktuelle Stand der Technik hinsichtlich der Ansteuerung und Energieversorgung konventioneller Quecksilberdampfstrahler und neuer UV-LED-Arrays ist in der folgenden Abbildung 1 dargestellt.

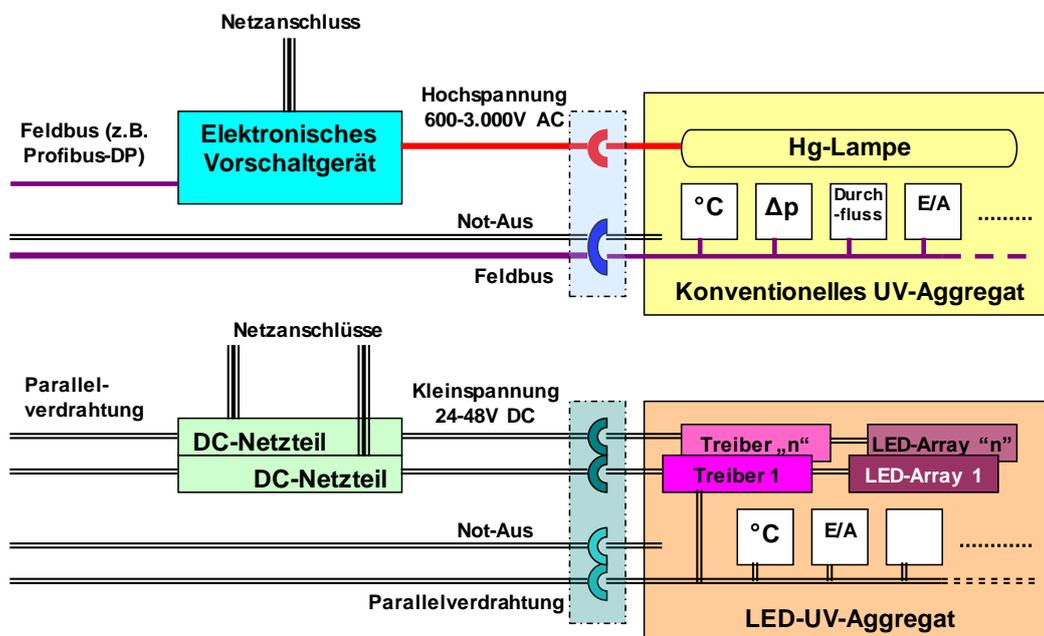


Abbildung 1: Stand der Technik – Unterschiedliche elektrische Versorgung und Ansteuerung konventioneller UV-Mitteldruckstrahler und UV-LED-Aggregate

Konventionelle UV-Gasentladungsstrahler werden über ein sogenanntes „Elektronisches Vorschaltgerät (EVG) betrieben. Das EVG beinhaltet sowohl die Energieversorgung (bis zu 3 kV Wechselspannung) als auch die Steuerung bzw. Regelung der UV-Lampe. EVG und UV-Lampenaggregat sind durch eine zweiadrige Hochspannungsleitung miteinander verbunden. Die Gasentladungsröhren benötigen eine relativ komplexe Temperaturregelung und Verschluss-Steuerung.

Dahingegen werden UV-LED-Arrays über ein Netzteil mit einer Gleichspannung zwischen 24 und 48 V mit Energie versorgt, während die Steuerung über eine spezielle, elektronische Treiberplatine erfolgt. Dabei muss die Treiberelektronik stets der Verschaltung und dem Aufbau der LED-Arrays angepasst sein, um alle für das Array vorgesehenen Funktionalitäten (Dimmbarkeit, Zu- und Abschaltung von Strängen, Zu- und Abschaltung einzelner LED's) zu erhalten.

Die aufwendigen und raumbeanspruchenden elektrischen Versorgungsinfrastrukturen werden in Schaltschränken untergebracht. Die Versorgungsinfrastrukturen für konventionelle UV-Aggregate und energiesparende UV-LED-Aggregate waren zu Projektbeginn in keiner Weise untereinander kompatibel. Dies betraf sämtliche am Markt befindliche Hersteller und Anbieter von UV-Aggregaten.

Der wesentliche innovative Ansatz des vorliegenden Projektes vereinigt die elektrische Versorgung und Ansteuerung konventioneller UV-Gasentladungsstrahler und von UV-LED-Arrays. Anwender der UV-Technologie werden in der Zukunft so mit nur einer Versorgungsinfrastruktur beide Technologien parallel betreiben können oder in der Lage sein, ohne großen Aufwand und mit reduziertem Invest von der konventionellen auf die energiesparendere und umweltschonende UV-LED-Technologie zu wechseln. So werden die nach wie vor vorhandenen Markteintrittsbarrieren für die UV-LED-Technologie überwunden und die energetischen Einsparpotenziale der UV-LED-Technologie kurz- bis mittelfristig erschlossen.

Der verfolgte, zum Patent angemeldete Lösungsansatz ist in der folgenden Abbildung 2 schematisch dargestellt.

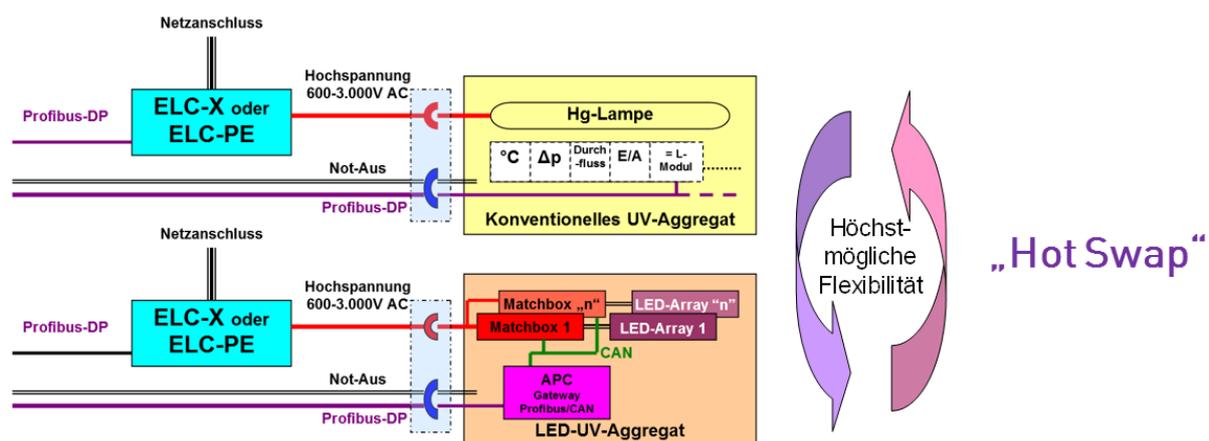


Abbildung 2: LEDprepared bzw. „Hot Swap“ Konzept zur einheitlichen elektrischen Versorgung und Ansteuerung konventioneller UV-Mitteldruckstrahler und von UV-LED-Aggregaten.

Die Energieversorgung, sowohl für konventionelle Gasentladungsstrahler als auch für UV-LED-Arrays, übernimmt das elektronische Vorschaltgerät. Dies war aufgrund der sich widersprechenden Anforderungen des Betriebs von UV-LED-Arrays und konventionellen UV-Mitteldruckstrahlern zwar technisch hoch anspruchsvoll, jedoch ein evidenter Teil des Lösungsansatzes. Genau auf diese Weise konnten einerseits bestehende Anlagenperipherien mit UV-LED-Aggregaten nachgerüstet werden und andererseits die im EVG vorgenommene Resonanzwandlung bei hohen Frequenzen und sehr gutem energetischen Wirkungsgrad von über 96 % erreicht werden. Derartige Wirkungsgrade werden von den bisher üblichen LED-Treiberplatten nicht erreicht.

Dazu wurde im Projekt ein neuartiges, mikrocontrollergesteuertes, elektronisches Anpassnetzwerk, die sogenannte „Matchbox“, entwickelt. Die Matchbox übernimmt in Kombination mit der neuen Mikrocontrollersteuerung die hardwareseitige Signalanpassung anstelle der bisherigen LED-Treiberplatten und gewährleistet somit eine vollständige Kompatibilität der neuen elektrischen/elektronischen Versorgungsinfrastruktur für die konventionelle Gasentladungs-UV-Technologie und die neue UV-LED-basierte Technologie.

Ergänzend zur Matchbox wurden im Projekt neue Softwareroutinen für die Mikrocontrollersteuerung und Firmwareroutinen für das EVG entwickelt und implementiert, um die für den LED-Betrieb notwendigen Funktionalitäten, wie beispielsweise schnelle Schaltzeiten bei hohen Lasten, zu realisieren. Weiterhin wurde eine automatische Erkennung des angeschlossenen UV-Aggregattyps (konventionell oder LED-basiert) entwickelt, sodass das EVG immer im entsprechenden Betriebsmodus arbeitet.

Auf diese Weise wurde die neue Aggregatansteuerung durch die Bereitstellung von Wechselspannungen variabler Frequenz und Amplitude in der Lage versetzt, beliebige konventionelle UV-Gasentladungsstrahler sowie UV-LED-Aggregate in Kombination mit der Matchbox optimal zu betreiben.

Der Lösungsansatz für die Matchbox basierte auf der Entwicklung eines analogen Anpassnetzwerks, das mit einer geeignet hohen Versorgungsspannung beaufschlagt wird und daraus eine Gleichspannung erzeugt, mit der jeweils ein oder mehrere sekundärseitig aus Halbleiterbausteinen bestehende UV-LED-Stränge versorgt werden können. So konnten Leiterquerschnitte geringgehalten werden und die für den LED-Betrieb notwendige Gleichspannungsvorsorgung erreicht werden. Ebenfalls wurden Detektorschaltungen zur Erfassung von Überspannungen und die Steuerung des Kurzschlussbetriebs als Teil der Matchbox entwickelt. Bei der gesamten Entwicklung der Matchbox stand die Realisierung der Fähigkeit, möglichst schnelle Schaltvorgänge im Bereich weniger ms synchronisiert mit einer Druckmaschine durchführen zu können, im Vordergrund. Anders hätte die gewünschte Einsetzbarkeit im Bereich schneller intermittierender Prozesse, und damit die gewünschte verkaufsbefördernde Energieeinsparung von mindestens 25 und bis zu 90 % nicht erreicht werden können. Die Erreichung des vorgesehenen Zieles war hoch anspruchsvoll, da in den genannten kurzen Schaltzeiten Lasten in den Bereichen von ca. 5 kW bzw. ca. 10 bis 20 kW geschaltet werden müssen.

Der verfolgte Lösungsansatz zur Erfüllung der speziellen Anforderungen im Bereich der UV-bestrahlenden, intermittierenden Prozesse war in der vorfolgenden Form völlig neu, aufwendig und wurde im vorliegenden Projekt erstmalig umgesetzt. Zu seiner Realisierung musste eine Vielzahl technischer Risiken überwunden werden.

### 3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

#### AP 1: Definitionsphase

##### IST METZ, eta plus

Sämtliche Anforderungen an das elektronische Vorschaltgerät (ELC® = Electronic Lamp Control), die Anlagensteuerung und die Matchbox wurden in diesem Arbeitspaket gemeinsam von beiden Partnern definiert und spezifiziert. Die vorgenommenen Spezifikationen bestimmten die nachfolgenden Entwicklungsarbeiten.

Die Spezifikationen betrafen:

- Schnittstelle zum ELC®
- Schnittstelle zum LED-Modul / -Strang
- Bauraum
- Kommunikationsschnittstelle
- Gateway Profibus/CAN
- Betriebszustände
- Schnittstelle Kühlung
- EMV-Spezifikationen

Projektbegleitende Aktualisierungen wurden in Abstimmung vorgenommen und flossen in die Arbeiten beider Partner ein.

#### AP 2: Konzeption und Pflichtenheft

##### IST METZ, eta plus

Die Definitionen und Spezifikationen wurden in ein gemeinsames Pflichtenheft überführt.

Weiterhin wurden die Grobkonzepte für grundlegende Schaltungstopologien, die Schnittstellen und die Firmware der Universalansteuerungstechnik entwickelt.

Die folgende Abbildung 3 zeigt den logischen Aufbau auf ein anzusteuern des LED-Aggregat.

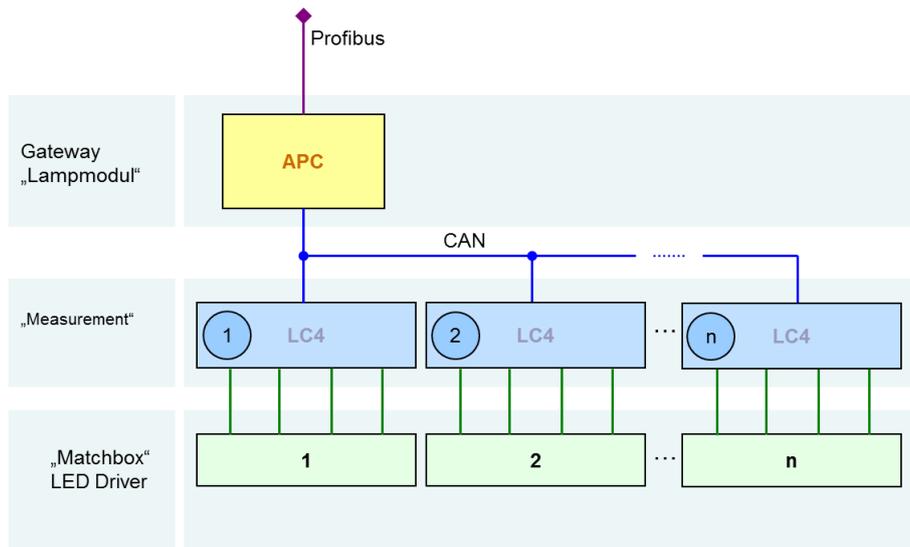


Abbildung 3: Logische Sicht auf LED-Aggregat

Das verfolgte Grobkonzept der Steuerstruktur ist in Abbildung 4 dargestellt.

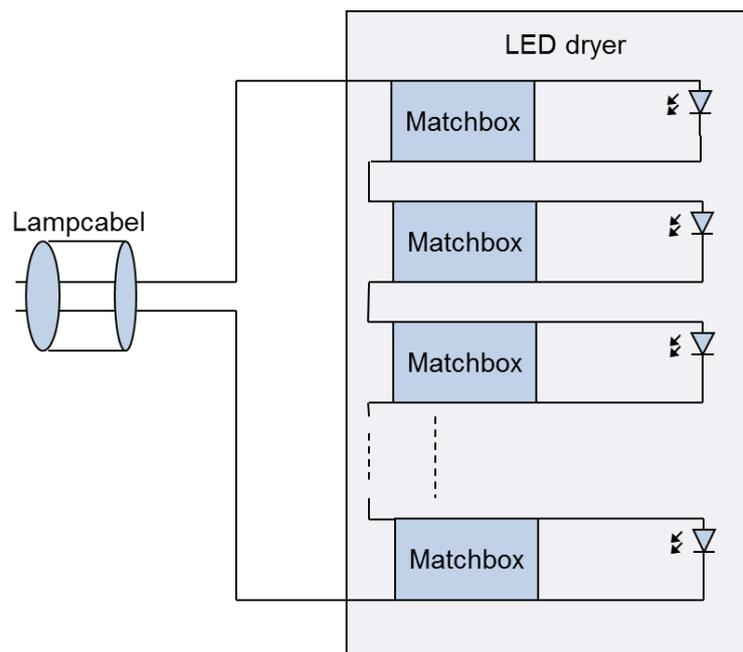


Abbildung 4: Grobkonzept der Steuerstruktur

Das Arbeitspaket wurde durch die Erbringung eines grundsätzlichen Funktionsnachweises abgeschlossen und projektbegleitend, bedarfsweise aktualisiert.

### AP 3: Entwicklung der „Matchbox“

#### IST METZ

Die IST METZ beteiligte sich an diesem Arbeitspaket, wie geplant, in Form von begleitenden Maßnahmen wie der Bewertung der erhaltenen Funktionalitäten der Matchbox. Die zu Projektbeginn getroffenen Grundannahmen konnten bestätigt werden.

#### eta plus

Die grundsätzliche Schaltungstopologie des universell anwendbaren Anpassnetzwerkes wurde erfolgreich entwickelt. Hierfür wurde konzeptionell ein modularer Aufbau realisiert, mit dem beliebige Anzahlen von LED-Strängen versorgt werden können. Hervorzuheben ist, dass mit dem entwickelten Konzept auch unterschiedliche Stranglängen versorgt werden können.

Die folgende Abbildung 5 zeigt ein bei eta plus entwickeltes und aufgebautes Platinenmuster, welches in umfangreichen Versuchen charakterisiert wurde.

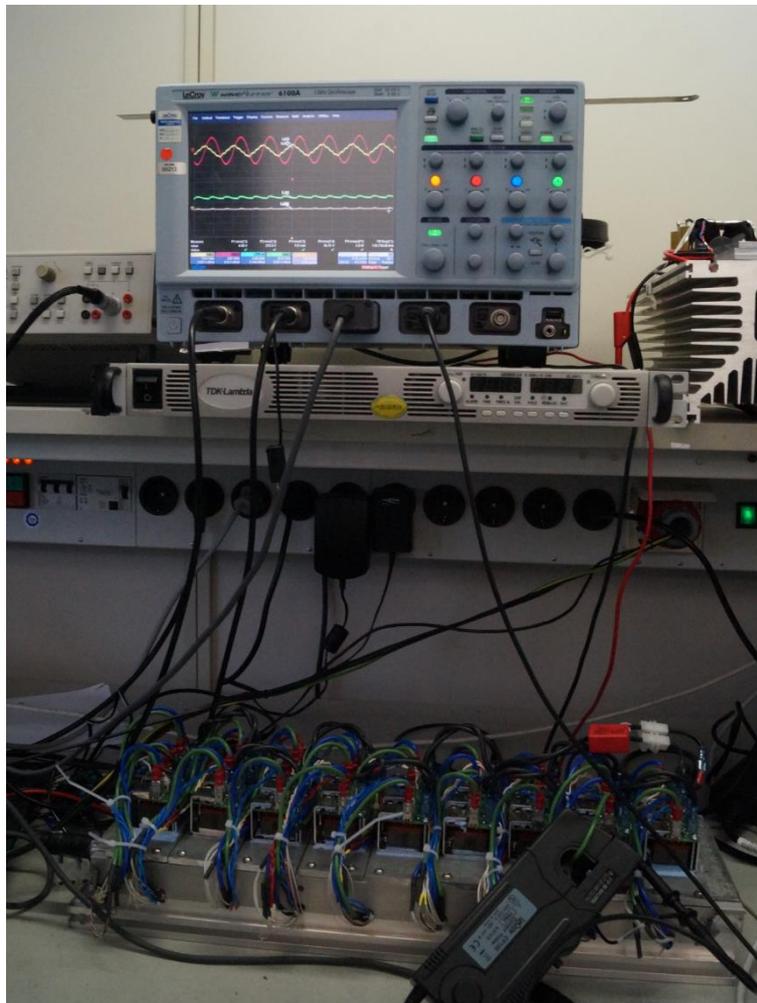


Abbildung 5: Fotografie des aufgebauten Platinenmusters am Messtand

Weiterhin wurden die entwickelten Schaltungen bei eta plus simuliert. Die nachfolgende Abbildung 6 zeigt exemplarisch eines der erhaltenen Simulationsergebnisse.

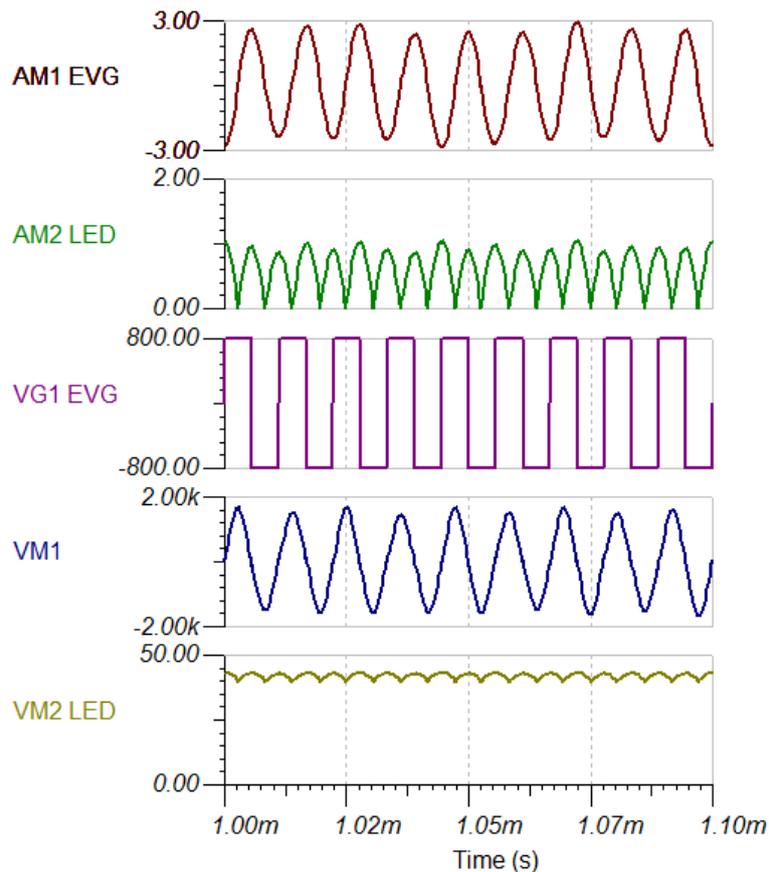


Abbildung 6: Simulationsergebnis zum in Abbildung 5 gezeigten Aufbau, Verteilung der Vorschaltgeräteleistung auf mehrere LEDs über eine Anpassschaltung (Matchbox)

Abschließend wurde eine elektrische Optimierung vorgenommen, die einen universell unabhängigen Einsatz der Matchbox von Zuleitungskabellängen und deren Induktivitäten ermöglicht. Darüber wurde das Trafodesign für hohe Leistungen auf Basis einer thermischen Analyse optimiert. Eine zu große Hitzeentwicklung ist demnach zukünftig ausgeschlossen.

#### AP 4: Steuerungstechnische Einbindung der Matchbox in die Anlagensteuerung

##### IST METZ

Das Arbeitspaket wurde in Form der Entwicklung und Implementierung einer zugehörigen SPS-Software zur Einbindung der Matchbox bearbeitet. Dies betrifft Routinen zur Konfiguration, zum Sollwertabgleich, der Visualisierung sowie der Datenvermittlung zwischen ELC und Matchbox.

##### eta plus

Der verfolgte Entwicklungsansatz ermöglichte eine Kommunikation der Matchbox über das Gateway. Entsprechend wurde eine Mikrocontrollerschaltung zur „Übersetzung“ der Profibus- und der CAN-Signale konzeptioniert, entwickelt und als Labormuster aufgebaut. Weiterhin wurden die Datenstrukturen festgelegt.

Der Aufbau der entwickelten Mikrocontrollerschaltung ist in nachfolgender Abbildung 7 gezeigt.

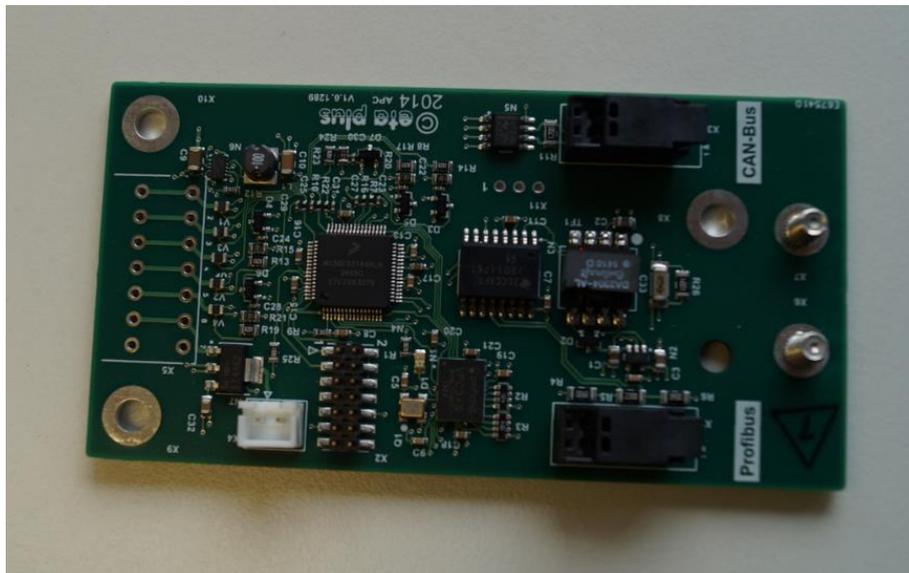


Abbildung 7: Labormuster des Gateway zur steuerungstechnischen Einbindung

Nachfolgend wurde eine Testanlage aufgebaut und das Gateway darin eingebunden. Die aufgebaute Testanlage besteht steuerungstechnisch aus der SPS-Steuerung, dem ELC (Electronic Lamp Control) sowie dem LED-Testaggregat mit den Komponenten zur Datenerfassung. Abbildung 8 zeigt das fertig aufgebaute Testaggregat, als Teil der Testanlage. Die Testanlage diente als Plattform für die sukzessive Erweiterung mit den in den nachfolgenden Arbeitspaketen teilweise parallel, teilweise nachfolgend durchgeführten Teilentwicklungen. Abbildung 8 zeigt das Testaggregat, in das die Ergebnisse der Arbeitspakete 5, 6 und 7 bereits teilweise einfließen.



Abbildung 8: Fotografie des Testaggregats

Die Anlage wurde in Betrieb genommen und ihre Funktionalität in den durchgeführten Testuntersuchungen nachgewiesen.

#### **AP 5: Einbindung in die bestehende Infrastruktur zur Kühlung der Aggregatkomponenten**

##### **IST METZ**

Vorbereitend wurden thermische und fluidische Berechnungen durchgeführt und in umfangreichen Simulationen die thermischen Gegebenheiten analysiert. Es wurden Simulationen für luft- und wassergekühlte Aggregatkomponenten durchgeführt. Die nachfolgenden Abbildungen 9 bis 11 zeigen exemplarisch einige der erhaltenen Simulationsergebnisse.

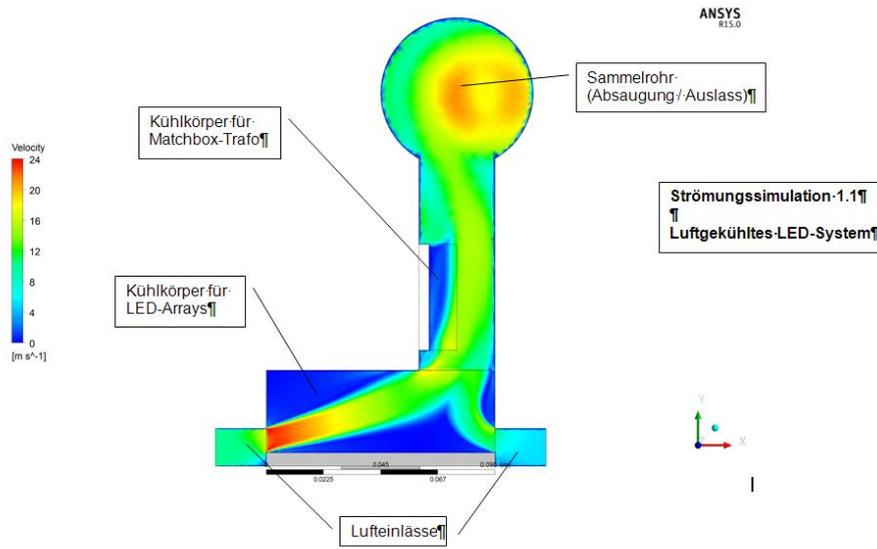


Abbildung 9: Strömungssimulation der Luftkühlung

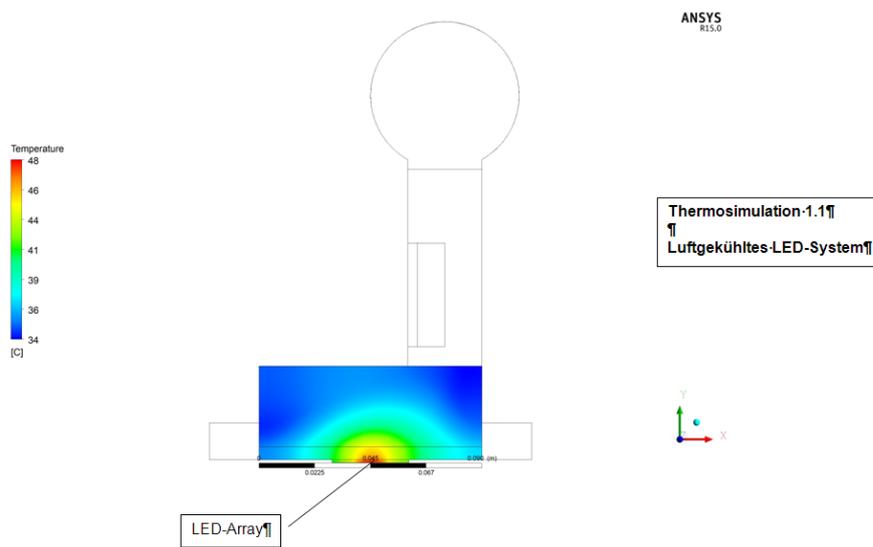


Abbildung 10: Thermosimulation Luftkühlung

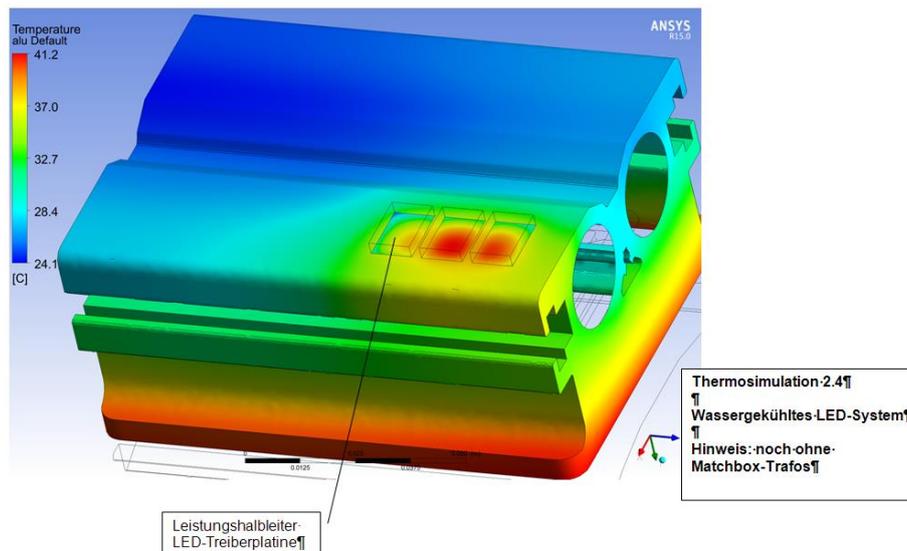


Abbildung 11: Thermosimulation der Wasserkühlung

Nachfolgend wurden die theoretischen Entwicklungsergebnisse hardwareseitig weiterentwickelt und umgesetzt. Die Einbindung in die bestehende Kühlungsinfrastruktur von Aggregatkomponenten verlief erfolgreich. Nachfolgende Abbildung 12 zeigt eine Fotografie bzw. ein 3D-CAD-Modell der in das Testaggregat integrierten Matchbox. In der nachfolgenden Abbildung 12 sind die modularen Matchbox-Einheiten (1 je LED-Modul bzw. –Array) bei geöffneter Gehäuseseitenwand zu erkennen.

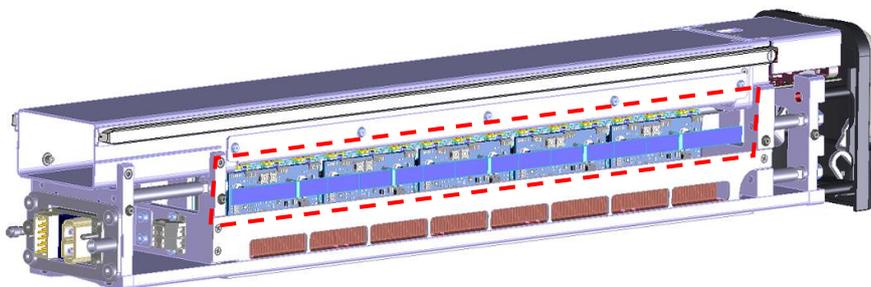


Abbildung 12: 3D-CAD-Modell der in das Testaggregat integrierten Matchbox-Einheiten

## eta plus

In diesem Arbeitspaket beteiligte sich eta plus kontinuierlich durch die Beistellung von Wärme- und Leistungsbilanzen der entwickelten Elektronikschaltungen.

## AP 6: Räumliche Integration in bestehende Anlagenkomponenten

### IST METZ

Die durchgeführten Entwicklungsarbeiten umfassten konstruktive Anpassungen zur Integration der von eta plus entwickelten Elektronikkomponenten in bestehende Gehäuselösungen

für luft- und wassergekühlte Aggregate. Abbildung 13 zeigt exemplarisch Konstruktionszeichnungen der Aggregate im Schnitt.

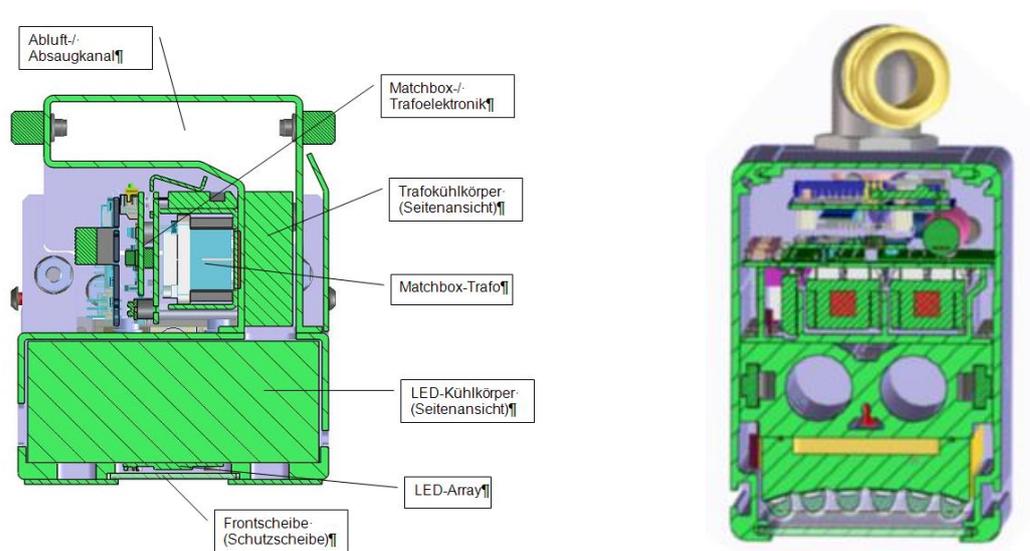


Abbildung 13: Links: CAD-Zeichnung (Schnitt) des luftgekühlten Aggregates.

Rechts: CAD-Zeichnung (Schnitt) des wassergekühlten Aggregates.

In räumlich großzügig ausgelegten Gehäusegeometrien ließen sich die beim Projektpartner eta plus zunächst entwickelten Elektronikkomponenten problemlos integrieren. Jedoch zeigte sich, dass die Bauhöhe der Matchbox-Komponenten in ihrer ersten Form noch zu hoch war, um in kompakter gebaute Aggregatgehäuse integriert werden zu können. Daher wurde die Elektronik beim Projektpartner eta plus in einem weiteren Entwicklungsschritt nochmals kompaktiert.

### eta plus

An diesem Arbeitspaket beteiligte sich eta plus durch spezielle Redesigns der Elektronikplatinen, um nicht veränderliche räumliche Gegebenheiten in den Gehäusen zu kompensieren und so einen möglichst kompakten Aufbau zu gewährleisten. Es wurden zwei unterschiedliche Matchbox-Elektroniken, jeweils für luft- und wassergekühlte Aggregate entwickelt. Diese weisen unterschiedliche Leistungsmerkmale und auch speziell angepasste Bauformen auf.

Es fanden Arbeiten zur Kompaktierung der Elektronikplatinen statt, die schlussendlich eine Integration der Komponenten, auch in kritische Gehäusegeometrien ermöglichten. Abbildung 14 zeigt eine Fotografie der kompaktierten Elektronikkomponenten. Die wichtigsten im Verlauf dieses Arbeitspaketes überwundenen Herausforderungen bestanden in:

- Verkleinerung des Bauraumes
- Anpassung der elektrischen Parameter an optimiertes LED-Layout
- Reduzierung der Verlustleistung

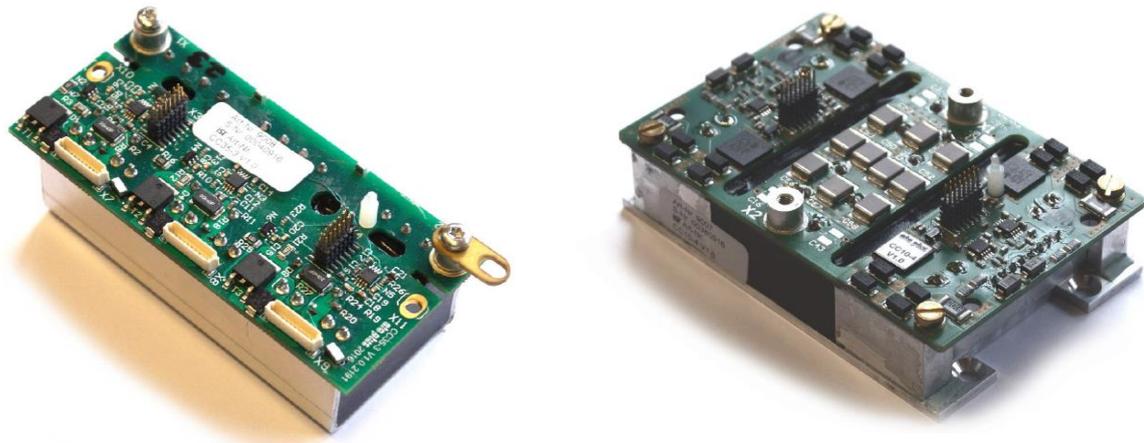


Abbildung 14: Links: Foto der Elektronikbaugruppe für luftgekühlte Aggregate.

Rechts: Foto der Elektronikbaugruppe für wassergekühlte Aggregate.

## AP 7: Entwicklung der elektronischen, mechanischen und fluidischen Schnittstellen

### IST METZ:

In diesem Arbeitspaket wurden bei IST METZ die mechanischen und fluidischen Kopplungen, jeweils für luft- und für wassergekühlte Aggregate entwickelt, design, konstruiert und gefertigt. Dabei war volle Kompatibilität zu bestehenden Versorgungsperipherielösungen zu gewährleisten.

Die nachfolgende Abbildung 15 (links) zeigt Fotografien der mechanischen und fluidischen Schnittstellen des luftgekühlten Aggregates. Ebenfalls sind die elektrischen Versorgungs- (zweipoliges Steckermodul) und Steuerungsschnittstellen (17-poliges Steckermodul), die Kühlkanäle zur Wärmeabfuhr der LED-Arrays und der Matchbox-Einheiten zu sehen.



Abbildung 15: Links: Foto der Schnittstellen des luftgekühlten Aggregates

Rechts: Foto der elektrischen Schnittstelle des wassergekühlten Aggregates.

**eta plus:**

In diesem Arbeitspaket wurden bei eta plus die Signalpegel und Kontrollschwellwerte, jeweils für luft- und wassergekühlte Aggregate ausgelegt und festgelegt. Darauf basierend wurde eine elektronische Schnittstelle für das Projekt entwickelt, deren Blockdiagramm in Abbildung 16 dargestellt ist. Diese ist in der gezeigten Architektur universell für beide Aggregattypen einsetzbar.

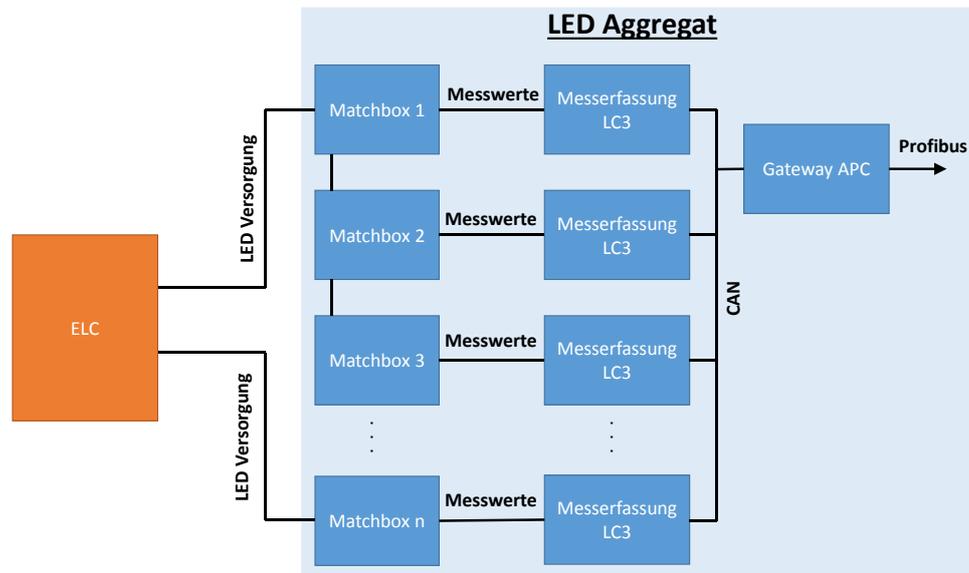


Abbildung 16: Blockdiagramm der elektronischen Schnittstelle

**AP 8: Entwicklung der Algorithmen zur Signalvorverarbeitung und der Signalverarbeitung****IST METZ:**

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden bei IST METZ Anforderungsdefinitionen durchgeführt und an eta plus übergeben. Darüber hinaus wurde die Stromregelung über die SPS-Steuerung umgesetzt. Die prinzipielle Steuerungsübersicht ist in Abbildung 17 gezeigt.

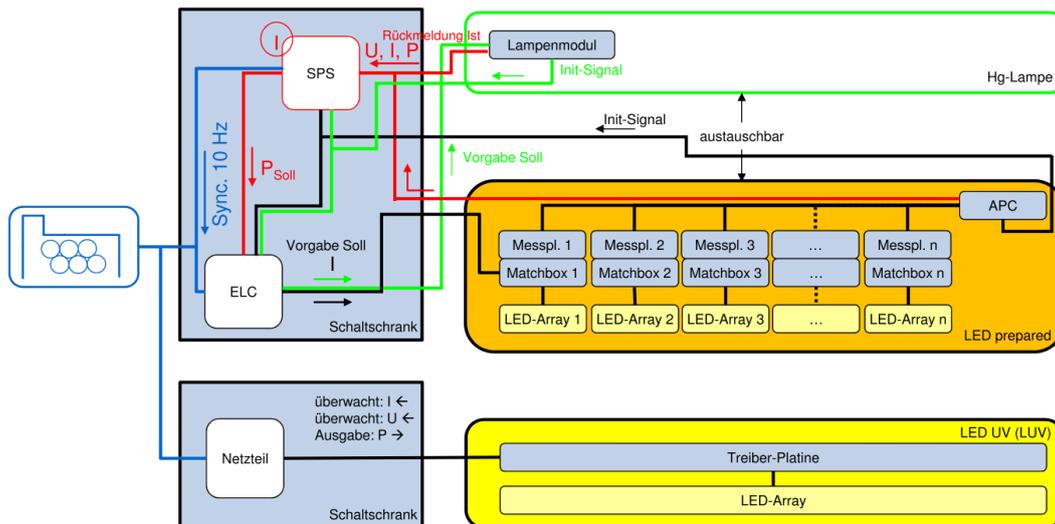


Abbildung 17: Übersicht des realisierten Steuerungsablaufes

Die vorwiegend bei eta plus entwickelten Algorithmen für die mikrocontrollerbasierte Signalvor- und Signalverarbeitung wurden von IST METZ funktional geprüft und abschließend als einsetzbar betrachtet.

#### eta plus:

Zu diesem Arbeitspaket wurden bei eta plus auf Basis der von IST METZ getätigten Anforderungsdefinitionen Algorithmen zur Stromregelung durch die mikrocontrollerbasierte Signalverarbeitungselektronik entwickelt und implementiert. Damit durchgeführte Funktionstests verliefen erfolgreich. Erreicht wurden die folgenden Funktionalitäten zur Signalvor- und Signalverarbeitung:

- Erfassung von Strom, Spannung und Leistung jedes LED-Arrays
- Stundenzähler für die einzelnen LED-Arrays
- Temperaturerfassung der LED-Arrays
- Aktualisierung der Daten im unteren Millisekunden-Bereich
- Parametrierbare Strom- und Spannungsüberwachung
- Auswertung und Verarbeitung des Synchronisierungssignals mit der Druckmaschine

#### AP 9 Entwicklung der SPS-Software zur automatischen Erkennung des Typs der angeschlossenen UV-Strahlungsquelle sowie der Einstellung der elektronischen Steuerung und Überwachung

##### IST METZ:

In diesem Arbeitspaket wurde ein über den Profibus ablaufender Erkennungsprozess für konventionelle UV-Aggregate und UV-LED-Aggregate entwickelt. Dabei ist im Falle der UV-LED-Aggregate das Gateway, im Falle konventioneller UV-Aggregate das Lampenmodul der jeweilige Profibus-Teilnehmer. Die weitere, automatische Unterscheidung verschiedener UV-LED-

Module und UV-Gasentladungslampen ist in den entwickelten Erkennungsprozess mit eingebettet. Je nach erkanntem Aggregatgrundtyp und spezieller Ausgestaltung der UV-Quelle (LED oder Gasentladungslampe) wurden Routinen für die SPS-Steuerung zur Regelung der folgenden Punkte realisiert:

- Steuerungsparameter
- Einstellbereiche
- Überwachungsparameter
- Bedienungs- bzw. Menüstrukturen

#### **eta plus:**

An diesem Arbeitspaket beteiligte eta plus sich in Form von Anforderungsdefinitionen, die an IST METZ übergeben wurden sowie Kompatibilitätsuntersuchungen der bei IST METZ entwickelten Lösungen zur Matchbox-Elektronik. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte die volle Kompatibilität sichergestellt werden.

### **AP 10 Entwicklung standardisierter Schnittstellen zur Überführung der Technologie auf weitere UV-Bestrahlungssysteme**

#### **IST METZ:**

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die elektrischen Schnittstellen der UV-Aggregate zur Steuerung / Versorgung entwickelt, die mit den Schnittstellen der bereits vorhandenen konventionellen UV-Aggregate voll kompatibel sein müssen. Dieses Ziel wurde sowohl für die luft- als auch für die wassergekühlte Ausführung vollständig erreicht. Daraus folgt prinzipiell die zukünftige Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf alle abgeleiteten Strahlervarianten. Das angestrebte Projektziel einer vollständigen Kompatibilität auf beliebige Aggregat- und UV-Strahlertypen, als elementarer Bestandteil der Hot-Swap-Idee, konnte somit erfolgreich realisiert werden; die vorgesehene Kompatibilität wird durch eine typenspezifische Änderung der Steckerkonfiguration (siehe Abb. 15) ermöglicht.

#### **eta plus:**

In diesem Arbeitspaket begleitete eta plus die FE-Arbeiten bei IST-Metz. Die elektrische Schnittstelle der bei eta plus entwickelten Steuerungs- und Anpasselektronik bleibt variantenunabhängig immer identisch. Damit konnte das vorgesehene Ziel vollständiger Kompatibilität auch vonseiten der eta plus vollumfänglich erreicht werden.

### **AP 11 Aufbau Prototypsysteme**

#### **IST METZ, eta plus:**

Das Arbeitspaket wurde in Form des Aufbaus eines luftgekühlten und eines wassergekühlten Prototypensystems bearbeitet. Darin flossen die in den vorangehenden Arbeitspaketen erzielten Ergebnisse vollständig mit ein. Abbildung 18 zeigt die aufgebauten Prototypen (mit LED-

basierter UV-Quelle) als Fotografien. Der Aufbau der prototypischen Systeme wurde vorwiegend bei IST METZ bearbeitet, während eta plus die Integration der Zusatzelektroniken übernahm und begleitete.

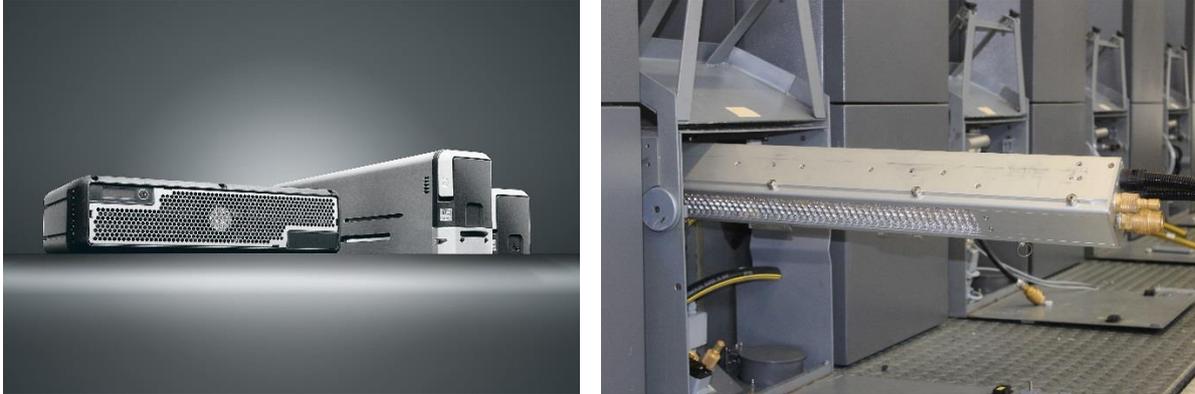


Abbildung 18: Links: Foto der des luftgekühlten Aggregates (mit Vorschaltgerät)  
Rechts: Foto des wassergekühlten Aggregates (in Einschubposition Druckmaschine)

Damit können zukünftig zwei Leistungsklassen und die maximale Bandbreite an Anwendungen abgedeckt werden. Wie in den vorherigen Kapiteln erwähnt sind beide Prototypen in der Lage über die identische Peripherie sowohl UV-LED-Aggregate, als auch konventionelle UV-Strahler-Aggregate zu betreiben. Innerhalb einer Maschine können damit beide Technologien gleichzeitig genutzt werden. Die entwickelte Logik erkennt automatisch das eingesetzte Aggregat und schaltet die Bedienung entsprechend um.

Die wichtigsten technischen Daten des luftgekühlten und des wassergekühlten Prototypen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Technische Daten der Prototypen

	<i>UV-Lampe luftgekühlt</i>	<i>UV-LED luftgekühlt</i>	<i>UV-Lampe wassergekühlt</i>	<i>UV-LED wassergekühlt</i>
<i>Leistung</i>	120 - 145 W/cm	55 W/cm	200 W/cm	75 W/cm
<i>Elektrische Versorgung</i>	Elektronisches Vorschaltgerät	Elektronisches Vorschaltgerät	Elektronisches Vorschaltgerät	Elektronisches Vorschaltgerät
<i>Steuerung</i>	Automatische Erkennung	Automatische Erkennung	Automatische Erkennung	Automatische Erkennung
<i>Hochlaufzeit</i>	40 s	1 s	80 s	1 s
<i>Spektrum</i>	Hg, Fe, Galn	365, 375, 385, 395, 405 nm	Hg, Fe, Galn	365, 375, 385, 395, 405 nm
<i>Formatschaltung</i>	nein	ja	nein	ja
<i>Hauptanwendung</i>	Etikettendruck	Etikettendruck	Bogendruck	Bogendruck

Die Prototypen stehen für die sich nun anschließende Industrialisierungsphase zur Verfügung.

**AP 12 Projektdokumentation****IST METZ, eta plus:**

Die im Rahmen des Forschungsprojektes entstandenen Daten werden nachhaltig und im Sinne einer guten wissenschaftlichen Praxis fachgerecht gesichert. Die dokumentierten Datensätze umfassen sämtliche vorgenommenen Spezifikationen, Entwicklungsergebnisse, Testumgebungen, Versuchsbedingungen und Testergebnisse.

## Fazit

Die im vorliegenden Projekt verfolgte Zielstellung der Entwicklung einer einheitlichen Versorgungs- und Ansteuerungselektronik für konventionelle und LED-basierte UV-Aggregate zur Vorbereitung und Beschleunigung der Umrüstung auf umweltschonende LED-Technologie im Bereich der industriellen Lackhärtung (LEDprepared) wurde vollständig erreicht.

Am Ende des Projektes stehen Prototypen eines luftgekühlten und eines wassergekühlten UV-Aggregates zur Verfügung, die einen Betrieb von konventionellen UV-Gasentladungsstrahlern oder von UV-LED-Modulen unter Nutzung der identischen Steuerungs- und Versorgungselektronik ermöglichen. Damit können zukünftig zwei sehr unterschiedliche UV-Strahlungsquellen und eine maximale Bandbreite an Anwendungen abgedeckt werden. Innerhalb einer Maschine können also auch beide Technologien gleichzeitig genutzt werden. Die entwickelte Logik erkennt automatisch das eingesetzte Aggregat und schaltet die Bedienung und Steuerung entsprechend um.

Auf diese Weise wird eine derzeit noch bestehende Markteintrittsbarriere für die UV-LED-Technologie in Kürze dauerhaft überwunden; dies wird dazu beitragen die UV-LED-Technologie stärker am Markt zu etablieren und die energetischen Einsparpotenziale der UV-LED-Technologie weiter zu erschließen.

Unter Heranziehung der nachfolgenden Annahmen\* sowie der potenziellen Verkaufszahlen kann eine Gesamtenergieeinsparung von 62 %, in Summe von 10.866.447 kWh, was beim deutschen Energiemix einer Einsparung von ca. 5.500 t CO<sub>2</sub> entspricht, ab dem Jahr 2021 durch die Projektergebnisse dauerhaft erschlossen werden.

\*Annahmen für die Berechnung:

- Energieeinsparung LED-UV gegenüber Hg-UV bleibt auf zukünftig auf dem aktuell erreichbaren Niveau
- 1-Schichtbetrieb (1.760 h/a)
- Bogenpause 30 % (nur bei wassergekühlten Aggregaten)
- 20 % Standby-Zeit (LED aus, Hg-Aggregat mit Standby-Leistung)
- 30 % Standby-Leistung von Hg-Aggregaten gegenüber Standby-Leistung 0 W bei abgeschalteten LED