

# **Food-to-Food-Recycling von PET mittels Prozess-Laser-Fluoreszenz und Prozess-Raman-Spektroskopie**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 25507 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

März 2009

## **Antragsteller:**

### **UNISENSOR Sensorsysteme GmbH**

Prof. Dr.-Ing. Gunther Krieg

Am Sandfeld 11

76149 Karlsruhe

Tel.: 0721 / 97884-0

Fax: 0721 / 97884-44

E-Mail: [gkrieg@unisensor.de](mailto:gkrieg@unisensor.de)

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



<b>Az</b>	<b>25507-21/2</b>	<b>Referat</b>	<b>Fördersumme</b>	<b>203.500,00</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Food-to-Food-Recycling von PET mittels Prozess-Laser-Fluoreszenz und Prozess-Raman-Spektroskopie</b>		
<b>Stichworte</b>				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>18 Monate</b>	<b>11.06.07</b>	<b>10.12.2008</b>		
Zwischenberichte				
<b>Bewilligungsempfänger</b>		UNISENSOR Sensorensysteme GmbH Am Sandfeld 11 76149 Karlsruhe	Tel	0163-9788414
			Fax	0721-9788444
			Projektleitung	
			Prof. Dr.-Ing. Gunther Krieg	
			Bearbeiter	
			Prof. Dr.-Ing. Gunther Krieg	
<b>Kooperationspartner</b>				
<p><b><i>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</i></b></p> <p>Der zunehmende Einsatz von PET-Kunststoffen für Getränkeflaschen und Lebensmittelbehälter bei gleichzeitig starkem Rückgang der Verwendung von Glasflaschen hat zu einer enormen Steigerung des Verbrauchs von Rohöl geführt. Eine Mehrfachverwendung von Kunststoffen im Lebensmittelbereich durch Recyclingprozesse ist daher unvermeidbar. Das Vorhaben umfasst daher die Entwicklung eines Mess- und Sortiersystems zur Erkennung und Ausscheidung von <u>Fremdkunststoffen</u> z.B. PVC, Nylon, etc., <u>Fremdmaterialien</u> z.B. Silikon, Holz, Leimreste, Metall, Papier, Glas etc., <u>Kontaminationen</u> z.B. Benzin, Diesel, Altöl etc. sowie <u>fremdfarbiges PET</u>.</p> <p><b><i>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</i></b></p> <p>Gegenstand der Entwicklung ist das Gesamtsystem bestehend aus Laser-Stoffanalyse-Flake-Sorter, Laserscanner und Multiwellenlängen-Laser und gliedert sich in folgende Teilprojekte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Optischer Aufbau</li> <li>- PET-Flake-Sorter</li> <li>- Felderprobung</li> </ul> <p>Zur Ermittlung der Stoffeigenschaften werden die physikalischen Prinzipien der Laser-Fluoreszenz und Laser-Raman-Spektroskopie eingesetzt. Projektziel ist die Sortierung von 2 Tonnen PET pro Stunde.</p>				
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***

Die in der Zielsetzung definierten Teilaufgaben wurden ausnahmslos erfüllt. Dies gilt sowohl für den PET-Flake-Sorter, den optischen Aufbau, die Mikroelektronik, als auch die Software und insbesondere auch für das Lasersystem. Die Felderprobung fand inzwischen mit Prototyp- bzw. Seriensystemen an den Standorten Frauenfeld/Schweiz, Wien/Österreich, London/Großbritannien sowie Spartanburg/USA statt. Daraus resultierende Optimierungen sämtlicher Teilmodule sind bereits in das inzwischen überarbeitete Seriensystem eingeflossen. Weitere wünschenswerte Verbesserungen liegen insbesondere in der Steigerung der Laser-Langzeitstabilität, der Erhöhung der Sensitivität bezüglich der Detektion von nicht fluoreszierenden bzw. Raman-inaktiven Fremdstoffen und der Senkung der Material- und der Produktionskosten bei der Serienfertigung. Als kontinuierlich anstehende Aufgabenstellung hat sich die Applikation des Systems auf verschiedenste PET-Recycling-Frachten im Vorfeld von Verkaufsverhandlungen herausgestellt, da sich gezeigt hat, dass die stofflichen Zusammensetzungen dieser Frachten sich von Kunde zu Kunde stark unterscheiden. Trotzdem wurde in bisher allen Anwendungsfällen eine Sortierleistung von 2 Tonnen PET pro Stunde mit der jeweils spezifizierten Qualität erzielt.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Aus Gründen des Knowhow-Schutzes sowie bedingt durch die starke Projektbelastung der beteiligten Spezialisten musste die Öffentlichkeitsarbeit mit geringer Priorität behandelt werden.

## ***Fazit***

Für das Food-to-Food-Recycling von PET befindet sich das System in der Phase der Serienproduktion und der internationalen Vermarktung. Wegen des zur Zeit niedrigen Ölpreises wird diese Phase längere Zeit in Anspruch nehmen als ursprünglich erwartet. Um diesen Effekt weitgehend zu kompensieren, laufen bereits intensive Anstrengungen um das System in weiteren Märkten, z.B. in der Nahrungsmittelbranche, einzusetzen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	1
<b>Einleitung</b> .....	2
<b>Hauptteil</b> .....	3
Gesamtsystem zum Food-to-Food-Recycling von PET mittels Prozess-Laser-Fluoreszenz und Prozess-Raman-Spektroskopie .....	3
- Multilinen Laser-System .....	4
- Laserscanner .....	4
- Anordnung und Funktionen der Einzelmodule .....	5
- Flake-Sortierung durch ein Düsen-Array .....	8
Laser-Entwicklung .....	10
- Das Lasersystem.....	10
- Erzeugung der sichtbaren Laserstrahlung .....	10
- Erzeugung der ultravioletten Laserstrahlung.....	10
- Mechanik.....	11
- Elektronik .....	11
- Optik.....	11
- Zusammenfassung und Ausblick .....	12
<b>Danksagung</b> .....	13
<b>Literatur</b> .....	13

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Frontalansicht des Gesamtsystems mit Flake-Silo, Vibrationsförderer, Fallschächten und Sortiereinheiten.....	3
Abb. 2	Rückseite der Gesamtanlage bei abgenommenen Abdeckungen zwecks Erläuterung der Anordnung der Einzelkomponenten des Systems .....	5
Abb. 3	Anordnung der elektrischen Module im Schaltschrank.....	7
Abb. 4	Pneumatik-System zur pulsformigen Betätigung von Ventilen in Ventil-Arrays zur Erzeugung von Überschall-Luftimpulsen in nachgeschalteten Überschalldüsen.....	8
Abb. 5	Flake-Ausblaseinheit zur Erzeugung von Überschall-Luftstrahlen zwecks Aussortierung von Fremdpartikeln aus dem Flakestrom .....	9
Abb. 6	Bild des Gesamtsystems mit dem Laserkopf und dem UV-Modul .....	11

## Zusammenfassung

Im Rahmen einer dreiphasigen Entwicklung und Felderprobung wurde ein neuartiges patentiertes bzw. zum Patent angemeldetes Verfahren zur Online-Qualitätskontrolle und Sortierung von PET-Flakes zur Realisierung des „Bottle-to-Bottle PET-Recyclings“ zur Serienreife gebracht. Die wichtigsten Ziele bzw. Arbeitspakete waren insbesondere:

- Die Entwicklung eines neuartigen Flake-Sorters mit erstmals kegelförmiger Anordnung der Flake-Führungskanäle zwecks Erzielung von Laser-Foki auf allen PET-Flakes unabhängig von der jeweiligen Transportbahn.
- Entwicklung von Überschall-Düsenarrays und -Düsenformen zum sicheren pneumatischen Ausstoß von Fremdpartikeln, Fremdstoffen, Fremdfarben und kontaminierten Flakes.
- Entwicklung eines langzeitstabilen, prozessgeeigneten Multiwellenlängen-Lasersystems mit Strahlungsleistungen von jeweils mehreren Watt im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich bei Repetitionsraten oberhalb von 50 MHz.
- Realisierung einer Sensorsignal-A/D-Wandlung unter direkter Ankopplung d.h. ohne Einsatz von Kabeln an das Sensor-Array durch Entwicklung einer FPGA-Ablaufsteuerung einschließlich der erforderlichen Kontrollfunktionen.
- Entwicklung und Realisierung eines PMC-Schnittstellenmoduls mit differentiellen Leistungstreibern, galvanischen Entkopplungen sowie mikroelektronischen Pegelanpassungen zur Ansteuerung, Statuskontrolle und für die Aktorik der Ventil-Arrays der Überschall-Düsen unter Einsatz von FPGA-Technologie.
- Entwicklung eines vakuumdichten Gesamtgehäuses für die optische Strahlführung als Staubschutz und zur Eliminierung der Luftreibung für das Hochgeschwindigkeits-Polygon-Spiegelrad.

Die erzielten Ergebnisse haben bewiesen, dass sämtliche o.g. Teilprojekte mit Erfolg, wenngleich mit mehreren Korrekturen und Nachoptimierungen, durchgeführt werden konnten. Der angeschlossene Feldtest an der Recycling-Anlage der PET to PET GmbH in Müllendorf/Österreich konnte diese Funktionalitäten nach weiteren Optimierungen voll bestätigen. Als positive Folge haben die Unternehmen Closed-Loop/London-UK und NURRC-Spartanburg/USA bereits Systeme geordert. Der Antragsteller hat die beiden Anlagen inzwischen geliefert und befindet sich in der Phase der Feldoptimierung. Das weitere Vorgehen konzentriert sich auf den Verkauf weiterer Systeme insbesondere in bestehende Recycling-Anlagen in Holland, Frankreich, Mexiko etc.

## Einleitung

### **Sortiersystem eröffnet neue Möglichkeiten im Bereich Bottle-to-Bottle-Recycling von PET-Flakes**

Der Kunststoff Polyethylenterephthalat – kurz PET – wird gegenwärtig weltweit im großen Umfang (rund 7 Mio. t/a) zu Getränkeflaschen verarbeitet. Bottle-to-Bottle-Recyclingverfahren wie z.B. das NURRC\*-Verfahren, welche mittlerweile weltweit etabliert sind, schaffen die Voraussetzung für das PET-Recycling in lebensmitteltauglicher Qualität. Eine Herausforderung stellt jedoch die Aussortierung von Materialien dar, die mit herkömmlichen Methoden nicht oder nur mit hohem Aufwand ausgesondert werden können. Bei einem PET-Gutstrom sind dies unter anderem Fremdkunststoffe (wie z.B. PVC, PC, Nylon), Fremdmaterialien (wie z.B. Silikon, Papier, Leimreste) und in Lebensmittelverpackungen enthaltene Barrierestoffe. Der Firma Unisensor Sensorsysteme GmbH (Karlsruhe) ist es mit der Entwicklung des High-Tech-Systems Powersort 200 gelungen, diese Lücke zu schließen. Für den Bereich des Bottle-to-Bottle-Recycling von PET-Flakes und -Granulat eröffnet es völlig neue Möglichkeiten. Das System sortiert in einem einzigen Verfahrensschritt Fremdkunststoffe, Fremdmaterialien, Flakes/Granulate mit Barrierestoffen sowie mit Fremdstoffen kontaminierte und farbige Flakes bzw. Granulate aus dem Gutstrom aus. Powersort 200 basiert auf einem patentierten, auf Laser-Spektroskopie beruhenden Messverfahren. Letzteres erkennt Störstoffe anhand ihres optischen Spektrums, das heißt ihres physikalischen "Fingerabdrucks".

\* NURRC – New United Resource Recovery Corporation/USA

((BU))

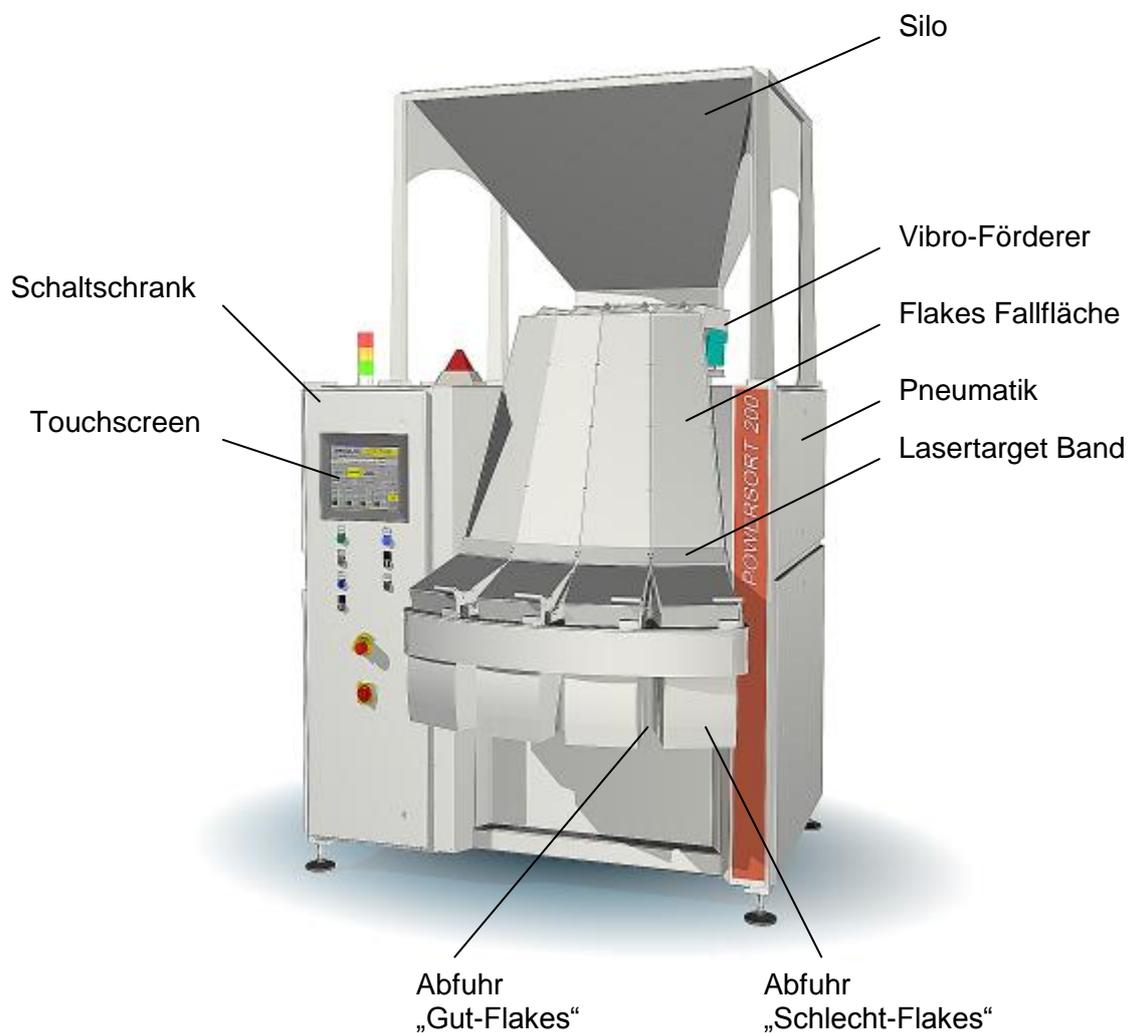
K:\ZUK\Prints\newsletter\2009\09-01\Material\Bilder\ pet recycling

POWERSORT 200, ein auf Laser-Spektroskopie basierendes Messverfahren, besitzt mit rund 2,4 t/h eine hohe Sortierkapazität und optimiert das Recycling von PET.

## Hauptteil

### Gesamtsystem zum Food-to-Food-Recycling von PET mittels Prozess-Laser-Fluoreszenz und Prozess-Raman-Spektroskopie

Die in Abb. 1 dargestellte Gesamtmaschine besteht aus dem von der Frontseite gezeigten Sorter, welcher die Flakes aus einem Silo über Schwerkraft und einem Vibrationsförderer längs auf einem Kegelmantel angeordneten Fallrinnen nach unten gleiten lässt und am tiefen Ende der schiefen Ebenen vertikal zur Fallrichtung per Luftdüsen-Überschall-Array die Flake-Ströme in „gut“- und „schlecht“-Fraktionen aufteilt. Hinter diesem Flake-Sorter-Modul befinden sich in einem thermostatisierten Gehäuse das Multilinen-Lasersystem, das



**Abb. 1: Frontalansicht des Gesamtsystems mit Flake-Silo, Vibrationsförderer, Fallschächten und Sortiereinheiten**

Laser-Scanner-Modul, die optischen Strahlengänge, das Fluoreszenz-Raman-Spektrometer, die mikroelektronischen Sensorsignale-Erfassungen und -Verarbeitungen sowie die Hard- und Software-Module zur online-Signalverarbeitung bzw. zur Steuerung der Düsen-Aktorik.

Die oben aufgelisteten Subsysteme des Gesamtsystems sind im Folgenden in jeweils separaten Abschnitten detailliert erläutert.

### **Multilinien Laser-System**

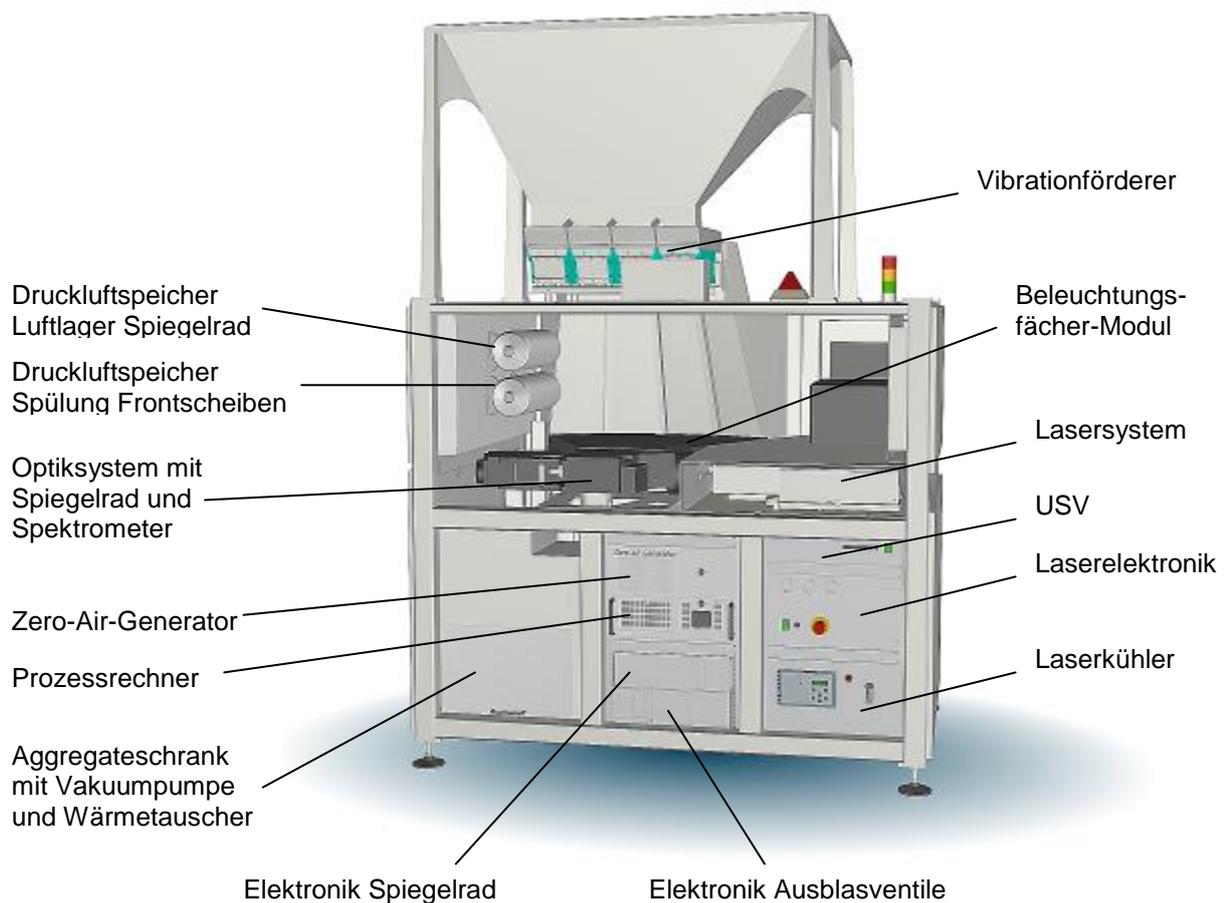
Die aus zwei Lasersystemen bestehende Einheit emittiert kollineare Laserstrahlen im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich. Die jeweilige Laserleistung wird quasikontinuierlich ausgestrahlt.

### **Laserscanner**

Um zu erreichen, dass jedes auf den kegelförmig angeordneten Transportbahnen (Abb. 1) hinableitende Flake mindestens einmal von den kollinearen Laserstrahlen getroffen und dadurch optisch angeregt wird, werden die Teilchen im untersten Teil der Kegelmantelfläche mit einem horizontal oszillierenden Multi-Laserstrahl abgetastet.

## Anordnung und Funktionen der Einzelmodule

Das gesamte optische System bestehend aus Spiegelrad-Modul, Spektrometer, Laser-Beleuchtung ist vakuumdicht ausgeführt und wird über einer Vakuumpumpe im Dauerbetrieb auf einen Enddruck unterhalb 50 mbar gebracht. Zum besseren Verständnis des apparativen Aufbaus zeigt Abb. 2 die Anordnung der einzelnen Komponenten. Das Lasersystem ist vakuumdicht an das Optiksyste m angeflanscht, welches im Frontbereich das Laser-Target-Band erzeugt.



**Abb. 2: Rückseite der Gesamtanlage bei abgenommenen Abdeckungen zwecks Erläuterung der Anordnung der Einzelkomponenten des Systems**

Ein Aggregateschrank enthält die Vakuumpumpe sowie den Wärmetauscher und den Radiallüfter für die Klimatisierung der Innenluft der Maschine. Ein Druckluftspeicher dient der Impuls-Spülung der optischen Frontfenster am Austritt der Laserstrahlungen in den atmosphärischen Bereich der Flake-Transportbahnen, welche durch die Oberfläche des kegelförmigen Fallrinnen-Systems gebildet werden. Dank der Luftspülung der optischen Frontfenster wird weitgehend einer Verschmutzung der Frontfenster durch Staubablagerungen aus dem Recycling-Prozess vorgebeugt. Zur Absicherung der Sensitivität sowie der Selektivität der optischen Flake-Materialanalyse wird von Zeit zu Zeit eine zusätzliche Fensterreinigung durch ein Bürstensystem, welches automatisch nach einem vorgegebenen Abfall der optischen Transmission aktiviert wird, eingeschaltet.

Da das Gesamtsystem auch bei unvorhergesehenen Stromausfällen seine Funktion aufrechterhalten muss und insbesondere Anlaufzeiten in Hard- und Software der Rechnerkomponenten und des Lasers mit Sicherheit ausgeschlossen werden müssen, ist die Stromversorgung für das Gesamtsystem mit einer unterbrechungsfreien Spannungsversorgung (USV) ausgerüstet.

Die Elektronik für die Vibrationsantriebe zum Flake-Transport sowie die Maschinensteuerung (SPS) und die übrigen elektronischen bzw. elektrischen Komponenten sind im Schaltschrank (Fig. 1) hinter dem Touch-Panel integriert. Die serienmäßige Realisierung ist in Abb. 3 dargestellt.



Regler Maschinenklimatisierung

Netzgeräte Kleinspannung  
Für Steuerung und Ausblasventile

Absicherung der Stromkreise

Steuerung Vibroantriebe

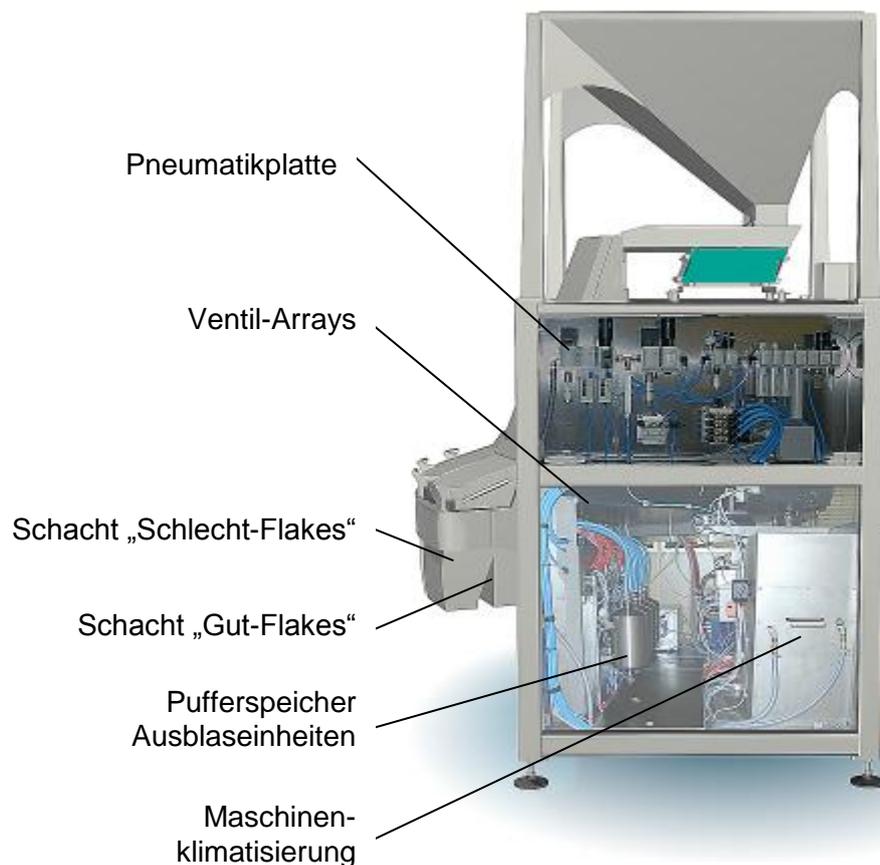
Maschinensteuerung (SPS)



**Abb. 3: Anordnung der elektrischen Module im Schaltschrank**

## Flake-Sortierung durch ein Düsen-Array

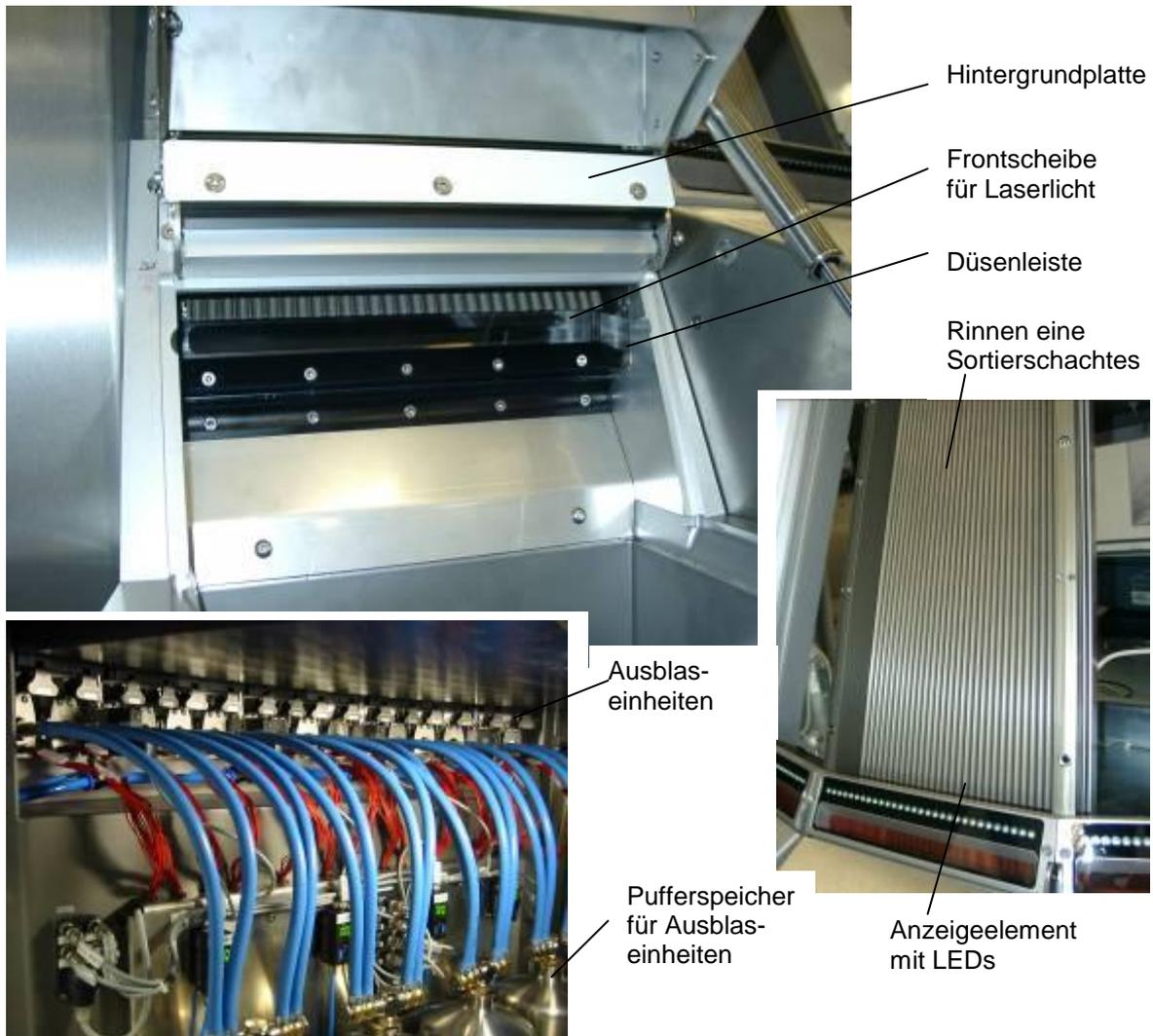
Wenige Zentimeter unterhalb des Laser-Target-Bandes (Abb. 1) innerhalb dessen die optische Anregung der Flakes durch die Laserstrahlen erfolgt, befinden sich in einem parallel dazu stromabwärts angeordneten Band-Schnellschaltventile, denen jeweils eine Überschalldüse nachgeschaltet ist. Sobald im jeweiligen Flakes-Kanal ein kontaminiertes, farbiges oder aus Fremdkunststoff bestehendes Flake detektiert wird, wird eines der Schnellschaltventile aktiviert, so dass ein Überschall-Luftimpuls auf das auszusortierende Flake trifft, letzteres aus seiner ursprünglichen Gleitbahn in eine geänderte Flugbahn ablenkt und es dadurch in den Auslass-Stutzen für „Schlecht-Teile“ gemäß Abb. 4 ablenkt. Die „Gut-Teile“ gleiten auf ihrer ursprünglichen Bahn ohne Ablenkung in den Auslass-Stutzen für „Gut-Teile“ und bilden den PET-Strom, welcher das Material für das Bottle-to-Bottle Recycling liefert.



**Abb. 4: Pneumatik-System zur pulsformigen Betätigung von Ventilen in Ventil-Arrays zur Erzeugung von Überschall-Luftimpulsen in nachgeschalteten Überschalldüsen**

Die Geometrie der Überschalldüsen wurde in intensiven Entwicklungsarbeiten optimiert, um zu erreichen, dass die auszusortierenden Flakes präzise, d.h. möglichst ohne Aussortierung benachbart gleitender „Gut-Flakes“, aus dem PET-Strom in die „Schlecht-Fraktion“ gelangen.

Das gesamte Flake-Ausblasseystem ist zum besseren Verständnis der Funktionen der Einzelmodule detailliert in Abb. 5 dargestellt.



**Abb. 5: Flake-Ausblaseinheit zur Erzeugung von Überschall-Luftstrahlen zwecks Aussortierung von Fremdpartikeln aus dem Flakestrom**

## **Laser-Entwicklung**

Für das Lasersortierverfahren musste ein Lasersystem entwickelt werden, das im sichtbaren und im ultravioletten Spektralbereich emittiert. Für die Anwendung ist es wichtig, dass die beiden Strahlen exakt übereinander liegen und in einem definierten Abstand zum Strahlausgang des Lasers die Strahldurchmesser der beiden Teilstrahlen nahezu gleich sind. Der Ansatz der im Rahmen dieser Entwicklung verfolgt wurde, ist die nichtlineare Frequenzkonversion eines modengekoppelten Infrarotlasers. Die Methode der Frequenzkonversion in nichtlinearen Kristallen ist im Allgemeinen ein etabliertes und im Forschungs- und Entwicklungsbereich oft verwendetes Verfahren [1, 3]. Im industriellen Umfeld ist allerdings nur die Frequenzkonversion in den sichtbaren Spektralbereich weit verbreitet [4, 5].

## **Das Lasersystem**

Zunächst wurde ein leistungsstarker Oszillator aufgebaut, der bei einer Ausgangsleistung von mehr als 4W ultrakurze Impulse mit einer Impulsdauer von ca. 7ps emittiert. Die Repetitionsrate beträgt 50MHz. In einer Verstärkerstufe wurde dann die Ausgangsleistung der infraroten Laserstrahlung auf bis zu 13,5W erhöht.

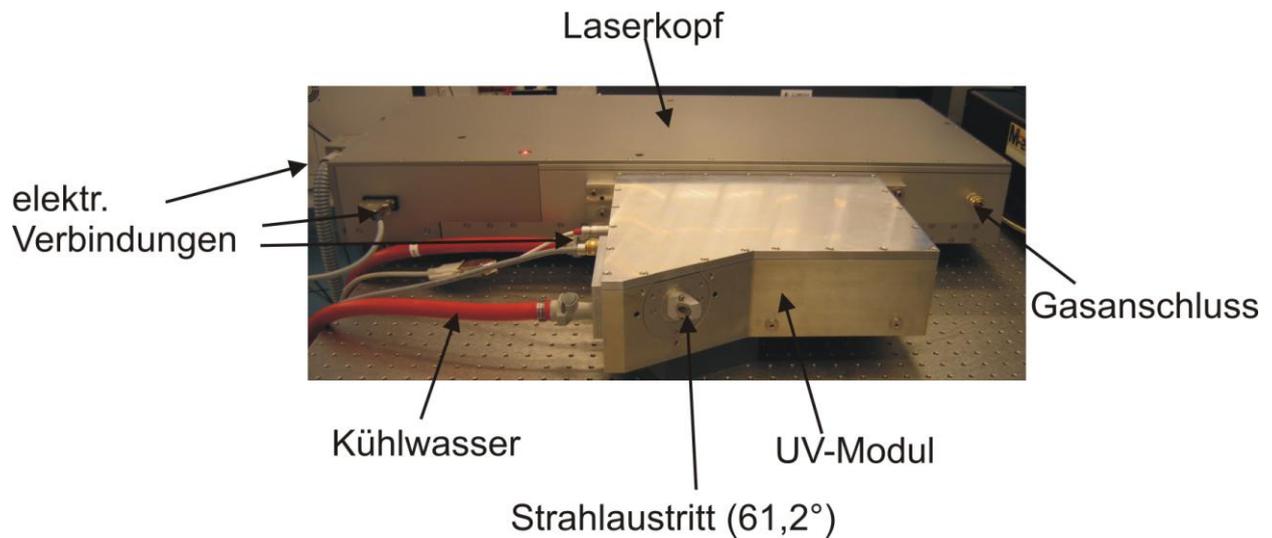
## **Erzeugung der sichtbaren Laserstrahlung**

Sichtbare Laserstrahlung lässt sich durch Frequenzverdopplung (einem Spezialfall der nichtlinearen Frequenzkonversion) der infraroten Strahlung des Lasers in einem nichtlinearen Kristall erzeugen. Für eine detaillierte Beschreibung der Wirkmechanismen der Frequenzkonversion in nichtlinearen Kristallen verweisen wir auf [1]. In [2] finden sich Informationen speziell zur Erzeugung von ultravioletter Laserstrahlung.

## **Erzeugung der ultravioletten Laserstrahlung**

Die ultraviolette Laserstrahlung kann nun durch einen weiteren Frequenzverdopplungsprozess erzeugt werden.

In Abb. 6 sieht man ein Bild des Gesamtaufbaus mit dem Laserkopf und dem angeflanschten UV-Modul. Das gesamte Lasersystem ist wassergekühlt, um es weitestgehend unabhängig von äußeren Temperaturschwankungen zu halten. Dazu wurden die aus jeweils einem Aluminiumblock gefrästen Elemente (Laserkopf, UV-Modul) mit Kühlkanälen versehen.



**Abb. 6: Bild des Gesamtsystems mit dem Laserkopf und dem UV-Modul**

## **Mechanik**

Gerade der Einsatz von Ölen bei der Herstellung der Mechanik-Komponenten ist ein grundsätzliches Problem. Oftmals lassen sie sich nur durch den Einsatz von Lösungsmittel entfernen. Die Lösungsmittel enthalten aber in der Regel selbst wieder Kohlenwasserstoffe. Wenn auch leicht flüchtig, so besteht doch die Gefahr, dass es zu Rückständen auf den mechanischen Bauteilen kommt. Es wurde daher ein mehrstufiger Reinigungsprozess für die mechanischen Komponenten benutzt. Dieser wurde für die UV-Komponenten nochmals speziell angepasst. Zusätzlich werden noch alle Spiegelhalter zerlegt, durchlaufen den Reinigungsprozess und werden dann im Reinraum wieder zusammengebaut.

## **Elektronik**

Bei den elektronischen Komponenten werden ausschließlich Kabel mit Teflonummantelung verwendet. Alle Steckverbinder sind vakuumkompatibel. Der Kabelstrang wird vor dem Einbau einem dafür angepassten Reinigungsprozess unterworfen und danach erst im Reinraum eingebaut.

## **Optik**

Der Aufwand bei optischen Komponenten ist komplizierter als bei den mechanischen Systemen. Da sie direkt mit der UV-Strahlung in Wechselwirkung treten, muss penibel auf Sauberkeit geachtet werden. Eine Reinigung der Oberflächen mit Lösungsmitteln (Isopropanol, Aceton) ist nicht möglich. Deswegen wurde mit den Optik-Herstellern vereinbart, dass die optischen Komponenten unter Reinraumbedingungen verpackt und die Behältnisse versiegelt werden, so dass Kontaminationen durch den Transport auszuschließen sind. Die Kristalle haben in der Verpackung noch zusätzlich Trockenmittel. Vor dem Einbau werden die Optik-Komponenten einzeln unter dem Mikroskop inspiziert und gegebenenfalls mit sauberer Druckluft Staubpartikel entfernt.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

Ziel des Laser-Entwicklungs-Projekts waren Untersuchungen zur Erzeugung von sichtbarer und ultravioletter Laserstrahlung zum industriellen Einsatz in einer Recyclinganlage.

Die Erzeugung der beiden Wellenlängen ist prinzipiell bekannter Stand der Technik. Die Herausforderung lag darin, diese Technik in ein industriefestes System zu packen, das weitestgehend wartungsfrei läuft.

Dies konnte in einem neuartigen Lasersystem, durch 100%-ige Kontrolle der verbauten mechanischen, elektronischen und optischen Komponenten realisiert werden. Das erste gebaute System läuft mittlerweile seit März 2008 in einer Recyclinganlage im 24 Stundenbetrieb. Lediglich ein Standardservice nach einem halben Jahr war notwendig, was durchaus normal für ein solch komplexes Lasersystem ist.

Mittlerweile hat die Firma UNISENSOR vier der Laser im Einsatz, ein fünftes System ist gerade in der Produktion.

## Danksagung

Die Entwickler möchten sich ausdrücklich bei Herrn Dr. Schwake, DBU für die hervorragende Zusammenarbeit bedanken.

Dank seiner hohen wissenschaftlichen und technisch-fachlichen Kompetenz gekoppelt mit einer hohen Flexibilität bei der Projektabwicklung konnten sämtliche Ziele innerhalb des gesetzten Zeitraumes voll erreicht werden.

Speziell die jahrelange Erfahrung der Firma Unisensor im Bereich industrieller Maschinen in stark kontaminierter Umgebung, wie z.B. in einer Recyclinganlage, hat Entwicklung des Lasersystems nachhaltig beschleunigt.

## Literatur

- [1] V.G.Dmitriev, G.G.Gurzadyan, D.N.Nikogosyan: Handbook of Nonlinear Optical Crystals. Third, Revised Edition. Springer Series in Optical Sciences, vol.64, ed. by A.E.Siegman, Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York 1999, pp.1-413.
- [2] B. Köhler: Erzeugung von Pikosekundenlichtimpulsen hoher mittlerer Leistung im ultravioletten und infraroten Spektralbereich durch Frequenzkonversion eines cw-modengekoppelten Nd:YVO 4 -Oszillator-Verstärkersystems, Kaiserslautern, Univ., Diss., 2001, pp. 1-200
- [3] W. Koechner: Solid-State Laser Engineering, Springer Series in Optical Sciences, vol. 6, ed. W. T. Rhodes, Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York, 2006, pp. 1-747
- [4] [www.coherent.com](http://www.coherent.com)
- [5] [www.spectra-physics.com](http://www.spectra-physics.com)
- [6] [www.osram.com/osram\\_com/Professionals/DisplayOptic\\_Lighting/Semiconductor\\_and\\_Medical/XERADEX/index.html](http://www.osram.com/osram_com/Professionals/DisplayOptic_Lighting/Semiconductor_and_Medical/XERADEX/index.html)