



Entwicklung und Test einer modellhaften laserbasierten Anlage für das umweltentlastende Recycling von Kathodenstrahl-Bildröhren

Abschlussbericht

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt; AZ: 27161 – 22

Laufzeit: 14. Mai 2009 bis 14. Juni 2010

Verfasser:

Dönmez Sondermaschinenbau GmbH

Vor dem Osterholze 3

31275 Lehrte

Tel. 05132/506766

Lehrte, 02. September 2010



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Entwicklung und Test einer modellhaften laserbasierten Anlage für das umweltentlastende Recycling von Kathodenstrahl-Bildröhren

Abschlussbericht

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt; AZ: 27161 – 22

Laufzeit: 14. Mai 2009 bis 14. Juni 2010

Verfasser:

Dönmez Sondermaschinenbau GmbH

Vor dem Osterholze 3

31275 Lehrte

Tel. 05132/506766

Lehrte, 02. September 2010

gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	27161-22	Referat	21/0	Fördersumme	239.254,-- EUR
----	-----------------	---------	-------------	-------------	-----------------------

Antragstitel **Entwicklung und Test einer modellhaften laserbasierten Anlage für das umweltentlastende Recycling von Kathodenstrahl-Bildröhren**

Stichworte

Laufzeit 13 Monate	Projektbeginn 14.05.2009	Projektende 14.06.2010	Projektphase(n) 1
------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------

Zwischenberichte **Wurde am 13.12.2009 vorgelegt**

Bewilligungsempfänger	Dönmez Sondermaschinenbau GmbH	Tel	05132 506766
		Fax	05132 506788
	Vor dem Osterholze 3 31275 Lehrte	Projektleitung Dipl.-Ing. Muzaffer Dönmez	
	www.doenmez-sondermaschinenbau.de	Bearbeiter	

Kooperationspartner Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH)

Hollerithallee 8
30419 Hannover

www.lzh.de

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Aufgrund des ab dem 24.03.05 in Kraft getretenen Gesetzes ElektroG zur Entsorgung und Rücknahme von Elektro-Altgeräten fallen derzeit jährlich ca. 120.000 Tonnen zu entsorgende Kathodenstrahl-Bildröhren (CRT) aus alten PC-Monitoren und TV-Geräten an. CRT-Bildröhren bestehen im Wesentlichen aus zwei Segmenten, Konus- und Schirmglas, deren unterschiedliche, herstellereinspezifische Glaszusammensetzungen getrennte Wiederverwertungsprozesse für die einzelnen Segmente notwendig machen. Besonders umweltbelastend ist hierbei der hohe Anteil Bleioxid von bis zu 25% im Konusglas. Eine hochwertige stoffliche Verwertung der Glaskomponenten im Sinne eines geschlossenen Kreislaufes erfordert daher ein möglichst emissionsfreies und sortenreines Trennverfahren der verschiedenen Glasfraktionen.

Ziel dieses Vorhabens war es, auf der Basis eines neuartigen, laserbasierten Trennprozesses eine modellhafte Anlage für das umweltentlastende Recycling von CRT-Bildröhren zu entwickeln und zu testen. Dabei sollte das Anlagenkonzept den spezifischen Anforderungen der Recyclingbranche genügen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Aufgrund der Betriebsstruktur in der Recyclingbranche war die Entwicklung eines modular aufgebauten und in seiner Kapazität skalierbaren Anlagenkonzeptes erforderlich. Neben der Konzeption der Gesamtanlage waren insbesondere ein geeignetes Werkstückträgersystem, eine Zuführeinrichtung zur Laserbearbeitung, eine vollgekapselte, automatisierte Laserbearbeitungskabine, manuell zu bedienende Bestückungsstationen sowie eine geeignete Steuerung zu entwickeln, aufzubauen und zu testen. Aufgabe des Kooperationspartners LZH war es, einen der Bearbeitungsaufgabe angepassten Laser-Bearbeitungskopf sowie die Steuerung des Laserprozesses beizusteuern.

Ergebnisse und Diskussion

Die entwickelte modellhafte laserbasierte Anlage für das umweltentlastende Recycling von Kathodenstrahl-Bildröhren ist modular aufgebaut und besteht aus einer Kombination von automatisierten und manuell betätigten Arbeitsplätzen. Kriterien für die Ausgestaltung manueller bzw. automatisierter Arbeitsplätze waren Automatisierbarkeit, Arbeitssicherheit und Kosten. Die für den gesamten Trennprozess notwendigen Arbeitsschritte beinhalten drei automatisierte und drei Handarbeitsplätze. Die Handarbeitsplätze sind den automatisierten Stationen vor- bzw. nachgelagert. Die Anlage ist dabei so konzipiert, dass der erste und der letzte Arbeitsschritt manuell ausgeführt werden. Diese beiden Arbeitsstationen sind räumlich zusammengefasst und können von einem Werker bedient werden.

Das laserbasierte Trennverfahren, nämlich ein thermisch induziertes Spannungstrennen mittels Festkörperlaser, ist erfolgreich realisiert worden. Durch die exakte, lokal definierte Erwärmung wird ein durchgehender Riss im Umfang des Werkstückes erzielt. Grundlage hierfür sind thermisch induzierte Spannungen durch Einsatz von Laserstrahlen im Wellenlängenbereich von ca. 1µm. Der neuartige Trennprozess zeichnet sich besonders durch die berührungslose, verschleißfreie Bearbeitung ohne Materialabtrag aus. Dadurch wird eine qualitativ hochwertige, vollständige Trennung von Konus- und Schirmglas ermöglicht, ohne dass dabei Material verdampft bzw. abgetragen wird. Es entstehen keine Materialverluste, die zu einer Verunreinigung führen könnten. Folglich handelt es sich um ein absolut emissionsfreies Trennverfahren. Der Bediener ist keinem Gesundheitsrisiko mehr ausgesetzt. Umweltgefährdende Stäube müssen nicht aufwändig abgesaugt und entsorgt werden. Es ergibt sich eine präzise, sortenreine Zerlegung in wieder verwertbare Einzelkomponenten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

In der Fachzeitschrift der Recycling-Branche, dem Recycling Magazin, wurde ein Artikel veröffentlicht, aus dem die Vorteile der neu entwickelten Anlage klar hervorgehen. Dieser Artikel ist auch als Download verfügbar. Durch die Darstellung des innovativen Verfahrens auf der Webseite der Firma Dönmez Sondermaschinenbau wurden einige Interessenten aufmerksam, die die Anlage bereits besichtigt haben. Darüber hinaus wurden bereits 40 durch gezielte Internetrecherche ermittelte potentielle Interessenten im In- und Ausland per E-Mail oder Post kontaktiert.

Fazit

Die Zielsetzung des Projektes, nämlich Entwicklung und Test einer modellhaften laserbasierten Anlage für das umweltentlastende Recycling von Kathodenstrahl-Bildröhren wurde erfolgreich umgesetzt. In Kooperation mit einem potenziellen Endanwender wurden in Testreihen ca. 700 ausgediente Bildröhren unterschiedlicher Größen auf der Anlage getrennt. Folgende Ergebnisse können festgestellt werden:

- Der laserbasierte Trennprozess ist absolut emissionsfrei, bisher auftretende bleihaltige Glasstäube und –scherben entfallen vollständig.
- Die Bildröhre kann präzise in die Komponenten Konus- und Schirmglas getrennt werden, eine sortenreine Weiterverwendung der Gläser wird damit sichergestellt.
- Die mittlere Taktzeit der laserbasierte Anlage konnte um mehr als 60% gegenüber den konventionellen Anlagen gesenkt werden.
- Die neue Anlage erzielt durch den Einsatz der Lasertechnologie gegenüber den konventionellen Anlagen eine erheblich höhere Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.
- Die Stückkosten für den Trennvorgang einer Bildröhre verringern sich um mehr als 30% gegenüber den konventionellen Anlagen.
- Die entwickelte Anlage entspricht den aktuellen Normen und Regeln der Technik, etwaige Vorbehalte der Werker gegenüber der Lasertechnologie konnten nach kurzer Zeit ausgeräumt werden.

Technologisch betrachtet lässt sich die Taktzeit durch den Einsatz einer leistungsstärkeren Laserquelle noch weiter verringern. Demgegenüber steht jedoch die Tatsache, dass die Kosten für stärkere Laserquellen überproportional ansteigen, so dass eine weitere Taktzeitverringern nur zu Lasten der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu erzielen ist.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen.....	6
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen.....	8
Zusammenfassung.....	9
1 Einleitung.....	10
2 Laseranlage.....	13
2.1 Arbeitsschritte.....	14
2.2 Beschreibung der Stationen.....	16
2.2.1 Werkstückträger (WT).....	16
2.2.2 Fördertechnik.....	17
2.2.3 Ausrichtstation mit Schnittkantenermittlung.....	19
2.2.4 Laserbearbeitung.....	20
2.2.5 Laserschutzkabine.....	21
2.2.6 Konusglas Entnahme.....	24
2.2.7 Anlagenbestückung.....	24
2.2.8 Steuerungssystem.....	25
2.3 Laserbearbeitungskopf.....	30
2.4 Konstruktionsrichtlinien.....	32
2.5 Technische Daten.....	33
2.6 Angaben zum Sicherheitsumfang.....	36
3 Erzielte Ergebnisse.....	37
4 Bewertung.....	38
5 Marketingmaßnahmen.....	42
6 Fazit.....	43
7 Quellennachweise.....	44

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abb. 1: Aufbau einer Kathodenstrahl-Bildröhre	10
Abb. 2: Konventionelles Recycling von Kathodenstrahl-Bildröhren.....	12
Abb. 3: Laseranlage Ausrichtseite.....	14
Abb. 4: Werkstückträger Oberseite	16
Abb. 5: Werkstückträger Unterseite	17
Abb. 6: Querschnitt – Förderstrecke mit Werkstückträger.....	18
Abb. 7: Umsetzer	18
Abb. 8: Ausrichtstation	20
Abb. 9: Laserschutzkabine	22
Abb. 10: Laserschutzkabine innen	23
Abb. 11: Verknüpfungskonzept der Gesamtanlage.....	26
Abb. 12: Aufnahme Trennbereich mit einer Wärmebildkamera; Prozess mit konstanter Umfangsgeschwindigkeit.....	30
Abb. 13: Aufbau des Laserbearbeitungskopfes.....	31
Abb. 14: Justage der Strahlachse, a) Draufsicht, b) Seitenansicht, c) Lage der Einstellschrauben.....	32
Abb. 15: Schematische Darstellung des Monitors.....	34
Abb. 16: Aufstellplan der Gesamtanlage.....	36
Abb. 17: Trennergebnis mittels Sägeverfahren	38
Abb. 18: Trennergebnis mittels Laserverfahren	38
Abb. 19: Vollständig lasergetrennte CRT (Konus- und Schirmglas).....	39
Abb. 20: Vollständig lasergetrennte CRT (Konus- und Schirmglas).....	39
Abb. 21: Lasergetrennte CRT (Schirmglas mit Lochmaske)	39
Abb. 22: Lasergetrennte CRT	39
Abb. 23: Lasergetrennte Kante einer CRT	40
Abb. 24: Vollständig lasergetrennte CRT (Konusglas).....	40
Abb. 25: Konventionelle Recyclinganlage für Bildröhren.....	42

Tabelle 1: Unterschiedliche laserbasierte Trennverfahren; CO ₂ -Laser und Festkörperlaser	12
Tabelle 2: Arbeitsschritte in Kurzübersicht	15
Tabelle 3: Trennbare Monitorgrößen, Angaben in mm.....	35

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

µm	Mikrometer
bar	Maßeinheit des Drucks
BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschrift
CO ₂ -Laser	Kohlendioxidlaser
CRT	Cathode Ray Tube (=Kathodenstrahlbildröhre)
cw-Laser	continuous wave-Laser (=Dauerstrichlaser)
DIN	Deutsche Industrie Norm
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
E-Schrott	Elektro- und Elektronik-Schrott
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
ISO	International Organization for Standardization (= Internationale Organisation für Normung)
mm	Millimeter
Movimot	Getriebemotor mit integriertem Frequenzumrichter
nm	Newtonmeter
NOT-AUS	Anlagenstopp im Notfall
P	Laserleistung
RAL	In Deutschland übliches, normiertes Farbsystem
SEW	Süddeutsche Elektromotoren-Werke
VBG	Gesetzliche Unfallversicherung für Banken und Versicherungen
W	Watt
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
WT	Werkstückträger

Zusammenfassung

Aufgrund des ab dem 24.03.05 in Kraft getretenen Gesetzes ElektroG zur Entsorgung und Rücknahme von Elektro-Altgeräten fallen derzeit jährlich ca. 120.000 Tonnen zu entsorgende Kathodenstrahl-Bildröhren (CRT) aus alten PC-Monitoren und TV-Geräten an. CRT-Bildröhren bestehen im Wesentlichen aus zwei Segmenten, Konus- und Schirmglas, deren unterschiedliche, herstellereinspezifische Glaszusammensetzungen getrennte Wiederverwertungsprozesse für die einzelnen Segmente notwendig machen. Besonders umweltbelastend ist hierbei der hohe Anteil Bleioxid von bis zu 25% im Konusglas. Eine hochwertige stoffliche Verwertung der Glaskomponenten im Sinne eines geschlossenen Kreislaufes erfordert daher ein möglichst emissionsfreies und sortenreines Trennverfahren der verschiedenen Glasfraktionen. Die Rückführung von Altglasscherben in den Schmelzprozess ist anzustreben, da sie Vorteile bei der Reduzierung des Schmelzenergiebedarfs bringt und den Verbrauch von Bleioxid erheblich senkt.

Ziel dieses Vorhabens war es, auf der Basis eines neuartigen, laserbasierten Trennprozesses eine modellhafte Anlage für das umweltentlastende Recycling von CRT-Bildröhren zu entwickeln und zu testen. Dabei sollte das Anlagenkonzept den spezifischen Anforderungen der Recyclingbranche genügen.

Die entwickelte modellhafte Anlage ist modular aufgebaut und besteht aus einer Kombination von automatisierten und manuell betätigten Arbeitsplätzen. Sie ist damit in ihrer Kapazität skalierbar und kann an unterschiedliche Betriebsgrößen angepasst werden.

In Kooperation mit einem potenziellen Endanwender wurden in Testreihen ca. 700 ausgediente Bildröhren unterschiedlicher Größen auf der Anlage getrennt. Folgende Ergebnisse können festgestellt werden:

- Der laserbasierte Trennprozess ist absolut emissionsfrei, bisher auftretende bleihaltige Glasstäube und –scherben entfallen vollständig.
- Die Bildröhre kann präzise in die Komponenten Konus- und Schirmglas getrennt werden, eine sortenreine Weiterverwendung der Gläser wird damit sichergestellt.
- Die mittlere Taktzeit der laserbasierte Anlage konnte um mehr als 60% gegenüber den konventionellen Anlagen gesenkt werden.
- Die neue Anlage erzielt durch den Einsatz der Lasertechnologie gegenüber den konventionellen Anlagen eine erheblich höhere Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.
- Die Stückkosten für den Trennvorgang einer Bildröhre verringern sich um mehr als 30% gegenüber den konventionellen Anlagen.

- Die entwickelte Anlage entspricht den aktuellen Normen und Regeln der Technik, etwaige Vorbehalte der Werker gegenüber der Lasertechnologie konnten nach kurzer Zeit ausgeräumt werden.

1 Einleitung

In der EU wird der Umgang mit Elektronikschrott durch die WEEE-Richtlinie geregelt, die in Deutschland im Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) vom 24.03.2005 zur Entsorgung und Rücknahme von Altgeräten und des daraus folgenden Verbots der Deponierung von Elektro-Altgeräten umgesetzt worden ist. Die EU-Mitgliedsländer müssen bis 13. August 2005 ein funktionierendes E-Schrott Recycling-System in Betrieb genommen haben, d.h. sie sind verpflichtet, den Elektroschrott wieder zurückzunehmen und fachgerecht zu entsorgen. Ab Dezember 2006 sollen aus privaten Haushalten mindestens 4 kg Altgeräte pro Einwohner und Jahr gesammelt werden [2].

Allerdings exportieren einige industrialisierte Länder – besonders USA und Australien – ihren Elektronikschrott bevorzugt in Schwellen- und Entwicklungsländer. Dort wird der Elektronikschrott mit einfachsten Mitteln (Feuer, Hammer und Zange, Säurebad) unter großer Gefährdung von Mensch und Umwelt recycelt [1]. Es ist jedoch zu erwarten, dass das nationale Recycling von E-Schrott länderübergreifend an Bedeutung gewinnen wird, da mittlerweile 170 Länder das am 5. Mai 1992 in Kraft getretene Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung [3] unterzeichnet haben. Die Unterzeichnerländer verpflichten sich darin unter anderem, Elektronikschrott im Entstehungsland wieder zu verwerten.

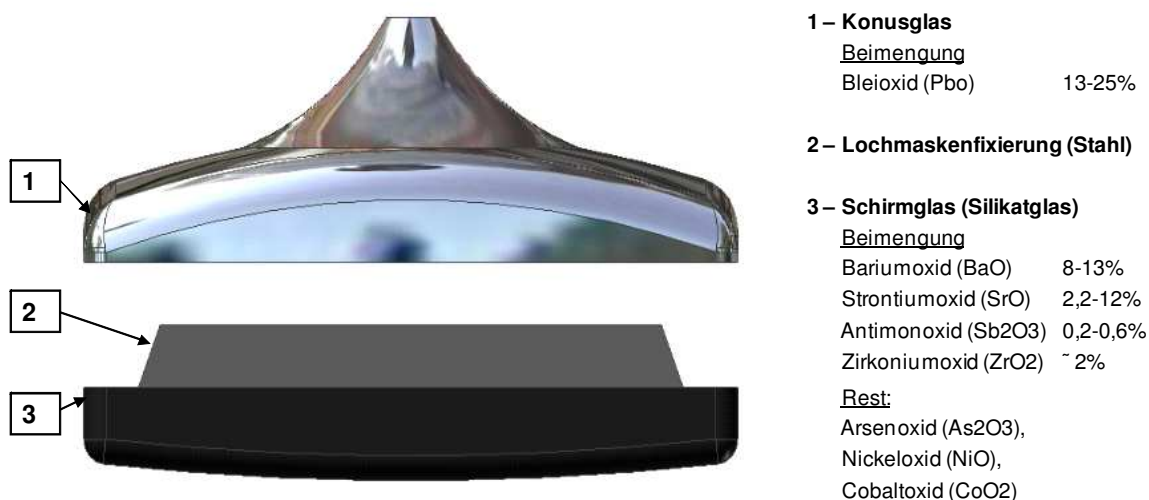


Abb. 1: Aufbau einer Kathodenstrahl-Bildröhre

Kathodenstrahl-Bildröhren (CRT) bestehen im Wesentlichen aus zwei Segmenten, Konus- und Schirmglas, deren unterschiedliche, herstellerspezifische Glaszusammensetzungen getrennte Wiederverwertungsprozesse für die einzelnen Segmente notwendig machen (Abb. 1). Sie sind daher vornehmlich in die Komponenten Konus- und Schirmglas zu zerlegen [4]. Besonders umweltbelastend ist hierbei der mit bis zu 25% sehr hohe Anteil an Bleioxid im Konusglas. Eine hochwertige stoffliche Verwertung der Glaskomponenten im Sinne eines geschlossenen Kreislaufes erfordert daher ein möglichst emissionsfreies und sortenreines Trennverfahren der verschiedenen Glasfraktionen.

Die zum gegenwärtigen Zeitpunkt eingesetzten Trennverfahren benötigen allein zum Trennen eine Prozesszeit von bis zu zwei Minuten. Die dadurch resultierende hohe Durchlaufzeit des Gesamtprozesses macht ein wirtschaftliches Recyceln der Röhren fast unmöglich und beeinträchtigt die Wettbewerbsfähigkeit der Recyclingbetriebe in erheblichem Masse. Darüber hinaus werden toxische Stäube freigesetzt, so dass durch den hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten die Gesundheit des Werkers beträchtlich gefährdet wird (Abb. 2).



1. Entfernen der Rückwand



2. Belüftung der Bildröhre



3. Entfernen der Ablenkeinheit



4. Entfernen der Kabel, der Elektrikeinheit und der Lautsprecher sowie Demontage der Bildröhre



5. Die Bildröhre wird auf den Flexplatz der Bildröhrentrennung gelegt und zur Demontage vorbereitet; trennen des Spannbandes durch flexen



6. Entfernen des Spannbandes und Fixieren der Bildröhre auf dem Schlitten der Bildröhrentrennung



7. Erhitzen der Bildröhre mit Hilfe eines Heizdrahtes; die erhitzten Stellen werden mit einem nassen Schwamm befeuchtet; evtl. Abklopfen der Bildröhre bis sich das Konusglas vom Schirmglas trennt



8. Trennen des konusglases vom Schirmglas



9. Ablegen und Zertrümmern des Konusglases



10. Entfernen der Maske



11. Absaugen der Leuchtschicht vom Schirmglas und Entfernen des Eisenrahmens vom Schirmglas



12. Ablegen und Zerschlagen des Schirmglases

Quelle: Zellner-Recycling GmbH

Abb. 2: Konventionelles Recycling von Kathodenstrahl-Bildröhren

Gleichermaßen ist es lediglich eingeschränkt möglich, das Glas sortenrein zu trennen, so dass es nur bedingt einer Wiederverwertung zugeführt werden kann und allenfalls als Bergversatz Verwendung findet.

Das Trennen erfolgt entweder mittels Heizdraht (thermomechanisch absprengen) oder Säge (kaltmechanisch zersägen). Bei der Trennung mittels Heizdraht werden thermische Spannungen zur Trennung eingesetzt. Dabei kann die Trennzone nicht präzise parametrisiert werden. Der Heizdraht muss durch die ungleichmäßige Wärmeabgabe (der Heizdraht bricht dabei) mehrmals am Tag ausgewechselt werden. Beim Sägeverfahren werden toxische Stäube freigesetzt, und die Qualität der recycelbaren Einzelkomponenten ist minderwertig.

Eine neuere Entwicklung stellt ein Bildröhren-Trennverfahren auf der Basis eines CO₂-Lasers dar [8]. Bei diesem Verfahren gibt es jedoch bedingt durch die Eigenschaften eines CO₂-Lasers so erhebliche Nachteile, dass eine Markteinführung bislang nicht erfolgt ist (Tabelle 1).

Tabelle 1: Unterschiedliche laserbasierte Trennverfahren;
CO₂-Laser und Festkörperlaser

CO ₂ -Laser	Festkörperlaser
Hohe Prozesstemperatur (1500°C), dadurch hoher Energiebedarf	Niedrige Prozesstemperatur (453°), dadurch geringerer Energiebedarf
Durch Sublimation freigesetzte toxische Dämpfe	Keine Sublimation
Aufwändige Strahlführung durch fokussierten Laser mit unterschiedlicher Brennweite, dadurch mechanische Anpassung des Lasersystems erforderlich	Feststehender Laser, keine mechanische Anpassung erforderlich
Erzeugung einer Bruchkante durch Oberflächenerwärmung, dadurch nachgelagerter, mechanischer Brechvorgang erforderlich	Volumenerwärmung erzeugt Rissbildung über die gesamte Wandstärke, dadurch vollständige Trennung möglich
Unsaubere Trennkante (manuelle Nachbearbeitung erforderlich)	Saubere Trennkante
Niedrige Sortenreinheit	Hohe Sortenreinheit
Hohe Ausschussrate durch nicht oder nur teilweise getrennte Bildröhren	Niedrige Ausschussrate

Ziel dieses FuE-Kooperationsvorhabens war die Entwicklung einer modellhaften Anlage zur laserstrahlgestützten, automatisierten Trennung von Kathodenstrahl-Bildröhren im Recyclingprozess. Auf der Basis eines zuvor als Funktionsmuster entwickelten innovativen, laserbasierten Trennverfahrens sollte sowohl den gesetzlichen Anforderungen, insbesondere in Bezug auf den Arbeitsschutz, als auch den wirtschaftlichen Belangen der Recyclingbetriebe Rechnung getragen werden. Durch genaue Parametrierung der Trennlinie, die durch den Einsatz eines Festkörperlaser glatt und ohne Bruchkanten ist, sollte die absolut sortenreine Trennung von Konus- und Schirmglas gewährleistet werden, so dass sie den unterschiedlichen Wiederverwertungsprozessen zugeführt werden können. Dabei war ein Bearbeitungskopf zu entwickeln, der universell und unabhängig von der Laserquelle einsetzbar ist.

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Pilotanlage soll serientauglich sein und eine Basis zur industriellen Umsetzung bilden. Ziel war es, die Entwicklung der Anlage hinsichtlich Prozesssicherheit, geringer Bearbeitungszeiten und emissionsfreier, möglichst präziser Zerlegung in wieder verwertbare Einzelkomponenten mit hoher Qualität auch an die unterschiedliche Geometrie und Werkstoffzusammensetzung von Kathodenstrahl-Bildröhren verschiedener Hersteller anzupassen. Auf der Anlage sind Kathodenstrahlbildröhren zwischen 12 und 36 Zoll aufzutrennen.

Um den vorhandenen, sehr uneinheitlichen Betriebsstrukturen in der Recyclingbranche Rechnung zu tragen, soll ein modular aufgebautes und in seiner Kapazität skalierbares Anlagenkonzept entwickelt werden. Es ist daher erforderlich, manuelle und teilautomatisierte Arbeitsinhalte miteinander kombinieren zu können. Die Kapazität der Anlage muss durch einfache Erweiterungen bzw. Änderungen an einen veränderten Recycling-Bedarf angepasst werden können. Teile der Anlage sollen ggf. für andere Recycling-Aufgaben wieder verwendbar sein. Dabei ist zu beachten, dass die Entwicklung hinsichtlich geringer Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten sowie einer sehr einfachen Bedienung erfolgt.

Ein wichtiges Kriterium war, sicherzustellen, dass geeignete Schutzmaßnahmen für die Mitarbeiter – z. B. Luftabsaugung, Schutzkleidung oder Separierungsmöglichkeiten für die Abfälle vorgesehen werden [4].

2 Laseranlage

Die entwickelte modellhafte laserbasierte Anlage für das umweltentlastende Recycling von Kathodenstrahl-Bildröhren ist modular aufgebaut und besteht aus einer Kombination von automatisierten und manuell betätigten Arbeitsplätzen. Kriterien für die Ausgestaltung manueller bzw. automatisierter Arbeitsplätze waren Automatisierbarkeit, Arbeitssicherheit und Kosten.

Die automatisierungstechnischen Komponenten umfassen im Wesentlichen die Fördertechnik mit dem bauteilspezifischen Werkstückträger, einen Umsetzer und eine Ausrichtstation sowie dem Laser als Trennwerkzeug (Abb. 3).

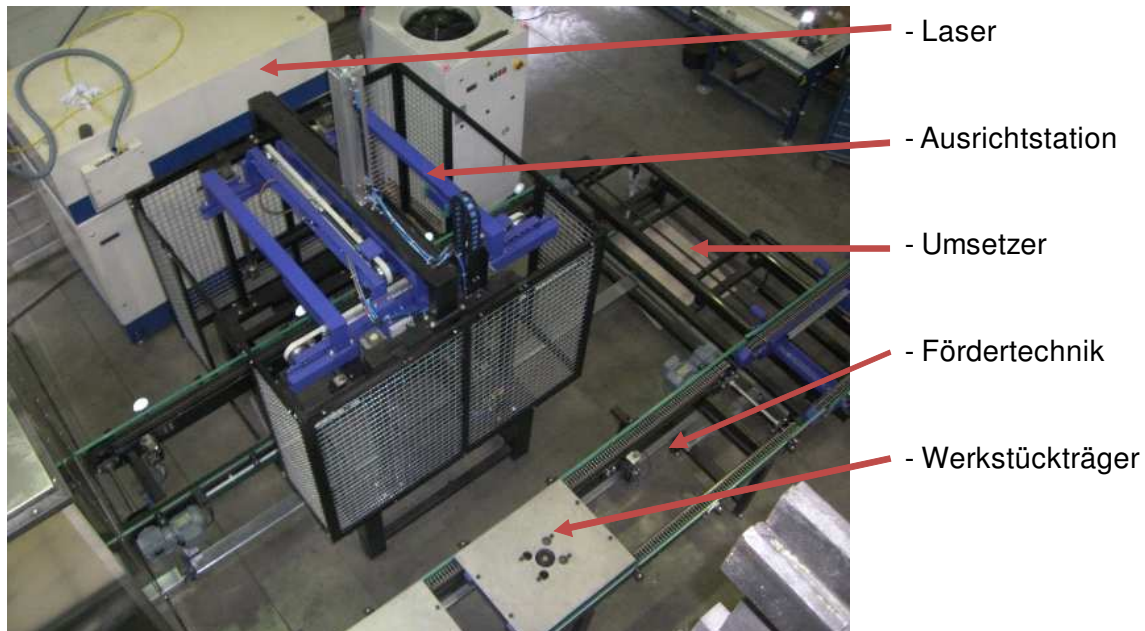


Abb. 3: Laseranlage Ausrichtseite

2.1 Arbeitsschritte

Die für den gesamten Trennprozess notwendigen Arbeitsschritte beinhalten drei automatisierte und drei Handarbeitsplätze. Die Handarbeitsplätze sind den automatisierten Stationen vor- bzw. nachgelagert.

Die Anlage ist dabei so konzipiert, dass der erste und der letzte Arbeitsschritt manuell ausgeführt werden. Diese beiden Arbeitsstationen sind räumlich zusammengefasst und können von einem Werker bedient werden. In Tabelle 2 sind die Arbeitsschritte in einer Kurzübersicht zusammengefasst.

Tabelle 2: Arbeitsschritte in Kurzübersicht

Station	Funktion	Beschreibung
Vorbereitung	Handarbeitsplatz	Der Werker entfernt den Metallspannung an der Schnittstelle zwischen Konus- und Schirmglas. Durch ein Anbohren am Evakuierungsstutzen wird die Kathodenstrahlbildröhre belüftet.
Station 1	Handarbeitsplatz	Vom Werker werden Kathodenstrahlbildröhren auf die Werkstückträger aufgelegt. Die Ausrichtung erfolgt grob in Längsrichtung.
Station 2	Automatisch	Ausheben und Ausrichten der Kathodenstrahlbildröhre. Beim Ausrichten der Bildröhren werden über Messsysteme an den Zylindern auch die Größen der Kathodenstrahlbildröhre ermittelt. Über ein Kamerasystem erfolgt die Lageerkennung der Nahtstelle zwischen Konus- und Schirmglas. Die da-durch resultierende Schnitthöhe wird an die Laserbearbeitungsstation übermittelt. Nach dem Ausrichten der Bildröhre wird diese auf dem WT mittels Vakuumsauger fixiert. Der WT besitzt einen Vakuumspeicher, um den Zustand der Fixierung auch beim Weiterfördern des WT aufrecht zu erhalten.
Station 3	Automatisch	Die Kathodenstrahlbildröhre wird in einer geschlossenen Kabine mit dem WT von der Fördertechnik abgehoben. Der Laserbearbeitungskopf wurde auf Grund der aus Station 2 übermittelten Daten in der Höhe positioniert. Bei der Drehung der Kathodenstrahlbildröhre wird mittels Laserstrahl Wärme in die Nahtstelle der beiden Gläser eingebracht, anschließend wird durch zwei pneumatische Schläge mechanisch eine Rissbildung ausgelöst. Parallel hierzu wird die Schnittstelle mit einem Fräskopf aufgeraut.
Station 4	Automatisch	Über ein Handling wird das Konusglas abgehoben und in eine bereit stehende Sammelbox abgelegt (oder ggf. fallen gelassen, um es zu zerkleinern).
Station (1) 5	Handarbeitsplatz	Ein Werker entnimmt die Lochmaske und entsorgt die-

		<p>se in eine dafür bereitgestellte Box.</p> <p>Das Frontglas wird gereinigt, auf einem Gurtförderer abgelegt und in eine Sammelbox weitergeleitet.</p> <p>Der Werker bestückt den Werkstückträger mit einer neuen Kathodenstrahlbildröhre.</p>
--	--	---

2.2 Beschreibung der Stationen

2.2.1 Werkstückträger (WT)

Werkstückträger sind Rahmen, auf denen die Kathodenstrahlbildröhren durch die Anlage gefördert werden. Für die Anlage sind ca. zehn Stück Werkstückträger vorgesehen.

Die Kathodenstrahlbildröhre wird auf vier Gummipuffer abgesetzt, um ein Verrutschen zu verhindern. Zentrisch ist ein Vakuumsauger integriert, der nach dem Ausrichten die Bildröhre auf dem WT fixiert (Abb. 4).

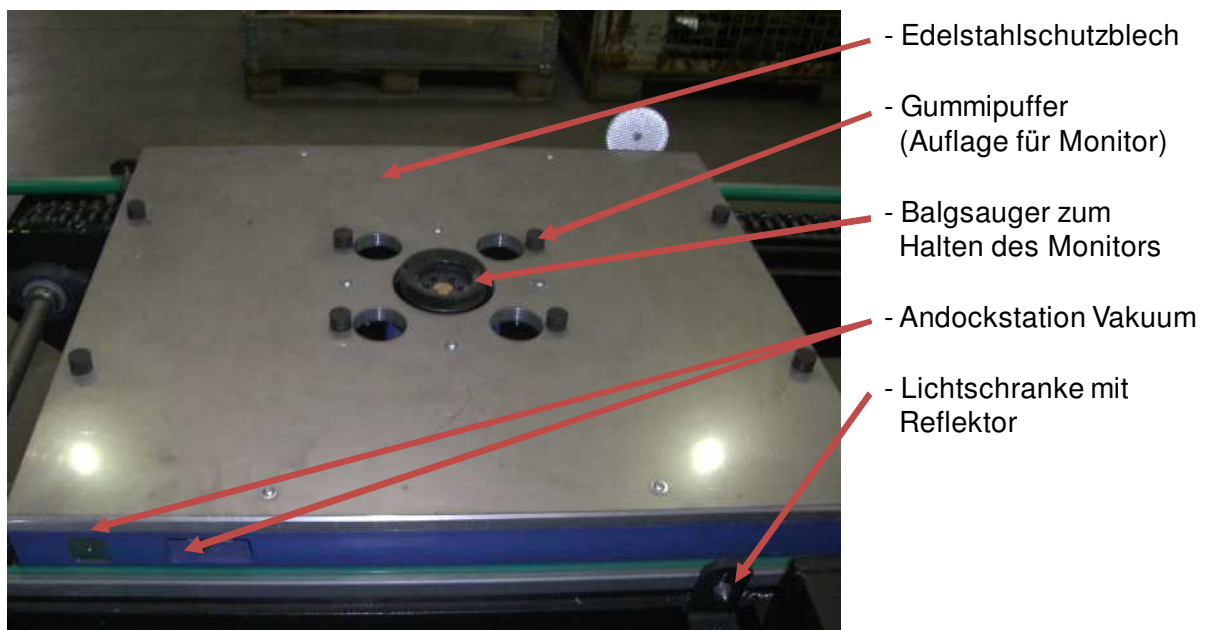
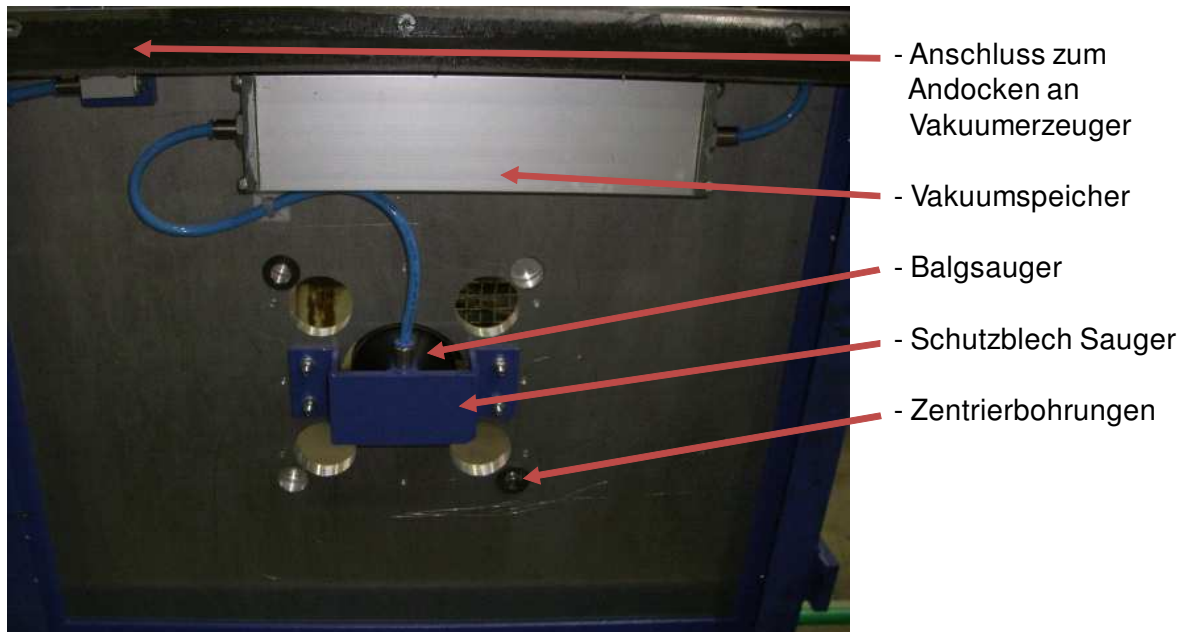


Abb. 4: Werkstückträger Oberseite

Um das Vakuum auch während des Förderprozesses aufrecht zu erhalten, verfügt der WT über einen Vakuumspeicher und ein Ventil zur Belüftung (Abb. 5). In der Ausrichtstation befindet sich eine externe Baugruppe, die die Luft aus dem Speicher evakuiert.

Rund um den Sauger sind vier Bohrungen angeordnet, durch die der Bildschirm über vier Dorne mit Topfrollen angehoben werden kann. Dies ist zum Ausrichten der Kathodenstrahlbildröhre erforderlich, da sie sich auf den Gummipuffern nicht schieben lässt.



- Anschluss zum Andocken an Vakuumerzeuger
- Vakuumspeicher
- Balgsauger
- Schutzblech Sauger
- Zentrierbohrungen

Abb. 5: Werkstückträger Unterseite

Darüber hinaus ist jeder WT in Förderrichtung einseitig mit einem Gummipuffer bestückt, damit eventuell aufgestaute WT mit einfachen Stopperrn sauber vereinzelt werden können.

2.2.2 Fördertechnik

Die Fördertechnik besteht aus Kettenförderern in robuster Bauweise (Abb. 6). Es gibt zwei Förderstrecken von ca. 6 Metern und zwei Querförderer. Die Fördertechnik wird im Karree aufgebaut, so dass der Umlauf der WT gewährleistet ist.

Die Querförderer bestehen jeweils aus einem kurzen Förderband mit Reversierbetrieb. Diese werden zwischen den beiden Längsförderstrecken hin und her gefahren um die WT von einer Längsförderstrecke auf die nächste zu übergeben.

Als Förderketten kommen Stauförderketten mit frei beweglichen Förderröllchen zum Einsatz, so dass der WT an beliebiger Position aufgehalten werden kann, obwohl die Förderkette weiter läuft.

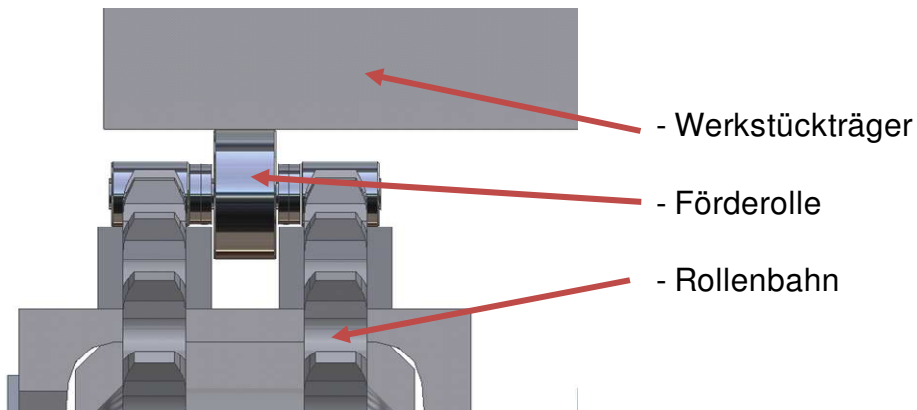


Abb. 6: Querschnitt – Förderstrecke mit Werkstückträger

Seitenführungen am Kettenförderer halten die WT in Förderrichtung. Die Movimot-Antriebsmotoren von SEW sind so ausgelegt, dass der Transport der WT zwischen den Bearbeitungsstationen bei mittlerer Fördergeschwindigkeit max. 4 Sekunden beträgt.

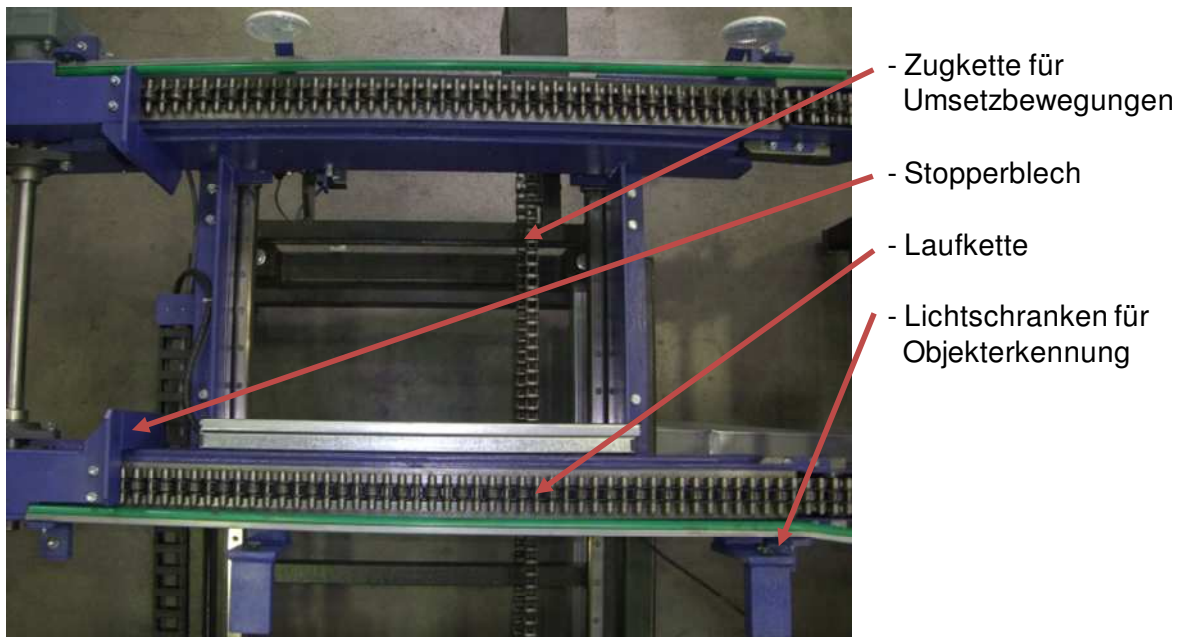


Abb. 7: Umsetzer

Abdeckungen und Schutzverkleidungen an Kettenförderern können ohne großen Aufwand zu Wartungsarbeiten entfernt werden. Kettenumlenkungen sind an frei zugänglichen Stellen mit Schutzabdeckungen versehen.

Über Stopper werden die WT in den jeweiligen Positionen angehalten. Die beiden Längsförderstrecken sind am Einlauf mit Rücklaufklinken versehen, um ein

Zurücklaufen der WT zu verhindern. An allen wichtigen Positionen sind Einweglichtschranken integriert (Abb. 7).

So wird in jeder Betriebsart die Position der WT erfasst, und es kann ein reibungsloser Umlauf erfolgen.

2.2.3 Ausrichtstation mit Schnitkantenermittlung

Nach dem Stopp wird der Monitor über vier Aushubdorne auf ein genau festgelegtes Maß vom WT abgehoben (Abb. 8).

Die Dorne sind so angeordnet, dass sie auch den kleinsten Monitor aufnehmen können. In die Spitzen der Dorne sind Topfrollen eingelassen. Auf diese Weise können sich die Monitore - bedingt durch Schwerkraft und Gewicht - selbständig zentrisch über den Dornen ausrichten.

Anschließend werden Zentrierarme - pneumatisch angetrieben und mit Messsystemen versehen - gegen den Monitor gefahren. So werden die Monitore genau mittig ausgerichtet. Über das Messsystem werden Größe und Seitenverhältnis der Monitore bestimmt, um den Trennprozess optimal steuern zu können.

Nach dem Ausrichten wird der Monitor wieder auf dem WT abgesetzt. Um den Monitor in genau dieser Position auf dem WT zu halten, wird er mit einem Vakuumsauger auf die Gummipuffer gezogen und fixiert. Um den WT mit angesaugtem Monitor weiter leiten zu können, verfügt der WT über einen Vakuumspeicher.

Anschließend wird die Trennlinie zwischen Front und Konusglas in Bezug auf die Oberkante des WT über ein geeignetes Kamerasystem erfasst. Das ermittelte Maß wird über die Steuerung an die Laserbearbeitungsstation weiter gegeben.

Nach erfolgtem Ausrichten und Vermessen wird der WT zum Weitertransport freigegeben, sofern die nachfolgende Station frei ist.



- Hubtür zur Einfahrt in Laserschutzkabine
- Lichtschranke Objekterkennung
- Positioniereinheit
- Vakuumerzeuger mit Andockstation
- Rücklaufsperrklinke
- Stopper für Werkstückträger Vereinzelung
- Zentriervorrichtung mit integriertem Wegmesssystem zur Erfassung der CRT Größe
- Kamera zur Trennlinienerfassung



Abb. 8: Ausrichtstation

2.2.4 Laserbearbeitung

Die Laserbearbeitung ist komplett in einer Laserschutzkabine gekapselt, um das Austreten direkter oder diffus gestreuter Laserstrahlung zu verhindern und somit eine Gefährdung des Werkers auszuschließen.

In umfangreichen Versuchen mit verschiedenen Laserstrahldurchmessern von 5-8 mm in 1 mm-Schritten wurde festgestellt, dass keine nennenswerten Unterschiede erzielt wurden. Auch eine Bündelung des Laserstrahls führte zu keiner Ergebnisverbesserung. Der entsprechende Durchmesser der Lasereinflusszone von 5 mm wurde empirisch ermittelt.

Die Laserschutzkabine verfügt über zwei Hubtüren mit Sicherheitsüberwachung, durch die die WT in den Arbeitsraum gelangen. Diese Türen werden vollautomatisch gesteuert und verriegelt, um ein unbeabsichtigtes Öffnen während der Laserbearbeitung zu verhindern.

Während der WT aus der Schnittkantenermittlung in die Bearbeitungszelle einläuft, wird der Laserbearbeitungskopf in die ermittelte Trennhöhe verfahren. Wichtig ist, dass kein bleihaltiges Glas am Schirmglas haften bleibt (daher Trennung im Bereich des Schirmglases und nicht direkt an der Nahtstelle zwischen Konus- und Schirmglas).

Nachdem der WT gestoppt wurde, wird dieser komplett mit festgesaugter Kathodenstrahlbildröhre ausgehoben. Zum Bearbeiten wird der WT mit Bildröhre in Drehung versetzt, wobei Drehfrequenz und Anzahl der Drehungen über die Steuerung verändert werden können. Parallel hierzu wird die Schnittstelle mit einem rotierenden Fräskopf angeraut, um die Absorptionsfähigkeit des Glases zu optimieren. Dies hat bessere Taktzeiten zur Folge (Bildröhren bis 17“: 30 sec., größer 19“: unter 60 sec.)

Nach erfolgter Erwärmung wird die Rissbildung durch einen Klopfcylinder mechanisch ausgelöst. Bei der mechanischen Kraftereinleitung war darauf zu achten, dass weder Konus- noch Schirmglas einreißen (brechen), denn sonst wäre eine weitere vollautomatische Entnahme des Konusglases nicht mehr möglich. Daher wurde die Klopfleinheit mit einer sensiblen, feinen Kraftereinstellung versehen.

Darüber hinaus wurde getestet, ob die Rissbildung durch die Besprühung mit Wassernebel oder das Anblasen mit kalter Luft begünstigt wird. Diese Maßnahmen zeigten jedoch keinerlei Auswirkungen.

Nach erfolgter Trennung wird der WT mit Bildröhre wieder auf der Fördertechnik abgesetzt und aus der Bearbeitungszelle in die anschließende Bearbeitung geführt. Auch hier musste das Absetzen der getrennten Kathodenstrahlbildröhre ebenfalls sehr vorsichtig erfolgen, um ein nachträgliches Zerspringen (Platzen) der einzelnen Gläser zu verhindern.

2.2.5 Laserschutzkabine

Für den sicheren Betrieb nach BGV Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ und DIN EN 60825 1/2 „Strahlungssicherheit von Lasereinrichtungen“ ist der

Arbeitsbereich der Laserstrahlquelle vollständig einzuhausen (Laserschutzklasse 1). Der Bediener wird durch diese Maßnahme von der Laserstrahlung abgeschirmt.

Die Laserschutzkabine besteht aus gekanteten Aluminiumblechelementen in Modulbauweise. In umfangreichen Versuchen wurde festgestellt, dass bei Einsatz eines 3 mm Aluminiumbleches eine optimale Wärmeverteilung erzielt wird. Zwischen den Elementen wird ein T- Profil mit verschraubt, um den Stoß lichtundurchlässig zu gestalten. Die überlappende Bauweise darf sich auch bei leichter Erwärmung der Modulelemente nicht öffnen (z.B. bei direktem Laserbeschuss).

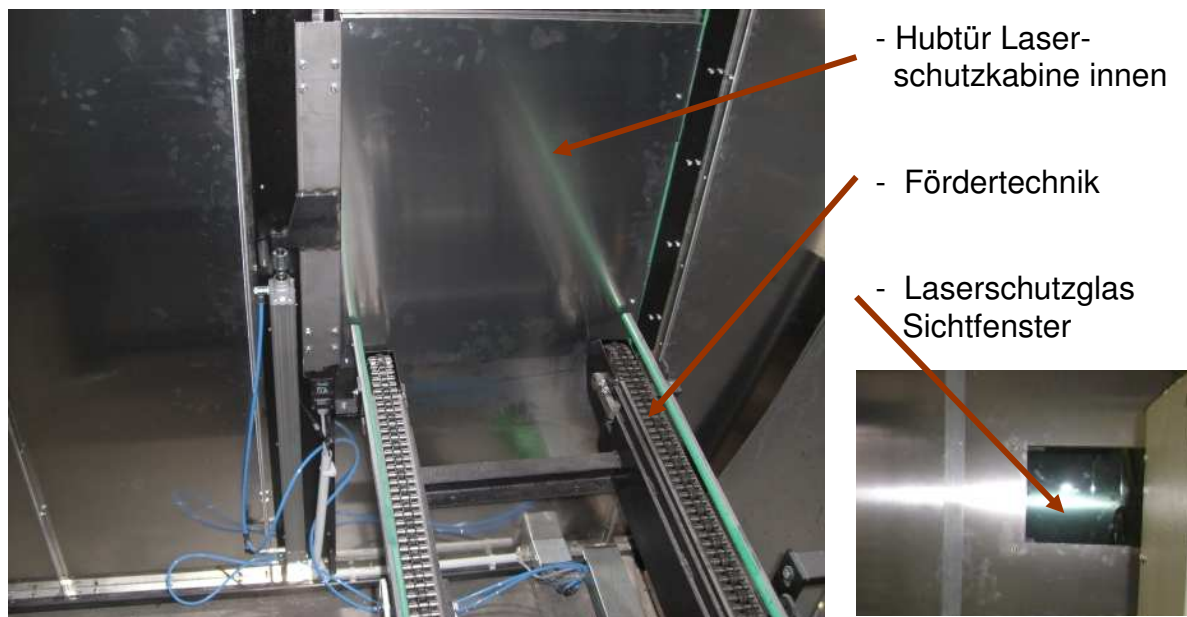


Abb. 9: Laserschutzkabine

Die Decke ist in gleicher Weise wie die Seitenwände gefertigt. Die Farbgebung der Zelle ist im Innenbereich matt schwarz gehalten, um die Reflexion der Laserstrahlung zu reduzieren. Außen kann die Zelle z.B. in Grau RAL 7011 lackiert werden. Die Zelle ist mit einer Innenbeleuchtung versehen, um bei Wartungs- und Einstellarbeiten ausreichend Beleuchtung zu schaffen.

Es ist eine Absaugeinheit integriert, um Rauchgase und Verunreinigungen ausleiten zu können.

In der Schutzwand ist seitlich hinter dem Laserkopf ein Sichtfenster mit einer Laserschutzscheibe eingelassen. Bei der Auswahl der Stelle für das Fenster musste sichergestellt werden, dass das Fenster nicht von einem direkten Laserstrahl getroffen werden kann (Abb. 9).

Während der Laserbearbeitung sind sämtliche Zugänge zur Laserschutzkabine geschlossen und elektrisch überwacht. Die Kabine verfügt über eine Zugangstür für Wartungs- und Einstellarbeiten, sowie zwei Hubtüren, durch die die WT in die Zelle

gelangen bzw. ausgeschleust werden. Konstruktiv wurden Tür und Hubtüren so gestaltet, dass auch hier kein Licht austreten kann (Abb. 10).

Durchbrüche für Kabel, Absaugrohre etc. wurden so klein wie möglich gehalten und zusätzlich durch Bürsten lichtundurchlässig gestaltet. Durchbrüche in Augenhöhe jeglicher Art wurden vermieden. Auch der Bodenabschluss wurde durch Bürsten lichtundurchlässig gestaltet.

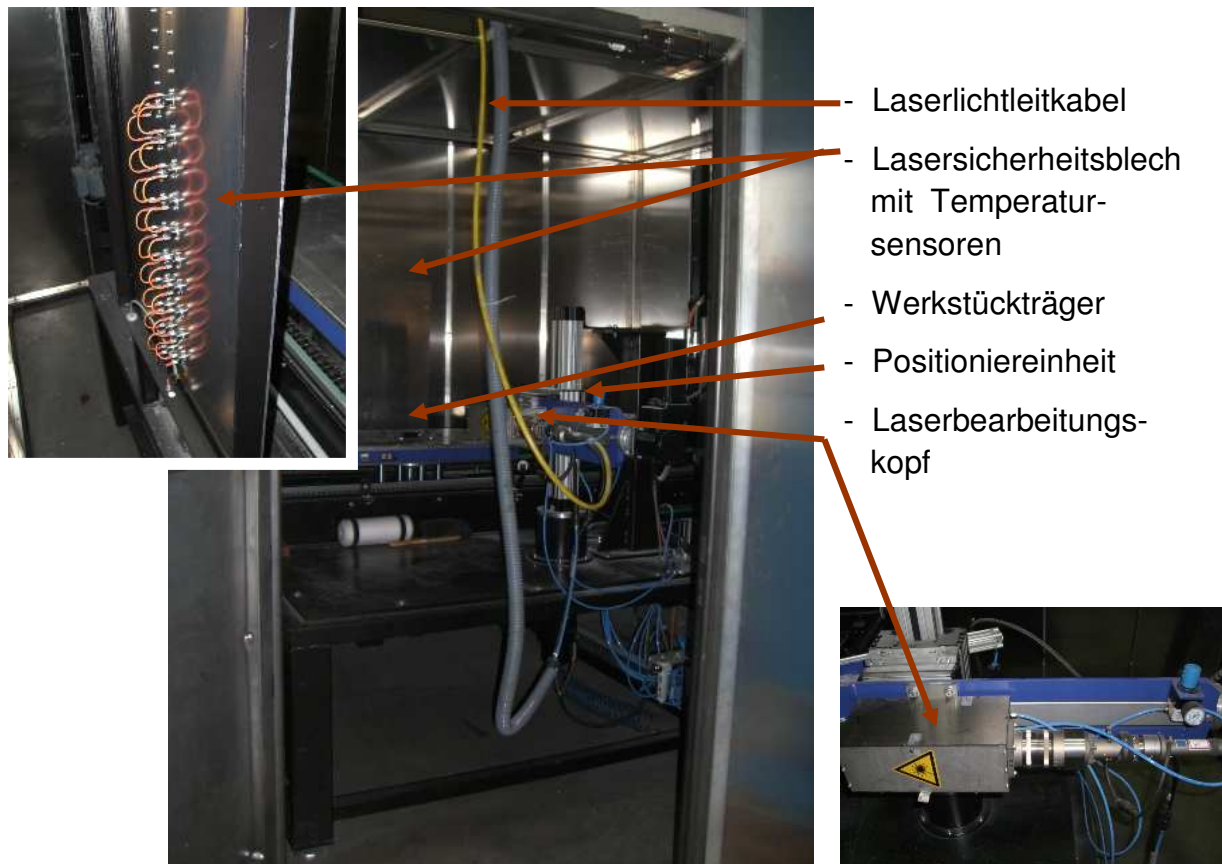


Abb. 10: Laserschutzkabine innen

Auf der Laserschutzkabine ist eine Signallampe installiert, die den aktiven Laserbetrieb anzeigt. Das Leuchtmittel wird über eine sichere Steuerung überwacht. Innerhalb der Laserschutzzelle sind pneumatische und elektrische Leitungen vor direkter Laserstrahlung durch Aluminiumabdeckungen geschützt.

Gegenüber der Strahlquelle ist ein Aluminium Blech (2 mm) Genau Dicke ermitteln als Absorber aufgebaut. Das Blech ist rückseitig mit temperaturempfindlichen Sensoren bestückt, um die Strahlquelle bei Überschreitung der voreingestellten Temperatur sofort abzuschalten.

2.2.6 Konusglas Entnahme

Nachdem der WT gestoppt und positioniert wurde, wird das Konusglas über ein Zwei-Achs-Handling mit Sauggreifern nach oben entnommen und in eine Sammelbox abgelegt.

Beide Achsen des Handlings werden über Motoren bewegt, um die Flexibilität zu gewährleisten.

Zusätzlich verfügt die Hubachse über einen Teleskophub von etwa 50mm. Dieser soll verhindern, dass beim Aufsetzen des Greifers auf dem Monitor die Sauggreifer zu sehr gestaucht werden. Darüber hinaus wird die Abwärtsbewegung über einen Sensor gestoppt, sobald der Sensor bedämpft ist.

Der Greifer wurde mit mehreren Saugern ausgestattet, da nicht garantiert werden kann, dass immer alle Sauger auf dem Konusglas gleichmäßig aufliegen. Die Sauger wurden mit Strömungsventilen ausgestattet, die bei nicht belegtem Sauger die Vakuumleitung verschließen.

2.2.7 Anlagenbestückung

An die Entnahmestation des Konusglas auf dem rückführenden Förderband schließt sich der Handarbeitsplatz zur Entnahme und Bestückung der WT an.

Hier entnimmt der Werker die Lochmaske aus dem Schirmglas und entsorgt sie in einer dafür bereitstehenden Box. Dann wird das Schirmglas in einer Absaugkabine (Abzugskabine) abgelegt. Jetzt kann der WT mit einem neuen Monitor bestückt werden.

Das Schirmglas von Kathodenstrahlbildröhren ist auf der Innenseite mit einer Leuchtpulverschicht, über die eine Aluminiumschicht aufgedampft wurde, beschichtet. Diese Beschichtung (toxische Stäube) muss für das Recycling entfernt werden. Zu diesem Zweck wird das Schirmglas vom Werker in eine Abzugskabine gelegt. Eine Absaugung sorgt dafür, dass Umgebungsluft in einem leichten Luftstrom in die Absaugkabine gesaugt wird. Der Werker kann durch eine Öffnung in die Kabine greifen und mit einem speziellen Sauger die Beschichtung entfernen. Durch den leichten Luftstrom in die Kabine wird verhindert, dass freiwerdende Staubpartikel in die Umgebungsluft gelangen.

2.2.8 Steuerungssystem

Es war das Ziel bei der Konzeption des Steuerungssystems, mit einem standardisierten und in der Anlagenautomatisierung üblichen Aufwand eine prozesssichere Lösung zu entwickeln.

Dabei musste ein Kompromiss zwischen den wissenschaftlichen Anforderungen eines Laborbetriebes und den rauen Bedingungen im direkten Einsatz bei einem Recyclingbetrieb gefunden werden.

Aus diesem Grunde wurde eine Anlagensteuerung gewählt, bei der eine handelsübliche SPS (Simatic S7-300) den zentralen Punkt darstellt und den gesamten Ablauf und die Steuerung der verschiedenen Komponenten verwaltet.

Die hohen Anforderungen an den gesamten Prozess, erfordern zusätzlich den Einsatz weiterer Steuerungskomponenten und Sensoren.

Die Verknüpfung der Systeme ist in der folgenden Zeichnung schematisch dargestellt.

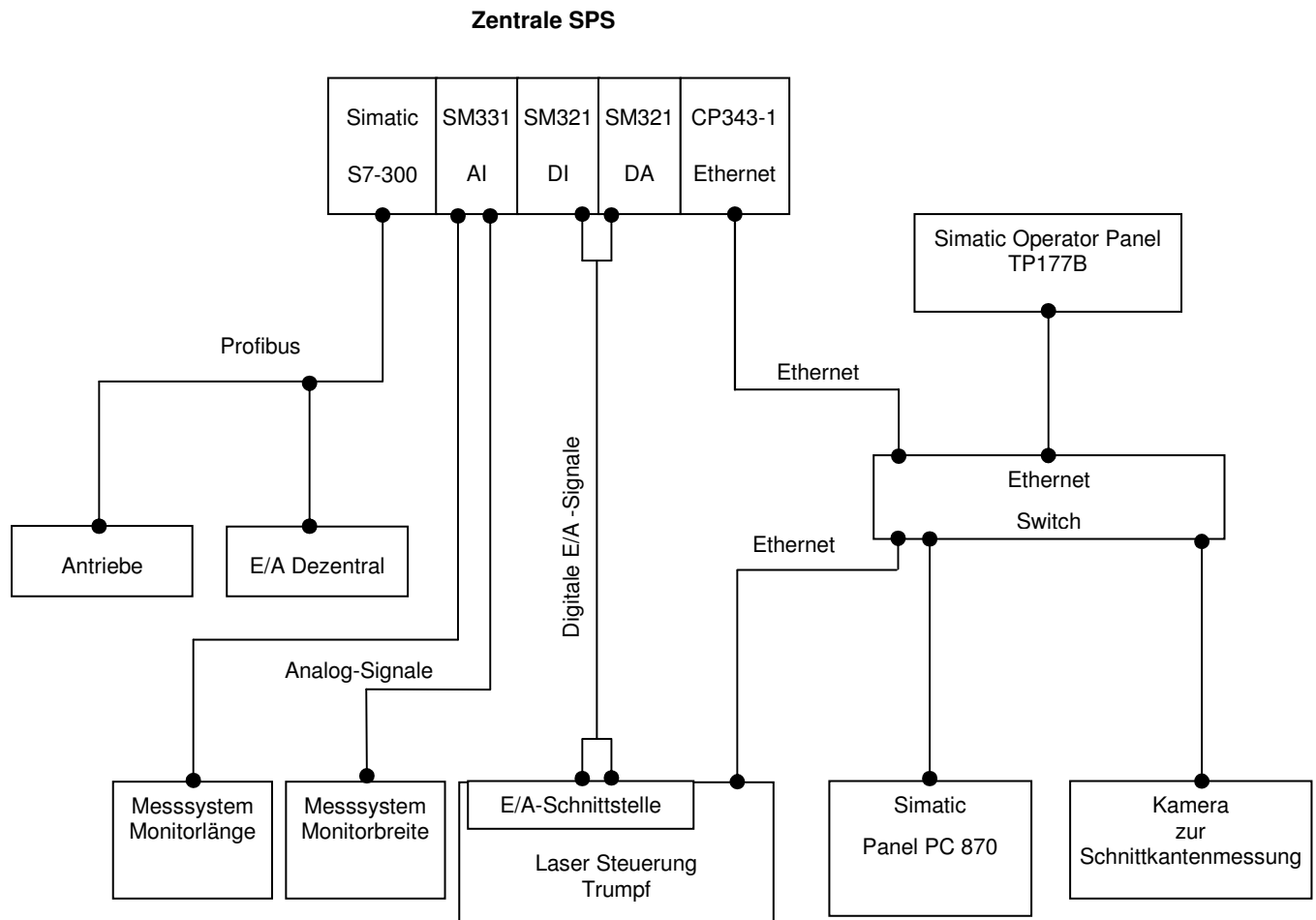


Abb. 11: Verknüpfungskonzept der Gesamtanlage

Im Zusammenspiel der Gesamtanlage verteilen sich die Aufgaben auf die einzelnen Komponenten folgendermaßen:

2.2.8.1 SPS

Eine Basisaufgabe der SPS ist die Erfassung der Signale der angeschlossenen Sensorik und Messwertaufnehmer sowie die Steuerung der gesamten Fördertechnik mit Werkstückträgern, Handling, Zuführung und Zentrierstation.

Außerdem wurde die SPS so programmiert, dass während des eigentlichen Laservorgangs die Drehgeschwindigkeit des Monitors so berechnet und gesteuert wird, dass abhängig von der aktuellen Winkellage des Monitors zum Laser ein konstanter und optimaler Wärmeeintrag in den Trennbereich des Monitors gewährleistet wird.

Dabei nutzt die SPS nicht nur die während des Bearbeitungsprozesses kontinuierlich in Echtzeit erfassten Winkelstellungen des Werkstückes, sondern greift auch auf die in vorgelagerten Prozessschritten aufgenommenen Geometriedaten zurück.

Das Ergebnis ist ein Prozess, der trotz unterschiedlichster Geometrien der zu trennenden Monitore automatisch und ohne den Eingriff vom Bedienpersonal abläuft.

2.2.8.2 Operator Panel

Als Bedienerschnittstelle dient ein Simatic Operator Panel „TP177B“, welches über Ethernet mit der SPS verbunden ist. Es dient zur Anzeige von Meldungen und Störungen, die während des Anlagenbetriebs auftreten können. Außerdem ist die Bedienung der Gesamtanlage von hier aus, sowohl im Automatik-, als auch im Handbetrieb möglich.

Die Einstellung der Prozess- und Anlagenparameter, die einen optimierten Betrieb der Anlage gewährleisten, werden über dieses Operator Panel vorgenommen.

2.2.8.3 Panel PC

Ein im Schaltschrank der Gesamtanlage integrierter Simatic Panel- PC 870 dient zur Parametrierung der Lasersteuerung und zum Betrieb des Lasers im Handbetrieb. Via Ethernet ist es mit diesem möglich, verschiedenste Leistungsverläufe des Laservorgangs zu parametrieren und zu testen. Außerdem kann darüber eine detaillierte Analyse aufgetretener Störungen durchgeführt werden.

Die ebenfalls über Ethernet an die Steuerung angeschlossene Kamera zur Trennkantenmessung kann gleichermaßen von diesem PC aus parametriert werden. Zusätzlich kann im Monitorbetrieb der Kamera auch die aktuelle Messung verfolgt werden.

2.2.8.4 Lasersteuerung

Über die in der Lasersteuerung integrierte „Parallele – I/O“ Schnittstelle wird das Lasergerät von der Anlagen-SPS im Automatikbetrieb gesteuert und deren Status erfasst.

Die Einstellung sowie der Handbetrieb des Lasergerätes erfolgt über den oben beschriebenen Panel PC.

2.2.8.5 Rahmen zur Zentrierung und Vermessung der Monitore

Vor der Bearbeitung der zu trennenden Monitore werden diese über einen Ausrichtrahmen mit beweglichen Backen mittig auf dem Werkstückträger zentriert. Direkt in den Zylindern für die Zentriervorrichtung sind Wegmesssensoren integriert, die die Breite und Länge der Monitore erfassen, und über Messwertumformer und analoge Signale die Werte an die Anlagen-SPS übertragen.

Anhand dieser Werte ist im später folgenden Lasertrennvorgang die Anlagen-SPS in der Lage, Monitorgrößen- abhängig die Drehzahl und die Laserdauer automatisch zu berechnen.

2.2.8.6 Kamera zur Erfassung/ Messung der Monitor Fügenaht

Für den Lasertrennvorgang der Monitore ist es wichtig, die genaue Höhe der Fügenaht zwischen Front und Konusglas zu ermitteln. Daher ist in der Zentrierstation eine Kamera installiert.

Nach dem Absenken und Fixieren des Monitors auf dem Werkstückträger wird die Kamera aktiviert. Diese ermittelt anhand vorher gespeicherter Referenzbilder und Suchparameter die jeweilige Höhe der Fügenaht in Bezug zum Werkstückträger. Nach der Erfassung des Wertes wird dieser via Ethernet zur SPS übertragen und dort zwischengespeichert.

Beim Einlaufen des Werkstückträgers in die später folgende Laserstation wird der Wert wieder geladen. Anhand dieses Wertes wird der Laser- Bearbeitungskopf in vertikaler Position so positioniert, dass der Laserstrahl unterhalb der Fügenaht auf das Frontglas trifft. Die Höhendifferenz zwischen gemessener Fügenahthöhe und des Laserspots auf dem Glas kann als Variable über das Operator Panel geändert werden.

2.2.8.7 Servoantriebe

In der Laserstation kommen Servoantriebe mit Absolutwertgebern zur Anwendung. Über Profibus sind die Antriebsumrichter mit der Anlagen-SPS verbunden.

a. Hubeinheit zur vertikalen Positionierung des Bearbeitungskopfes

Nach Einlauf eines Werkstückträgers mit Monitor in die Laserstation und Aushub vom Band, ist es notwendig, den Laser- Bearbeitungskopf vertikal so zu positionieren, dass der Laserspot unterhalb der Monitor-Fügenaht auf das Frontglas trifft. Dies wird mit einem Servoantrieb und der dazugehörigen Lineareinheit erreicht.

b. Zustellung Bearbeitungskopf horizontal

Mit diesem Servoantrieb und der dazugehörigen Lineareinheit, ist es möglich, den Bearbeitungskopf des Lasers aufgrund der unterschiedlichen Geometrien der Monitore immer relativ nah am Monitor zu positionieren. Die beim Projekt gewonnenen Erkenntnisse zeigten aber, dass auf die horizontale Zustellung des Lasers zum Monitor verzichtet werden kann. Hierbei kann die Eigenschaft des Bearbeitungskopfes genutzt werden, dass der Spotdurchmesser des Lasers zwischen kleinstem und größtem Bearbeitungsabstand nur geringfügig variiert.

c. Drehung Werkstückträger mit Monitor

Der Servoantrieb für die Rotation des Monitors in der Laserstation erfasst über den in den Motor integrierten Absolutwertgeber den aktuellen Drehwinkel des Monitors. Dieser Wert wird über Profibus zur SPS übertragen. Die SPS berechnet hieraus anhand der Soll-Umfangsgeschwindigkeit, der Monitorgeometrie und weiterer Faktoren eine Drehgeschwindigkeit, die in Echtzeit wieder an den Umrichter übergeben wird.

Um ein besseres Bild von den Trennergebnissen zu erhalten, wurden die Schnittkanten des Frontglases direkt im Anschluss von Laser-Trennvorgängen mit einer Infrarot- Wärmebildkamera aufgenommen.

Dabei wurde festgestellt, dass im Bereich der gerundeten Eckbereiche trotz der geregelten, konstanten Umfangsgeschwindigkeiten eine niedrigere Temperatur vorlag als an den geraden Seiten. In diesem Zusammenhang ist auch zu sehen, dass die Trennergebnisse im Bereich der Ecken schlechter waren als an den geraden (leicht geschwungenen). Wiederholt war zu erkennen, dass in diesem Bereich Teile vom Konusglas mit Resten der Fügenaht stehen blieben.

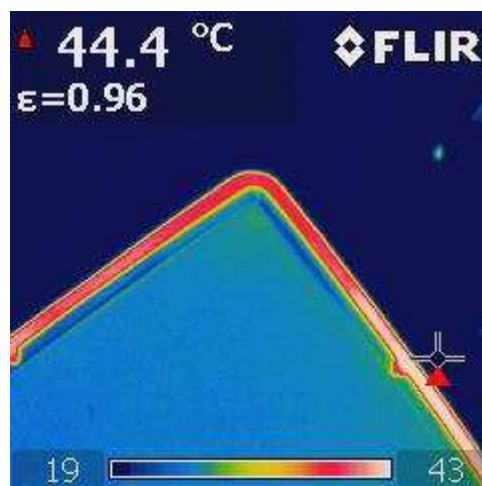
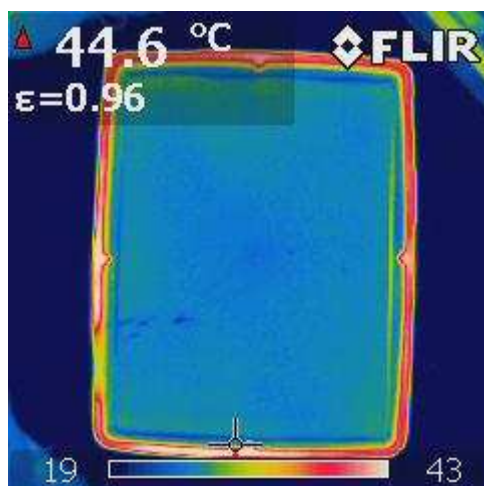


Abb. 12: Aufnahme Trennbereich mit einer Wärmebildkamera; Prozess mit konstanter Umfangsgeschwindigkeit

Als Konsequenz wurde ein zusätzlicher Faktor in die Berechnung der Umfangsgeschwindigkeit eingebracht, der die Geschwindigkeit direkt im Bereich der Ecken reduziert. Hiermit konnte ein höherer Wärmeeintrag in die Eckbereiche erreicht werden, was zu einem verbesserten Trennverhalten der Monitore im Eckbereich führte.

2.2.8.8 Gesamtanlage

Der Antrieb des Fördersystems mit den Förderketten für die Werkstückträger erfolgt über Drehstromasynchronmotoren mit Getrieben. Die Fördergeschwindigkeiten sind durch die Getriebeübersetzungen fest vorgegeben.

Die Geschwindigkeit der Querförderer wird mittels dezentraler Frequenzumrichter mit integrierter Feldbuschnittstelle für Profibus von der Anlagen- SPS geregelt.

Die Steuerung stellt bei Strom- oder Steuerungsdruckausfall die Beendigung aller gefährlichen Bewegungen und die Aufrechterhaltung des Spanndrucks in Spannvorrichtungen durch Rückschlagventile an pneumatischen Antrieben sicher.

Bei der erneuten Versorgung mit elektrischem Strom oder Steuerdruck werden alle gefährlichen Bewegungen ausgeschlossen.

2.3 Laserbearbeitungskopf

Das Gehäuse des Bearbeitungskopfes ist auf Industriebedürfnisse angepasst und optimiert worden. Es ist komplett abgedichtet und muss mit Überdruck beaufschlagt werden, so dass das Eindringen von Staub verhindert wird. Die Austrittsoptik der Laserstrahlung ist mit einem Luftvorhang (cross jet) versehen, um einen Schutz gegen Partikel aus der Umgebung zu erreichen.

Der Bearbeitungskopf erzeugt nach Anschluss an die Lichtleitfaser des Lasers einen Ausgangstrahldurchmesser von $D_2 = 7 \dots 12$ mm. Die Auslegung der Strahlformungsoptiken macht eine leichte Modifikation hinsichtlich dem alternativen Einsatz von Faserankopplungsoptiken mit gängigen Strahldurchmessern von $D_1 = 25 \dots 60$ mm möglich und führt somit zu einer Eignung für Lichtleitfasern und Lasern diverser Hersteller (Abb. 13).

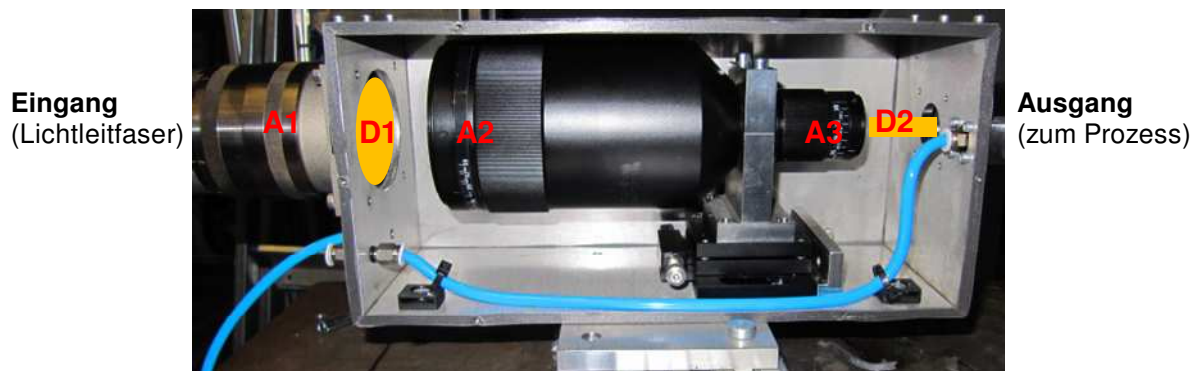


Abb. 13: Aufbau des Laserbearbeitungskopfes

Einsetzbare Laserstrahlquellen:

Der Bearbeitungskopf ist für cw-Laserstrahlquellen im Wellenlängenbereich von 1020 nm bis 1100 nm konzipiert.

Einsetzbare Leistungen:

Der Bearbeitungskopf ist für eine maximale Laserleistung von $P_{\max} \leq 1000 \text{ W}$ bei konzipiert.

Kühlung:

Der Laserbearbeitungskopf ist in das Kühlsystem der Lichtleitfaser integriert.

Druckluft:

Der Bearbeitungskopf wird mit ölfreier Druckluft betrieben. Der Anschluss für Gehäuse und Luftvorhang wird über Druckminderer separat durchgeführt. Der maximal zulässige Innendruck beträgt $p = 0,5 \text{ bar}$.

Justage der Strahlausbreitung

Um eine effiziente Bestrahlung der Fügezone zu erreichen ist die Strahlachse im Vorfeld zu justieren (Abb. 14).

Über die Justageschrauben B,C,D kann die notwendige Verkippung (Taumelung) und Höhenpositionierung eingestellt werden.

Über die Justageschraube A kann das gesamte Optiksystm bei gelöster Schraube F rotiert werden. Nach Erreichen der gewünschten Position ist mit der Feststellschraube F die Optik zu arretieren.

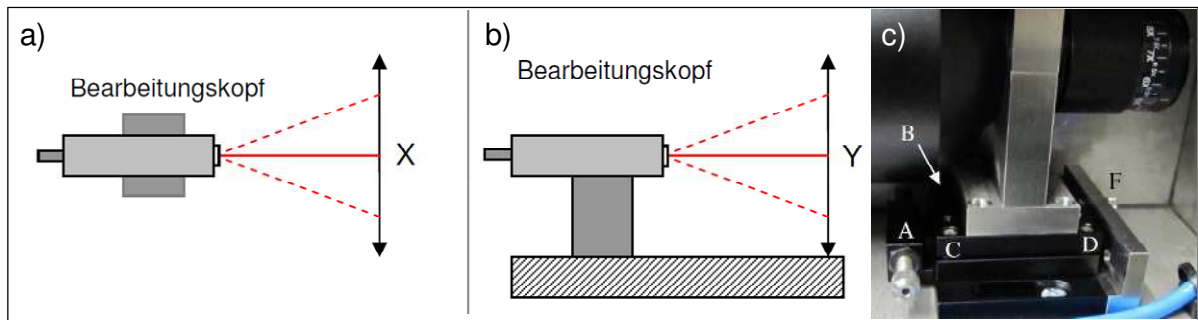


Abb. 14: Justage der Strahlachse,
a) Draufsicht, b) Seitenansicht, c) Lage der Einstellschrauben

2.4 Konstruktionsrichtlinien

Die Anlage wurde so ausgelegt, dass ein Optimum an Standzeit, Nutzungszeit und Verfügbarkeit erreicht wird und Reinigungs- und Wartungsaufwand sowie Energie- und Materialverbrauch so gering wie möglich sind.

Aus Gründen der Ersatzteilhaltung wurden gleichartige Baugruppen mit gleichen Aggregaten und Maschinenelementen ausgestattet. Die Vielfalt der verwendeten Typen wurde so gering wie möglich gehalten. Alle verwendeten Komponenten dürfen nur im Urzustand, ohne jegliche Veränderung verbaut werden.

Die Anlage wurde reparaturfreundlich ausgelegt. Leichte Zugänglichkeit und schnellst-mögliche Austauschbarkeit von Anlagen und Anlagenteilen sind im Reparaturfall durch Verstiftung gewährleistet. Aufnahmen von Werkstücken wurden grundsätzlich in gehärteter Form ausgeführt.

Zylinder wurden nach der DIN ISO 6432, 15552 und 21287 verwendet, wobei der Kolbenhub bevorzugt als Standardhub ausgelegt wurde. Alle Zylinder wurden mit einstellbaren Endlagendämpfungen und Ausgleichkupplungen ausgerüstet. Schräg- und Vertikalbewegungen von Zylindern wurden so abgesichert, dass ein selbsttätiges Verlassen der Endlage ausgeschlossen ist.

Teile werden vom Transportsystem auch bei NOT-AUS oder Energieausfall sicher gehalten.

Monostabile Ventile wurden nur an den Stellen eingesetzt, an denen keine gefährlichen Bewegungen gesteuert werden.

Schutzverkleidungen und -hauben ermöglichen die Beobachtung der Funktion und wurden daher mit Schauöffnungen versehen. Die Befestigung von Abdeckungen wird über Schnellverschlüsse realisiert, um Wartungs- und Einstellarbeiten zu minimieren.

Laufflächen der Werkstückträger wurden mit auswechselbaren Verschleißleisten ausgerüstet. Laufleisten und Führungen sind auswechselbar.

Bei Energieketten sind die Stege einseitig zu öffnen, um den Austausch von Kabeln oder Schläuchen im eingebauten Zustand zu ermöglichen. Die Anschlusselemente wurden mit Kettenkamm zur Zugentlastung versehen, um eine Befestigung der Kabel und Schläuche zu ermöglichen.

Festanschlüge bei Verfahrenseinheiten wurden konstruktiv so angeordnet, dass sie nicht im Spänebereich liegen. Die Verstellung ist ohne Demontage leicht zugänglich. Festanschlüge wurden grundsätzlich in gehärteter Ausführung verwendet.

Alle Bauteile wurden durch Farbgebung dauerhaft gegen Korrosion geschützt. Die Typenschilder der eingesetzten Komponenten z.B. Motore, Zylinder, usw. sind ohne Demontage der Bauteile lesbar sein. Ggf. wurde ein zweites Typenschild angebracht.

2.5 Technische Daten

Monitorgrößen

Auf der entwickelten Anlage können nahezu alle gängigen Monitorgrößen zwischen 12 und 36 Zoll getrennt werden. In Tabelle 3 sind die zulässigen Monitorgrößen in mm gemäß Abb. 15 angegeben.

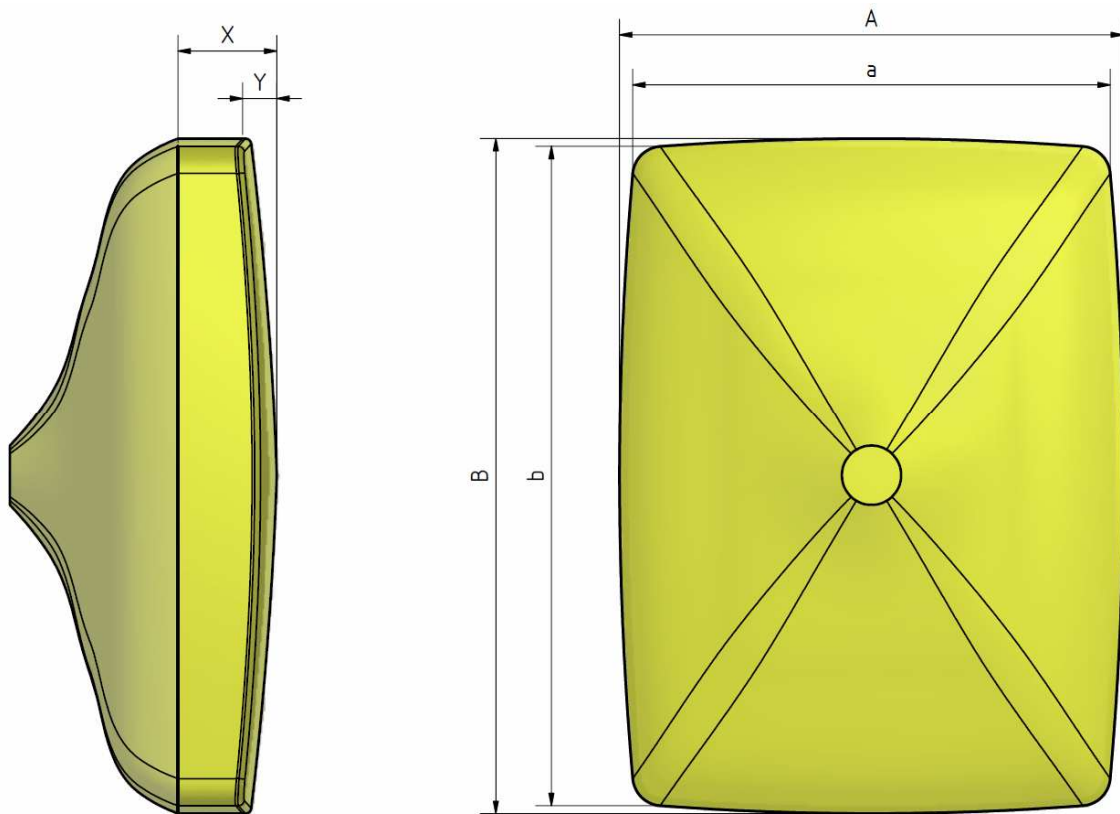


Abb. 15: Schematische Darstellung des Monitors

Tabelle 3: Trennbare Monitorgrößen, Angaben in mm

	X	Y	A	B	a	b
1	35	20	220	275	202	255
2	40	8	235	295	225	290
3	70	25	245	315	235	310
4	80	25	285	360	265	350
5	90	20	350	450	345	445
6	80	35	405	505	395	500
7	90	20	405	520	395	515
8	100	25	450	580	445	565
9	100	25	450	575	440	560
10	125	40	550	690	530	680
11	115	25	470	595	445	590
12	110	25	520	700	520	665
13	130	30	585	788	585	665

Alle Masse sind mit einer Toleranz von ± 3 mm zu betrachten.

Laserquelle

Als Laserquelle wurde ein Festkörperlaser vom Typ Trumpf HLD 1201 mit einer verfügbaren Laserleistung von 1200 W eingesetzt.

Größe der Anlage, notwendige Anschlüsse

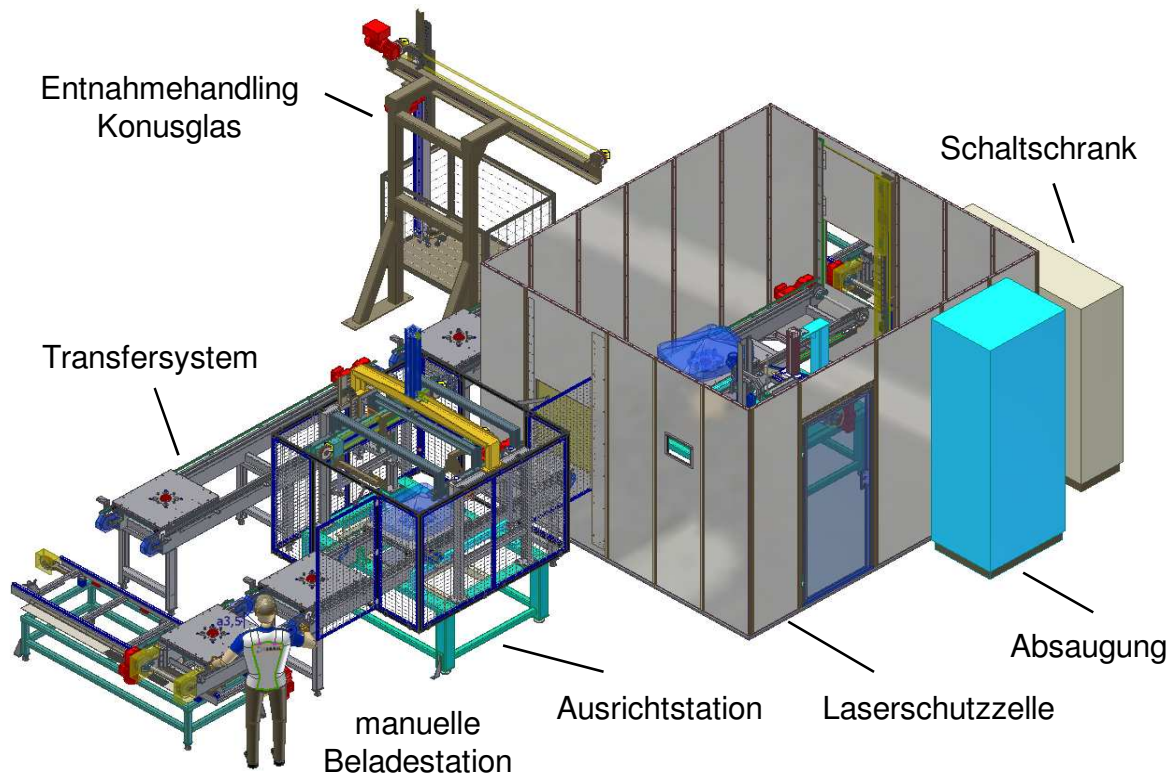


Abb. 16: Aufstellplan der Gesamtanlage

Aufstellfläche der Gesamtanlage:	ca. 10 x 5 m ²
Elektrische Anschlussleistung:	3 x 400 V (16 A)
Druckluft:	6 bar, ölfrei
Kühlwasser (Leitungswasser):	ca. 1 m ³ /h

2.6 Angaben zum Sicherheitsumfang

Insbesondere sind folgende Vorschriften zu beachten:

- Maschinenrichtlinie (89/37/EG),
- Niederspannungsrichtlinie (73/23/EWG),
- EMV – Richtlinie (89/336/EWG).

Neben den drei EG- Richtlinien sind folgende harmonisierende Normen zu berücksichtigen:

- DIN EN 294 Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefahrenstellen mit den oberen Gliedmaßen,

- DIN EN ISO 12001 – 1 Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze – Teil 1: Terminologie, Methodologie,
- DIN EN ISO 12001 – 1 Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze – Teil 2: Technische Leitsätze,
- DIN EN 349 Mindestabstände zur Vermeidung des Quetschens von Körperteilen
- DIN EN 953 Trennende Schutzeinhausungen,
- DIN EN 954 – 1 Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen,
- DIN EN 60204 – 1 Elektrische Ausrüstung von Maschinen, Teil 1 Allgemeine Anforderungen.

3 Erzielte Ergebnisse

Die Fa. Exitcom Recycling GmbH hatte sich als potenzieller Endanwender zu Beginn des Vorhabens bereit erklärt, die entwickelte Anlage zu testen. Hierzu wurden seitens Exitcom ca. 700 ausgediente Bildröhren zur Verfügung gestellt. In Absprache mit der Fa. Exitcom wurden die Tests beim Anlagenhersteller Dönmez durchgeführt.

Durch die klare Trennung zwischen manuellen und automatisierten Arbeitsschritten konnte die Einarbeitung der Maschinenbediener in sehr kurzer Zeit (weniger als 30 Min.) erfolgen. Das Anlagenkonzept ist klar strukturiert und damit für die Bediener nahezu intuitiv zu erfassen. Eine Gefährdung des Personals durch die Laserstrahlung wird durch vollständige Kapselung des Trennprozesses ausgeschlossen. Gegebenenfalls vorhandene Bedenken der Bediener gegenüber der Laserstrahlung waren nach wenigen Testzyklen abgebaut.

Mit einer Strahlleistung von 1000 W konnten alle Monitorgrößen erfolgreich getrennt werden. Die Taktzeiten der Anlage variieren je nach Monitorgröße zwischen 30 Sekunden (Bildschirmdiagonale bis 17 Zoll) und 60 Sekunden (Bildschirmdiagonale größer 19 Zoll).

Die Prozessfähigkeit der neuen Anlage entspricht industriellen Anforderungen. Nachdem die Prozessparameter richtig eingestellt waren, sind bei den folgenden Trennversuchen keine Störungen mehr aufgetreten. Damit wird eine deutliche Verbesserung gegenüber den konventionellen Anlagen erzielt. Beim Trennen mittels Heizdraht oder Säge führen im Wesentlichen zwei technische Randbedingungen zu einer nicht akzeptablen Prozessfähigkeit. Um ein Durchbrennen des Heizdrahtes zu verhindern, muss ein Anliegen des Drahtes an das Glas gewährleistet sein. Das Auswechseln der Heizdrähte ist vergleichsweise aufwendig und führt zum Stillstand der Anlage für mehrere Minuten. Beim Sägeverfahren werden stark abrasive Glasstäube frei und führen zu einem erhöhten Verschleiß der bewegten mechanischen Teile in der Anlage. Die tatsächliche Verfügbarkeit der konventionellen

Anlagen ist daher stark eingeschränkt und genügt nicht den industriellen Erfordernissen.

4 Bewertung

Ökologisch-technologische Bewertung

Das thermisch induzierte Spannungstrennen mittels Festkörperlaser ist erfolgreich realisiert worden. Durch die exakte, lokal definierte Erwärmung wird ein durchgehender Riss im Umfang des Werkstückes erzielt. Grundlage hierfür sind thermisch induzierte Spannungen durch Einsatz von Laserstrahlen im Wellenlängenbereich von ca. $1\mu\text{m}$.

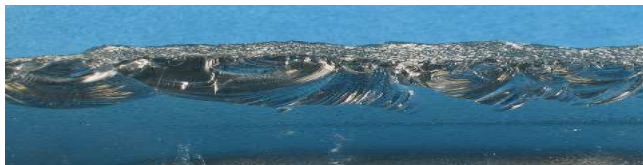


Abb. 17: Trennergebnis mittels Sägeverfahren

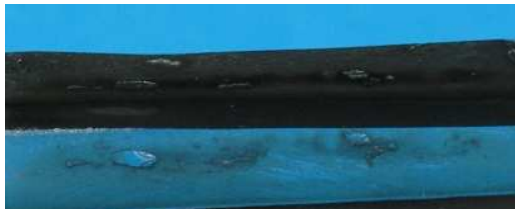


Abb. 18: Trennergebnis mittels Laserverfahren



Abb. 19: Vollständig lasergetrennte CRT
(Konus- und Schirmglas)



Abb. 20: Vollständig lasergetrennte CRT
(Konus- und Schirmglas)



Abb. 21: Lasergetrennte CRT
(Schirmglas mit Lochmaske)



Abb. 22: Lasergetrennte CRT



Abb. 23: Lasergetrennte Kante einer CRT



Abb. 24: Vollständig lasergetrennte CRT (Konusglas)

Der neuartige Trennprozess zeichnet sich besonders durch die berührungslose, verschleißfreie Bearbeitung ohne Materialabtrag aus. Dadurch wird eine qualitativ hochwertige, vollständige Trennung von Konus- und Schirmglas ermöglicht, ohne dass dabei Material verdampft bzw. abgetragen wird. Es entstehen keine Materialverluste, die zu einer Verunreinigung führen könnten. Folglich handelt es sich um ein absolut emissionsfreies Trennverfahren.

Der Bediener ist keinem Gesundheitsrisiko mehr ausgesetzt. Umweltgefährdende Stäube müssen nicht aufwändig abgesaugt und entsorgt werden. Es ergibt sich eine präzise, sortenreine Zerlegung in wieder verwertbare Einzelkomponenten.

Für eine exakte Bilanzierung der ökologisch relevanten Faktoren fehlt leider die notwendige Datenbasis. Hierzu kann allenfalls eine Abschätzung vorgenommen werden.

Je nach Größe und Alter der Bildröhre enthält das Konusglas zwischen 12 und 25% Bleioxid. Werden als Mittelwert 18% angenommen, enthält das gesamte Bildröhrenglas 6% Bleioxid.

Bezogen auf Deutschland fallen jährlich etwa 120.000 t Bildröhrenglas an. Unter der Annahme, dass bei konventionellen Trennverfahren etwa 1% des Glasgewichtes als Stäube anfallen und etwa 20% der Glasmenge nicht sortenfrei getrennt wird, ergibt sich folgendes Szenario.

Es fallen derzeit jährlich etwa 1.200 t Glasstäube (Anteil Bleioxid: 72 t) an, die aufwändig abgesaugt und gefiltert werden müssen, um eine Gefährdung der Werker auszuschließen. Durch das neue emissionsfreie Trennverfahren entfallen diese Stäube vollständig.

Es fallen derzeit jährlich etwa 24.000 t nicht sortenfrei getrennte Glasscherben (Anteil Bleioxid: 1.440 t) an. Bezüglich der Sortenreinheit beim Trennen wird mit dem neuen Verfahren eine Prozesssicherheit von über 95% erreicht.

Bezogen auf Europa ergeben sich Mengenangaben, die etwa um das fünffache höher sind als die Zahlen für Deutschland.

Bei einer konservativ geschätzten Marktdurchdringung dieser neuen Technologie von anfänglich 10% im europäischen Raum ergeben sich folgende Umweltentlastungen:

- Reduktion der bleihaltigen Glasstäube um 600 t pro Jahr und
- Verringerung des zu deponierenden bleihaltigen Glasvolumens um über 9.000 t pro Jahr.

Ökonomische Bewertung

Konventionelle Anlagen auf der Basis einer Trenntechnik mit Heizdraht werden derzeit für ca. 100.000 € am Markt angeboten. Aufgrund der längeren Prozesszeit und des geringen Automatisierungsgrades beträgt die maximale Kapazität dieser Anlagen ca. 30 Stück/Stunde.

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Anlage wird aufgrund des höheren Automatisierungsgrades und der kostenintensiven Laserquelle einen Verkaufspreis von ca. 250.000 € haben. Mit einer Taktzeit von durchschnittlich 45 Sekunden kann eine Kapazität von 80 Stück/Stunde erreicht werden. Typischerweise wird in den entsprechenden Recycling-Betrieben einschichtig gearbeitet.

Unter der Annahme, dass die Anlagen über einen Zeitraum von fünf Jahren abgeschrieben und von einem angelernten Werker bedient werden, ergeben sich für die konventionelle Anlage Stückkosten in Höhe von ca. 0,95 € gegenüber 0,60 € für die neue, laserbasierte Anlage. Bei der Berechnung wurde ein um ca. ein Drittel höherer Energiebedarf der neuen Anlage berücksichtigt.

Werden darüber hinaus realistische Verfügbarkeiten der Anlagen angenommen (konventionell: 60%; laserbasiert: 80%) verbessert der Stückkostenvergleich zugunsten der neuen Anlage (konventionell: ca. 1,60 €/Stück; laserbasiert: ca. 0,75 €/Stück).



Quelle: gwg-GmbH

Abb. 25: Konventionelle Recyclinganlage für Bildröhren

5 Marketingmaßnahmen

Die Vermarktung der neuartigen lasergestützten Trennanlage ist mit großen Herausforderungen verbunden. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten ist die Betonung von Umweltschonung, Ressourcengewinnung und niedriger Taktzeit und der damit verbundenen Wirtschaftlichkeit in den Vordergrund zu rücken.

Im Vorfeld wurde bereits ein Artikel im Recycling Magazin [5] veröffentlicht, aus dem die Vorteile klar hervorgehen. Dieser Artikel ist auch als Download erhältlich [6].

Durch die Darstellung des innovativen Verfahrens auf der Webseite der Firma Dönmez Sondermaschinenbau [7] wurden einige Interessenten aufmerksam, die die Anlage bereits besichtigt haben (Hellmann Process Management GmbH & Co. KG/Osnabrück; Exitcom Recycling GmbH/Lehrte, BHS Sonthofen GmbH/Sonthofen, Adamec Recycling GmbH/Fürth, CRT Recycling/Chelmek-Polen, Adelman Umwelt GmbH/Karlstadt). Darüber hinaus wurden bereits 40 durch gezielte Internetrecherche ermittelte potentielle Interessenten im In- und Ausland per E-Mail oder Post kontaktiert. Dazu gab es auch Rückmeldungen. Bei diesen Kontakten wird im Oktober 2010 noch einmal nachgefasst.

6 Fazit

Die Zielsetzung des Projektes, nämlich Entwicklung und Test einer modellhaften laserbasierten Anlage für das umweltentlastende Recycling von Kathodenstrahl-Bildröhren wurde erfolgreich umgesetzt.

In Kooperation mit einem potenziellen Endanwender wurden in Testreihen ca. 700 ausgediente Bildröhren unterschiedlicher Größen auf der Anlage getrennt. Die Güte des Trennprozesses wurde visuell bewertet. Folgende Ergebnisse können festgestellt werden:

- Der laserbasierte Trennprozess ist absolut emissionsfrei, bisher auftretende bleihaltige Glasstäube und –scherben entfallen vollständig.
- Die Bildröhre kann präzise in die Komponenten Konus- und Schirmglas getrennt werden, eine sortenreine Weiterverwendung der Gläser wird damit sichergestellt.
- Die mittlere Taktzeit der laserbasierte Anlage konnte um mehr als 60% gegenüber den konventionellen Anlagen gesenkt werden.
- Die neue Anlage erzielt durch den Einsatz der Lasertechnologie gegenüber den konventionellen Anlagen eine erheblich höhere Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.
- Die Stückkosten für den Trennvorgang einer Bildröhre verringern sich um mehr als 30% gegenüber den konventionellen Anlagen.
- Die entwickelte Anlage entspricht den aktuellen Normen und Regeln der Technik, etwaige Vorbehalte der Werker gegenüber der Lasertechnologie konnten nach kurzer Zeit ausgeräumt werden.

Technologisch betrachtet lässt sich die Taktzeit durch den Einsatz einer leistungsstärkeren Laserquelle noch weiter verringern. Demgegenüber steht jedoch die Tatsache, dass die Kosten für stärkere Laserquellen überproportional ansteigen, so dass eine weitere Taktzeitverringern nur zu Lasten der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu erzielen ist.

7 Quellennachweise

- [1] Academic dictionaries and encyclopedias: Gefahr und Chance Stand: 15.06.2010, URL: <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/385219>

- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Ziele und Inhalte des Gesetzes über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG) Stand: 12.06.2010, URL: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/elektrog_ziele_inhalte.pdf

- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Sachstand und Gesetzgebung: Grenzüberschreitende Abfallverbringung, Stand: 12.06.2010, URL: <http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/downloads/doc/2042.php>

- [4] LAGA Bund Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31, Anforderungen zur Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten September 2009, S. 43, 7.1.4.7; S. 45, 7.2.2

- [5] Recycling Magazin: Ausgabe 01 vom 11.01.2010, S. 24, Glastrennung mit Festkörperlaser

- [6] Recycling Magazin, Online – Ausgabe 01/10, Glastrennung mit Festkörperlaser, Stand: 21.06.2010, URL: http://www.recyclingmagazin.de/rm/magazin_detail.asp?ID=121

- [7] Dönmez Sondermaschinenbau GmbH, Umweltfreundliche und leistungsstarke Trennung von Kathodenstrahlbildröhren, URL: <http://www.doenmez-sondermaschinenbau.de/index.php?site=static&staticID= Lasertrennanlage>

- [8] ZME Elektronik Recycling, Stand: 16.08.2010, URL: <http://www.zme-heuchelheim.de/bildroehren.htm>