

# Rapid Prototyping eingebetteter Systeme zur echtzeitfähigen Sortierung von Schüttgütern

Rüdiger Heintz, Robin Gruna, Thomas Längle, Günter Struck

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik  
und Bildauswertung IOSB, Abteilung Sichtprüfsysteme,  
Fraunhoferstr. 1, 76133 Karlsruhe  
{Ruediger.Heintz|Robin.Gruna|Thomas.Laengle|Guenter.Struck}  
@iosb.fraunhofer.de

**Zusammenfassung.** Sensorgestützte Sortiersysteme für Schüttgüter ergänzen oder ersetzen in vielen Bereichen die menschlichen Sichtprüfer. Durch stetige Erhöhung der Anzahl ausgewerteter Merkmale lassen sich immer komplexere Aufgaben lösen, jedoch steigen dadurch auch die Anforderungen an die Auswerteeinheit. Um die Zuordnung eines Klassifikationsergebnisses zu einem Schüttgutobjekt nicht zu verlieren, müssen der Sensor zur Informationsgewinnung und der Aktor zur Ausschleusung nah beieinanderliegen. Aktuelle Systeme verarbeiten Datenmengen von 60 MByte/s und müssen in 40 ms die Informationen klassifizieren bevor das Schüttgutobjekt den Aktor passiert. Diese Arbeit beschreibt eine modulare Architektur zum Aufbau unterschiedlicher Schüttgut Anwendungen, wobei die Echtzeit- und Synchronizitätsanforderung garantiert werden.

## 1 Einleitung

Um Schüttgüter wie Tee, Kaffee, Altglas, Bergwerkrohstoffe, Abfall usw. sortieren zu können hat sich die Prüfung während einer Flugphase durchgesetzt, da sich dadurch weitaus höhere Durchsätze erreichen lassen als eine Einzelbehandlung der Objekte. Je nach Materialeigenschaft werden die Objekte frei fallen gelassen, rutschen über eine Rinne oder werden von einem Transportband abgeworfen.

Abbildung 1 zeigt das Prinzip eines optischen Zweiklassensortierers mit Transportband. Über eine Zeilenkamera als Sensor werden Bildinformationen über die zu sortierenden Objekte gewonnen. Diese Informationen werden in der Rechereinheit ausgewertet und das Klassifikationsergebnis an einen Aktor, im dargestellten Beispiel eine Druckluftdüsenereinheit, gesendet.

Der kurze Zeitraum, innerhalb dessen sich ein Objekt vom Sensor zum Aktor bewegt, stellt eine harte Echtzeitanforderung dar, da ein Objekt nach Passieren des Aktors nicht mehr beeinflusst werden kann. Bedingt durch das unterschiedliche Flugverhalten der einzelnen Objekte fächert der Materialstrom auf. Dieses Auffächern reduziert die Treffgenauigkeit der Düsen und kann durch die gewonnenen Informationen der Zeilenkamera nicht vorhergesagt werden, weshalb ein

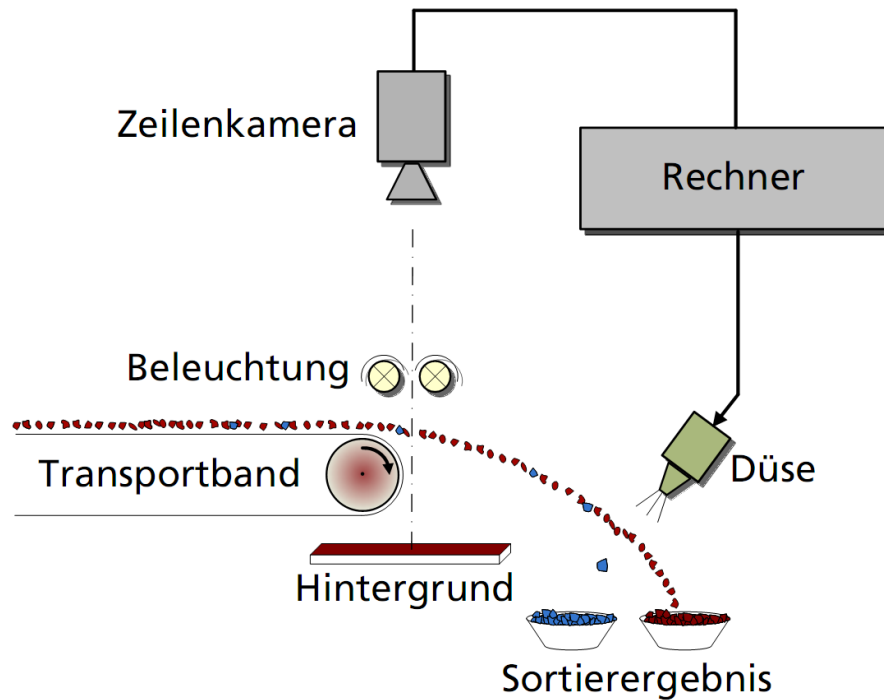


Abb. 1: Schematische Darstellung der Komponenten eines Bandsortierers

Optimierungskriterium in der Minimierung des Abstandes zwischen Sensor und Aktor besteht und somit die Echtzeitbedingung beeinflusst. Durch den konkreten Systemaufbau wird der Abstand zwischen Sensor und Aktor festgelegt, je nach Aufgabenstellung müssen zudem unterschiedliche Materialstromgeschwindigkeiten beherrscht werden. Bei der Prüfung im freien Flug ergibt sich bei einem Sensor-Aktor-Abstand von 120 mm und einer Materialstromgeschwindigkeit von 3 m/s eine maximale Reaktionszeit von 40 ms.

## 2 Stand der Technik

Je nach Aufgabenstellung findet die Informationsgewinnung in unterschiedlichen Spektren, zum Beispiel dem visuellen Spektrum [1–3], dem Nah-Infrarot Spektrum [4], dem UV Spektrum [5,6] oder dem Röntgenspektrum [7] statt. In jedem Spektralbereich sind im Allgemeinen unterschiedliche Sensoren zur Informationsgewinnung notwendig. Für die Auswertung der Bilddaten hat sich ein dreigeteilter Ansatz durchgesetzt. Im ersten Teil werden die Massendaten, typisch sind 60 MByte/s, durch unterschiedliche Vorverarbeitungsstufen wie Weißabgleich, Objektsegmentierung, Filteroperation usw. aufbereitet und die Datenmenge reduziert. In einem zweiten Schritt werden dann für die Objekte Merkmale ge-

wonnen und die Objekte anhand der Merkmale klassifiziert. Das Klassifikationsergebnis wird über ein Bussystem an die Aktorik (zum Beispiel einen Düsenballen) übergeben.

Diese Dreiteilung ermöglicht es, unterschiedliche Technologien zu verwenden. Die Verarbeitung der Massendaten lässt sich sehr effektiv auf einem Framegrabber mit programmierbaren FPGA realisieren. Die listenbasierte Merkmalsverarbeitung wird mittels eines Rechners realisiert. Die Ansteuerung der Ventile wird vom Rechner über einen Industriebus gesteuert. Die verwendeten Sensoren besitzen sowohl in Vorschubrichtung Y als auch quer dazu in X-Richtung meist eine höhere Auflösung als die Düsen. Daher werden die Ergebnisse von mehreren nacheinander aufgenommenen Sensorzeilen zu einer Ausblaszeile zusammengefasst.



Abb. 2: Sensorbox zur Sortierung von Sonderglas

Abbildung 2 zeigt eine Sensorbox, die für eine Sortierbreite von 1400 mm und einen Durchsatz von mehr als 10 Tonnen Glasbruch je Stunde eingesetzt wird. Eine solche Sensorbox enthält die komplette Optik, mehrere Kameras und die Embedded PC Rechneinheit.

Obwohl in Systemen zum Glasrecycling ähnliche Komponenten eingesetzt werden wie in der Konzentrierung von Mineralien in Minen, werden getrennte Entwicklungsplattformen verwendet. Wir stellen hier eine Entwicklungsplattform vor, die eine schnelle Entwicklung unterschiedlicher Sortieraufgaben erlaubt und zudem durch ihren modularen Aufbau einfach um neue Schnittstellen erweitert werden kann.

### 3 Systemaufbau

Die bereits geschilderte Unterteilung in Vorverarbeitung, Klassifikation und Ausschleusung wird in nahezu allen Schüttgutsystemen verwendet. Dieses Konzept wurde beibehalten. Es besteht die Gefahr der Verschachtelung von Systembedienung und Klassifikation, da beides im Rechner realisiert wird. Diesen unerwünschten Zusammenhang haben wir aufgelöst, um eine klare Trennung zwischen den einzelnen Softwarekomponenten zu erreichen.

#### 3.1 Vorverarbeitung

Wie bereits erwähnt wird hierzu eine Framegrabberkarte mit programmierbarem FPGA verwendet. Die Framegrabberkarte erfüllt harte Echtzeitanforderung, da sich die Gesamtverzögerungszeit anhand der Addition der einzelnen Verzögerungen der untereinander nicht rückgekoppelten Module ergibt. Die größte Verzögerungsschwankung wird bei der Segmentierung anhand der Farbe, also der Zuordnung eines Datenpunktes zu einer Objektklasse anhand des Farbwertes, erzeugt. Die Abbildung der 24 Bit Farbwerte auf die 8 Bit Attributwerte wird mittels einer Lookup-Tabelle in zwei DRAM Speichern realisiert. Die Lookup-Tabelle ist so ausgelegt, dass auch im schlechtesten Fall (bei jedem Zugriff wird eine andere Speicherzeile angesprochen) der notwendige Durchsatz von 60 MB/s erreicht wird.

Um eine schnelle Entwicklung zu ermöglichen, wurde ein grafisch programmierbarer Framegrabber verwendet. In einem Kooperationsprojekt mit dem Hersteller Silicon Software wurde die vorhandene Bibliothek des Herstellers um notwendige Komponenten für die Schüttgutsortierung erweitert. Durch eine Vielzahl von speziellen für die Vorverarbeitung entwickelten Operatoren ist eine einfache Anpassung an unterschiedlichste Anwendungen im Schüttgutbereich möglich.

#### 3.2 Softwarekomponenten

Bei den Systemkomponenten steht die Modularität im Vordergrund. Durch eine klare Trennung zwischen Bedienereingabe und Systemsteuerung lassen sich unterschiedliche grafische Benutzerschnittstellen für die gleiche Systemsteuerung entwickeln. Die Systemsteuerung kommandiert wiederum Unterprozesse für Bildaufnahme, Klassifikation, Bildanzeige, Statistik und Ausschleusung. Die Bedienereingabe und Systemsteuerung müssen keine hohen Echtzeitanforderungen erfüllen, da über sie nur das System in den korrekten Zustand versetzt wird. Die Sortierung läuft danach über die echtzeitfähigen Unterprozesse. Dadurch lassen sich für Systemsteuerung und Benutzerschnittstellen moderne, für effektives Programmieren ausgelegte Sprachen wie Python, C# oder Java verwenden.

Von den Unterprozessen existieren anwendungsspezifische Varianten mit gleicher Schnittstelle. Daher ist es möglich, durch Austausch einzelner Komponenten eine Anpassung an neue Aufgabenstellungen zu erreichen. Auch wenn Änderungen notwendig werden, sind diese einfach umzusetzen und zu testen, da sich durch die Schnittstellen eine klare Trennung der Funktionalität ergibt.

### 3.3 Ausschleusung

Die Ausschleusung wurde mechanisch, elektrisch und softwareseitig derart konzipiert, dass sich die Ventilanzahl und der Düsenabstand einfach variieren lassen. Zur Ansteuerung wird ebenfalls ein Unterprozess verwendet, welcher an den verwendeten Industriebus angepasst werden kann. Es existieren bereits Implementierungen für Ethernet, CAN Bus und Profibus. Im nächsten Kapitel wird erläutert, wie durch zusätzliche Informationskanäle eine besonders hohe Genauigkeit der Düsenansteuerung erreicht wurde.

## 4 Echtzeit- und Synchronisierungsanforderungen

Die Echtzeitanforderungen hängen von der Materialgeschwindigkeit  $v_m$  und der Strecke  $s_{sa}$  zwischen Sensor und Aktor ab. Durch den geeigneten Materialtransport wird erreicht, dass die Materialgeschwindigkeit auf der Strecke zwischen Sensor und Aktor als konstant angesehen werden kann. Die maximale Gesamtsystemreaktionszeit  $t_{gmax}$  des Systems ergibt sich daher mit:

$$t_{gmax} = \frac{s_{sa}}{v_m} \quad (1)$$

Ein Überschreiten der maximalen Gesamtsystemreaktionszeit führt dazu, dass keine Ausschleusung mehr erfolgen kann, da das auszuschleusende Material die Düsen bereits passiert hat. Treten die Überschreitung sporadisch und kurzzeitig auf, können diese je nach konkreter Sortieraufgabe akzeptiert werden, da sich das Sortierergebnis nur geringfügig verschlechtert. Daher genügt im Bereich der Schüttgutwendungen oftmals die Forderung nach weicher Echtzeit.

Zudem führt eine Reaktion unter  $t_{gmax}$  aber auch zu einem inkorrekten Verhalten, da auch bei zu frühem Ausschleusen das falsche Material ausgeschleust wird. Somit ergibt sich die Forderung nach Synchronisierung zwischen Sensor und Aktor.

Wie exakt die Synchronisierung erfolgen muss hängt von mehreren Parametern ab:

- Objektgröße
- Öffnungszeit  $t_0$

Die Öffnungszeit ist die Zeit, die eine Düse offen sein muss, um ein Objekt auszuschleusen. Es wird davon ausgegangen, dass es genügt, ein Objekt über seine halbe Länge zu treffen um es auszuschleusen. Somit ergibt sich:

$$t_0 = \frac{s_g}{2 \cdot v_m} \quad (2)$$

Da die Objektgröße schwankt, ergibt sich die minimale Öffnungszeit  $t_{0min}$  anhand des größten Objektes  $s_{gmax}$ . Die maximale Öffnungszeit  $t_{0max}$  ist die Zeit, in der eine Ausschleusung erfolgen kann, ohne das nächste Objekt zu beeinflussen. Zur Angabe dieser Zeit ist auch der minimale Abstand zwischen zwei Objekten  $s_{0min}$  zu beachten.

$$t_{0min} = \frac{s_{gmax}}{2 \cdot v_m} \quad t_{0max} = \frac{s_{gmin} + s_{0min}}{v_m} \quad (3)$$

Eine notwendige Bedingung vieler Schüttgutwendungen ist es, keine falschen Objekte auszublasen, den Beifang also zu minimieren. Daraus ergibt sich folgende Bedingung:

$$t_{0max} > t_{0min} \Rightarrow 2 \cdot (s_{gmin} + s_{0min}) > s_{gmax} \quad (4)$$

Da  $s_{0min}$  meist nahe bei Null ist und die zulässige Objektgrößenabweichung nahezu immer über dem Faktor drei liegt, ist diese Bedingung bei kaum einer Anwendung erfüllt.

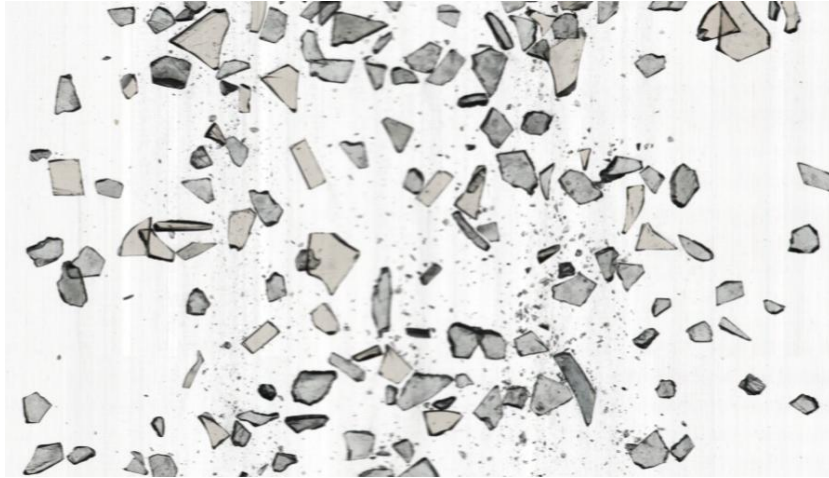


Abb. 3: Zu sortierender Materialstrom aus Altglas

Die Abbildung 3 aus dem Bereich des Glas-Recyclings zeigt ein Beispiel für  $s_{0min}$  gleich 0 und einem Faktor der Objektgrößenabweichung größer 4. Es sind extrem kleine Objekte zu erkennen, diese werden als Unterkorn klassifiziert und sind derzeit nicht zu sortieren. Auch sind Überdeckungen erkennbar, die beim Ausschleusen zu sogenanntem Beifang führen. Es gibt Ansätze, den Beifang durch optimiertes Ausblasen zu verhindern, diese lassen sich aber bis dato kaum umsetzen, da die Bestimmung von an die Objekte angepasste Signalverläufen für die Ausblasung sehr rechenintensiv ist und sich mit aktuellen Düsenauflösungen nicht realisieren lässt. Der Beifang wird daher über eine Vermeidung von Überdeckungen durch Optimierung der Materialaufgabe erreicht.

Da die Bedingung im Allgemeinen nicht erfüllbar ist, wird die Ventilöffnungszeit adaptiv anhand der Objektgröße festgelegt. Im Normalfall wird dann während der ganzen Fallzeit eines Objektes ausgeblasen, wodurch sich im adaptiven Fall  $t_{0adapt}$  ergibt mit:

$$t_{0adapt} = \frac{s_g}{v_m} \quad (5)$$

In realen Systemen kommt es zu veränderlichen Zeitverzögerungen, die zu zeitlichen Verschiebungen des Öffnungsfensters führen. Um die Nachbarobjekte nicht zu beeinflussen, sollte die zeitliche Verschiebung maximal zur Bebläsung von 1/4 der Objektlänge führen, da ansonsten ein nicht auszuschleusendes Objekt von beiden Seiten beblasen und somit ausgeschleust werden könnte. Es ergibt sich die maximale zeitliche Verschiebung  $t_{jitter}$  mit:

$$t_{jitter} = \pm \frac{s_{0min} + \frac{s_{gmin}}{4}}{v_m} \quad (6)$$

Zum Beispiel ergibt sich für eine minimale Objektgröße von 10 mm und erlaubter Berührung der einzelnen Objekte eine maximale zeitliche Verschiebung von  $\pm 0,83$  ms.

Alle konstanten Reaktionszeiten fließen in die Gesamtreaktionszeit und sind daher für die Echtzeitanforderung zu beachten. Für die Einstellung der Synchronisierung sind die konstanten Reaktionszeiten zu beachten; für die Synchronisierungsanforderung ist jedoch nur die maximal zulässige zeitliche Verschiebung von Bedeutung.

In realen Systemen besitzt der Sensor eine höhere Auflösung als die Aktorik. Realistische Werte sind eine Zykluszeit der Kamera von  $125 \mu\text{s}$  und eine minimale Öffnungszeit der Düsen mit 1 ms. Um die Datenmenge zwischen Rechner und Aktorik gering zu halten, werden daher zumeist die Ergebnisse von 8 Zeilen als Paket übertragen und die Düsen mit einer Taktzeit von 1 ms angesteuert, wodurch sich bereits eine zeitliche Verschiebung von mindestens  $\pm 0,5$  ms ergibt.

Durch Vorgabe synthetischer Sensordaten kann die Verzögerungszeit zwischen Sensor und Aktor gemessen werden. Die zeitliche Verschiebung wird anhand der Abweichung der Verzögerungszeit über einen längeren Zeitraum bestimmt. Wir verwendeten für unsere Messungen einen Zeitraum von einer Stunde.

## 5 Konzepte zur Synchronisierung von Sensor und Aktor

Um die im vorherigen Abschnitt diskutierten Anforderungen zu erreichen, sind verschiedene Konzepte zur Realisierung denkbar.

Bei einem einfach realisierbaren Systemaufbau wie in Abbildung 4 wird die Synchronisierung dadurch erreicht, dass beim Erhalt von Bilddaten im Rechner die aktuelle Zeit gespeichert wird und die Ausgabe am Bustreiber auf die gespeicherte Zeit synchronisiert wird.

Die Verzögerungszeit von der Kamera bis zum Rechner und vom Rechner zur Düse wird als konstant angenommen. In einem exemplarischen Testaufbau wurden zeitliche Verschiebungen von  $\pm 1,8$  ms ermittelt.

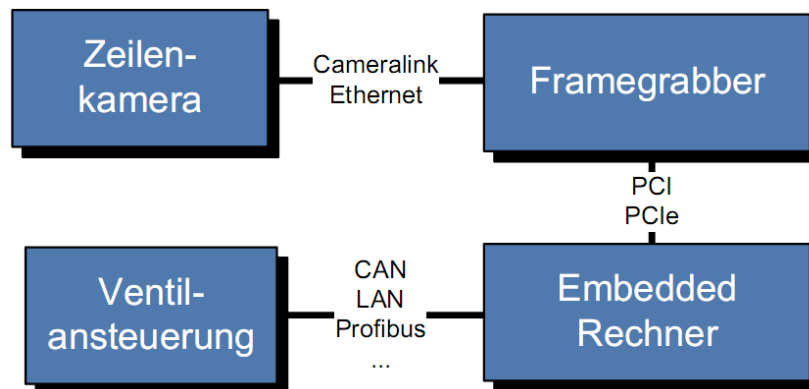


Abb. 4: Synchronisierung innerhalb des Rechners

Durch einen Zeilenzähler auf dem Framegrabber kann eine verbesserte Synchronisierung erreicht werden. Da die Zykluszeit der Kamera konstant ist, bildet der Zeilenzähler eine Zeitbasis. Durch die Differenz mit einem zweiten Zeilenzähler im Rechner kann die aktuelle Verzögerung bestimmt werden.

Die Registerabfrage zur Synchronisierung weist kaum zeitliche Schwankungen auf, wodurch sich die zeitliche Schwankung zwischen Kamera und Rechner reduziert. Im Testaufbau ergaben sich zeitliche Verschiebungen von  $\pm 1,5$  ms.

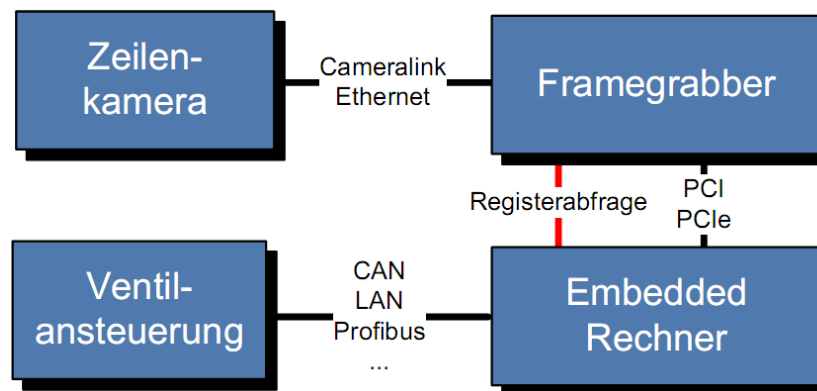


Abb. 5: Synchronisierung von Rechner und Framegrabber

Weitere Verbesserungen wurden durch ein neues Konzept erreicht, welches in Abbildung 6 skizziert ist. Hierdurch ist es möglich, eine direkte Synchronisierung zwischen Sensor und Aktor zu erreichen. Dies gelang durch intensive Kooperation mit dem Hersteller der Düsensteuerung.

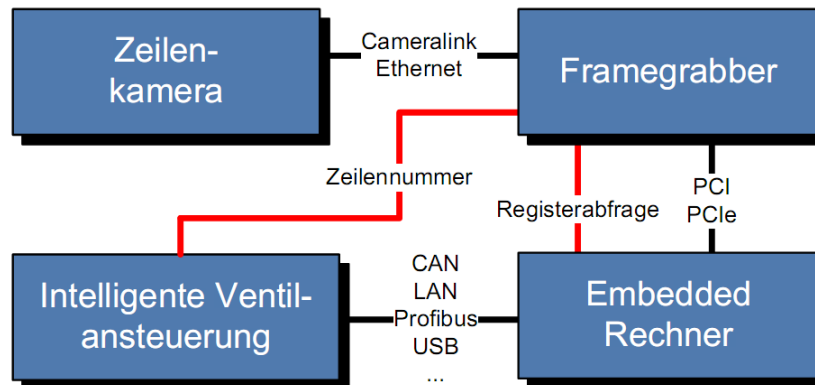


Abb. 6: Synchronisierung von Rechner, Framegrabber und Düsenansteuerung

Die Düsensteuerung übernimmt synchron den Zeilenzählerstand der Zeilenkamera als eigene Zeitbasis. Der Rechner sendet das Ausblasmuster vorab an die Ventilsteuerung, wo es dann auf die Zeitbasis synchronisiert wird. Die Registerabfrage im Rechner dient auch zur internen Diagnose, ob die Klassifikationsergebnisse rechtzeitig vorliegen, da die Düsenansteuerung hierzu keine Daten zurückliefert. Über diesen Systemaufbau konnten die zeitlichen Verschiebungen auf  $\pm 0,7$  ms reduziert werden.

## 6 Fazit

Die gezeigte Entwicklungsplattform erlaubt eine schnelle Entwicklung echtzeitfähiger Schüttgutsortiersysteme. Durch Optimierung der Synchronisierung wurde die Sortierqualität verbessert, da eine präzisere Ausschleusung möglich ist und somit die Sortierung kleinster Korngrößen erschlossen werden konnte, was einen wirtschaftlich wichtigen Faktor repräsentiert (z.B. Sortierung von Feinstglasbruch).

Ein Anwender der hier vorgestellten Konzepte ist die Firma Binder+Co aus Gleisdorf (Österreich), die von den vorgestellten Entwicklungen des Fraunhofer IOSB profitieren konnte. Binder+Co hat ihre Marktführerschaft im Bereich der Glassortierung deutlich ausbauen können und hat zudem den Österreichischen Staatspreis für Innovation 2009 erhalten.

## Literaturverzeichnis

1. Laengle, T.: Quality Control of Bulk Material in Factories of the Future. 23rd International Conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future. Tagungsband CARS/FOF: 667-670, Bogota, 2007.
2. Vieth, K.-U.; Laengle, T.; Struck, G.: Modular aufgebaute optische Sortiersysteme für neue Anwendungen. Tagungsband „Sensorgestützte Sortierung“, Aachen, 2006.
3. Vieth, K.-U.: Rütteln, beruhigen, ausblasen. QZ Qualität und Zuverlässigkeit Heft 2:32-35, 2006.
4. Harant, M. und Kröger W.: „Sortierung von Abfällen aus Haushalten“, LfU-Schriftenreihe, Heft 178:30-31, Augsburg, 2004
5. Binder+Co: Process and device for detection and sorting of glass, European Patent Application EP1752228
6. Freydl, D.: Optische Sortierung von hitzebeständigen Sondergläsern bei Binder+Co AG. Tagungsband „Sensorgestützte Sortierung“, Aachen, 2008.
7. Zeiger, E.: Sortierung verschiedener Abfallströme mit Mogensen-Röntgensortiertechnik. AufbereitungsTechnik 47 (3), 2006.