Fernmonitoring komplexer Fertigungsprozesse mit Hochgeschwindigkeits-Bildsensoren

Dr. Jens Döge, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS / EAS, Dresden, jens.doege@eas.iis.fraunhofer.de
Edgar Schäfer, Lippok & Wolf GmbH, LIWO – Prüfautomation, Welzheim, e.schaefer@liwo.com

Kurzfassung

Das Monitoring von Fertigungs- und Prüfprozessen spielt bei der Fernwartung für die stark Export orientierte deutsche Wirtschaft eine wichtige Rolle. Die maschinelle visuelle Inspektion und die optische Aufzeichnung sehr schneller Vorgänge gewinnen in diesem Umfeld zunehmend an Bedeutung. Im Rahmen eines BMBF-Förderprojekts werden Grundlagen, Entwurfsverfahren und Komponenten für derartige Fernwartungssysteme erforscht. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einer flexiblen Hard- und Software-Architektur auf der Basis eines programmierbaren Hochgeschwindigkeits-Bildsensor-Systems-on-Chip in Verbindung mit Methoden der Systemmodellierung und –simulation.

1 Einführung

Der Maschinen- und Anlagenbau ist eine wichtige Branche in Deutschland, die wesentlich zum Bruttoinlandsprodukt beiträgt und die führende Stellung des Landes bei den Exporten mit begründet. Nur durch stetige Innovation können sich die Unternehmen im internationalen Wettbewerb behaupten. Dabei können Fernwartungslösungen ein Schlüssel für die Erschließung neuer Märkte, Kosteneinsparungen für Wartung- und Instandhaltung sowie die Abwehr unberechtigter Gewährleistungsansprüche sein. Auf dem Markt für Fernwartungssysteme sind Komponenten und Komplettlösungen für PC und SPS verfügbar. Es zeigte sich jedoch, dass in einer Erweiterung der synchronen Aufzeichnung von Maschinendaten, Messwerten sowie Bild- und Tondaten ein erhebliches Potential steckt. Insbesondere das Prozessmonitoring basierend auf der optischen Erfassung und Auswertung sehr schneller Prozesse ermöglicht eine Vielzahl neuer Anwendungen. So erfordert die moderne Massenproduktion immer schnellere Fertigungs- und Prüfprozesse, um Taktzeiten zu verkürzen und Abläufe zu beschleunigen. In diesen Abläufen ist die Suche nach der Ursache von Fehlern und Störungen im Betrieb mit bloßem Auge oder Standardkameras nicht oder nur unzureichend möglich.
Beim Einsatz von Hochgeschwindigkeitskamerasystemen zur Entwicklung und Inbetriebnahme von Produktionsanlagen spielen neben allgemeinen Fragen wie den hohen Anforderungen an Beleuchtung der Szene und Kühlung auch die Komplexität des Aufbaus und erforderliches Fachwissen bei dessen Setup und Parametrierung eine wichtige Rolle. Nicht zuletzt die hohen Kosten stehen einer breiten Verwendung derartiger Systeme in der Wartung, Instandhaltung und Fehlerbeseitigung insbesondere aus der Ferne im Wege.
Für eine erfolgreiche Etablierung der Methoden zur schnellen optischen Inspektion in Verbindung mit Fernmonitoring ergeben sich folgende Anforderungen an das Gesamtsystem und die intelligenten Kameras:

- synchrone Erfassung, Aufzeichnung und Übertragung von Bild-, Ton- und Maschinendaten,
- automatische Triggerung der Kamera aus der Maschinensteuerung (SPS) oder direkt anhand extrahierter Bildmerkmale,
- schnelles Umschalten der Aufzeichnung zwischen normaler und hoher Bildwiederholrate,
- transparente Übertragung von Live-, Meta- und Highspeed-Daten im Ausgabedatenstrom,
- einfache Einrichtung und Möglichkeit zur Fernkonfiguration aller Komponenten.

Im Rahmen des BMBF geförderten KMU-Innovativ-Projektes „FemoBiDiS“ wird an einem Fernmonitoring-System auf der Basis von programmierbaren Highspeed-Kameras zum Einsatz in der Fernwartung gearbeitet.

2 Aufbau des Fernwartungssystems

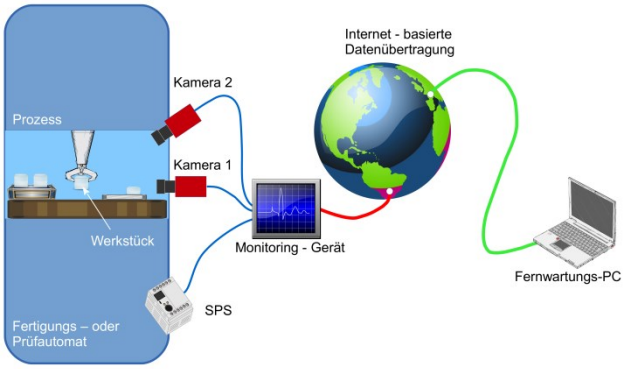

Bild 1 Schematischer Aufbau eines Fernwartungssystems

In Bild 1 ist der schematische Aufbau eines Fernwartungssystems dargestellt. Mindestens eine mit einem Monitoring-Gerät verbundene Kamera (Übersichtskamera 2) dient der Beobachtung des Arbeitsablaufes in einem Fertigungs- oder Prüfautomaten. Sie liefert kontinuierlich Bild- und Tondaten sowie falls erforderlich und machbar daraus extrahierte optische Merkmale. Im Monitoring-Gerät erfolgt die Fusion der aufgezeichneten Bilddaten mit den Informationen aus der Maschinen-SPS und die Vorbereitung bzw. Kompression für eine internetbasierte Übertragung zum Fernwartungs-Host. An diesem steht einem Operator z.B. ein Livebild aus den Kameras zur Verfügung und die Möglichkeit Bildeinzug und Prozess zu begutachten und zu beeinflussen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass das Fernwartungssystem von einem Service-Techniker vor Ort mit möglichst geringen Anforderungen an Detailkenntnisse bezüglich des überwachten Systems aufgebaut und eingerichtet werden kann. Erst im Notfall soll es nötig sein, Spezialisten in die Servicearbeiten vor Ort einzubeziehen.
Die Parametrierung von Kamera und Monitoring-Gerät erfolgt aus der Ferne auf der Basis der übertragenen Daten, wobei diese Arbeiten auch mit sehr geringen Leitungsbandbreiten der Internetverbindung möglich sein müssen.

3 Schnelle Bildverarbeitung mit Bildsensor-System-on-Chip

3.1 Aufbau des Kamerasystems

In Bild 2 ist ein Überblick der Architektur des Fernmonitoring-Kamerasystems dargestellt. Sie basiert auf einem FPGA mit integrierter CPU (Hard- oder Softcore je nach Ausführung) auf dem ein angepasstes Linux-Betriebssystem läuft.

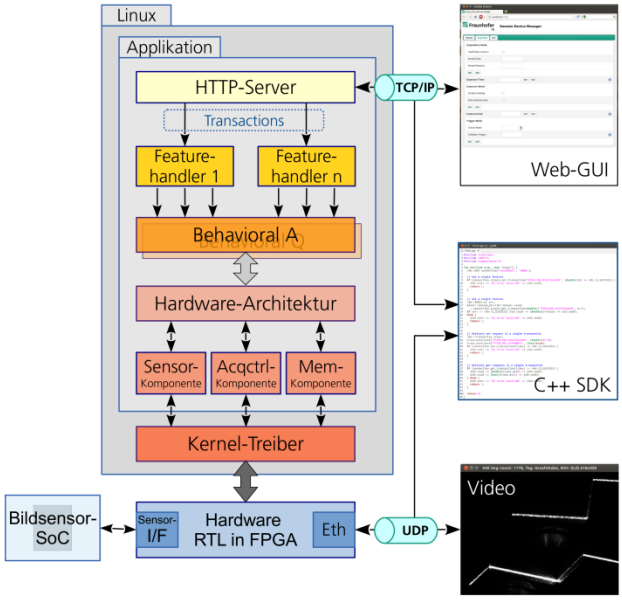

Bild 2 Architektur des Kamerasystems

Für den Zugriff auf die Hardware inkl. Interrupt-Handling wurde ein generischer Kernel-Treiber entwickelt. Abläufe mit hohen Anforderungen an Latenz und Datendurchsatz, wie z.B. Sensor- oder Ethernet-Schnittstelle (*Sensor-I/F, Eth*), werden direkt in Bildsensor und FPGA realisiert. Konfiguration der Hardware und Nutzerkommunikation erfolgen mittels einer Userspace-Anwendung, in der die spezifischen Schnittstellen den höheren Abstraktionsebenen über Komponenten zur Verfügung gestellt werden. Änderungen an der Hardware, die sich entweder durch Austausch von physikalischen Modulen z.B. des Bildsensors oder der General Purpose-I/O sowie durch Anpassungen am Microcode für Bildsensor oder FPGA ergeben, ziehen nur eine Adaption der Sicht auf die Hardware (*Hardware-Architektur*) nach sich. Von den verfügbaren Hardware-Features werden unter Verwendung einer oder mehrerer Verhaltensbeschreibungen (*Behavioral A ...Q*) dem Nutzer Features zur Verfügung gestellt oder intern parametriert. Der Zugriff auf diese Features wie z.B. die ROI erfolgt über *Handler* die vom integrierten *HTTP-Server* aufgerufen werden. Über diesen Server erfolgt dann der Zugriff von außen mittels TCP/IP. Der Nutzer kann dazu entweder einen Browser oder ein C++ SDK für Linux oder Windows benutzen. Auf Bild- und Metadaten wird über UDP mittels Viewer oder SDK zugegriffen.
Die Bildverarbeitung in Bildsensor-System-on-Chip und FPGA wird durch verschiedene Steuerwerke realisiert, deren Mikroprogramme von der Userspace-Applikation ausgetauscht werden können. Je nach Tiefe der Änderungen erfolgt im Zusammenhang damit evtl. auch ein Austausch des *Behavioral* und der dem Nutzer über den *HTTP-Server* zur Verfügung gestellten Features. Auf diese Art und Weise ist es möglich, ohne Neustart des Systems die Funktionalität der Kamera entscheidend zu ändern und an die vom Fernwartungs-Operator vorgegebene Aufgabenstellung anzupassen.

3.2 Besonderheiten des Bildsensors

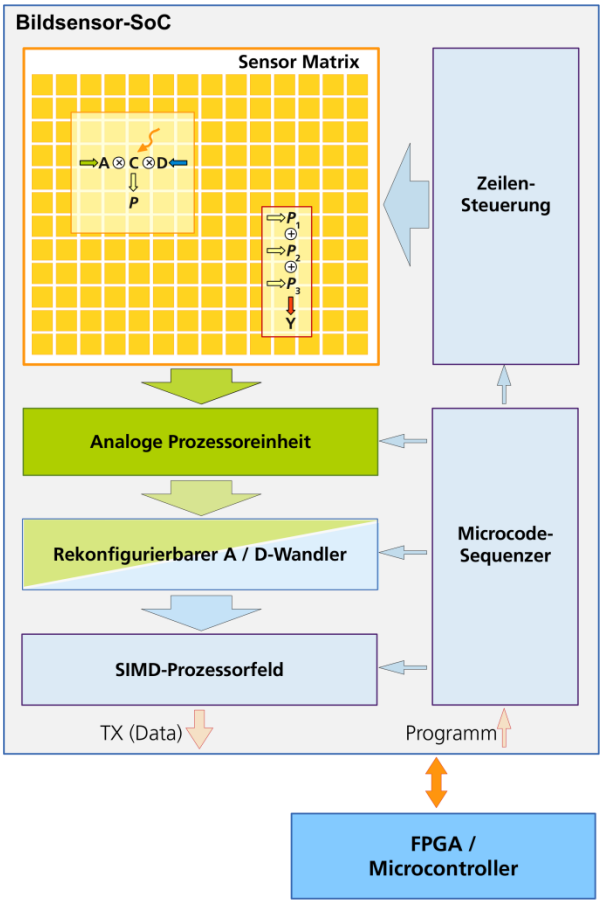

Bild 3 Schematischer Aufbau des Bildsensor-SoC

Bild 3 zeigt den schematischen Aufbau des Bildsensor-Systems-on-Chip. Im Zentrum befindet sich die Sensormatrix mit speziellen Pixeln die je nach Ansteuerung verschiedene Funktionen erfüllen können. So ist es damit möglich, neben den Einzug von Rohbildern eine Vorverarbeitung z.B. eine zeilenweise Faltung oder eine Dyna-

mikkompression (HDR) durchzuführen. Der Pixelmatrix nachgelagert ist eine spaltenparallele Verarbeitungskette aus analogen Prozessorelementen, rekonfigurierbaren Analog / Digital-Wandlern und digitalen SIMD-Einheiten. Die einzelnen Slices werden von dedizierten *Mikrocode-Sequenzern* angesteuert. Dabei handelt es sich um Prozessoren mit speziellen Befehlssatzerweiterungen entsprechend den zu erfüllenden Aufgaben und zugeordneten Verarbeitungseinheiten.

3.3 Programmierung und Parametrierung

Beim Einsatz von Bildsensor-SoC und Kamerasystem zum Fernmonitoring müssen verschiedene Aspekte wie z.B.

- Umgebungsbedingungen,
- Nicht-Idealitäten des konkreten Aufbaus
- Optische Besonderheiten des Bildsensor-SoC (linearer oder logarithmischer Betrieb) und
- algorithmische Umsetzung der Aufgabenstellung zu Bildeinzug und -verarbeitung

berücksichtigt werden. Am Fraunhofer IIS / EAS laufen über das dargestellte Projekt hinaus verschiedener Forschungsarbeiten [1][2] zur Entwicklung einer Entwurfsmethodik und eines dafür geeigneten Bildsensor-Simulators. Auf der Grundlage von Modellen verschiedener Abstraktionsgrade von den Pixelzellen bis hin zur gesamten Kamera können z.B. die Ansteuerung der Komponenten des Bildsensor-SoC, die eingesetzte Algorithmen und die Gesamtsteuerung durch die Firmware in einer Toolchain entwickelt, erprobt und auf die konkrete Kamera-Implementierung (Hard- und Firmware) portiert werden.

```
<op type="branch">
    <label name="start"/>
    <condition op="or">
        Cnt1Match
    </condition>
    <target name="end"/>
</op>

<op type="op">
    <flag name="expodone" op="clr"/>
    <cnt name="cnt1" op="inc"/>

    <lctrl>
        Conv2
        Load Seq_Read
        Execute
    </lctrl>

    <adctx>
        StartADC
        StartTX
    </adctx>
</op>

<op type="wait">
    <condition op="and" negate="false">
        ADCDone TXDone
    </condition>
    <target name="start"/>
</op>

....
<op type="reg">
    <label name="end"/>
    ...
</op>
```

Bild 4 Beispiel für Mikrocode der Belichtungssteuerung

Darauf aufsetzend können aus einer Vielzahl verschiedener Optionen die erforderlichen Softwaremodule entlang der Verarbeitungsketten in den Kameras ausgewählt und parametriert werden. Ein und dieselbe Kamera kann je nach Konfiguration und Firmware als optischer Messkopf zur Triggerung von Ereignissen oder als Grauwertkamera zur Bildaufnahme- und Speicherung dienen.
Im letzten Schritt erfolgt die Bestimmung der für die Anwendung optimalen Parameter. In Bild 4 ist beispielhafter Mikrocode für die rekonfigurierbare Belichtungssteuerung in der Kamera-Hardware angegeben.

4 Anwendungsbeispiel

4.1 Problemstellung

Der beschriebene Aufbau soll an dieser Stelle anhand eines Anwendungsbeispiels etwas detaillierter erläutert werden. Bei einem Materialbearbeitungsprozess tritt sporadisch ein Fehler auf, der z.B. durch ein ungünstiges Zusammenspiel von Steuerung und Werkzeug oder durch Verschleiß an Werkzeugträgern hervorgerufen wird.
Auch denkbar sind unvorhergesehene Verschmutzungen die z.B. bei der Dichtheitsprüfung zu Fehlern führen. Entscheidend ist, dass die Fehler durch automatische visuelle Inspektion d.h. mittels optischer Mustererkennung unter geeigneter Beleuchtung zu detektieren sind.
Ferner muss die Durchlaufzeit des Werkstücks von der Bearbeitung bis zur Inspektion in gewissen Grenzen reproduzierbar und bekannt sein. Durchgeführte Bearbeitungsprozesse können mit sehr hoher Geschwindigkeit und kurzer Taktzeit erfolgen, sofern sichergestellt ist, dass das automatische Monitoring der visuellen Merkmale, der Videoeinzug in der Bearbeitungszelle und die Aufzeichnung der Maschinendaten in der SPS synchron erfolgen, um später eine exakte Zuordnung zwischen Fehlerursache und Auswirkung herstellen zu können.

4.2 Anwendung des Überwachungssystems

Der genaue Ablauf des Prozesses soll anhand der Darstellung in Bild 1 erläutert werden. Kamera 1 ist so konfiguriert, dass sie das Werkstück gegen Ende des Bearbeitungsprozesses inspizieren kann. Sie wird als Messkamera mit integrierter Mustererkennung (z.B. Texturextraktion, Morphologie) konfiguriert und verarbeitet mit bis zu 1000 Hz die Bilddaten des zu inspizierenden Bauteils.
Kamera 2 liefert ein Livestream zur Einrichtung und Beobachtung z.B. mit 30 Bildern pro Sekunde. Je nach Konfiguration ist es darüber hinaus möglich, in dieser Kamera Bilder mit einer wesentlich höheren Bildrate in den internen Ringpuffer zu schreiben. Mittels eines Steuersignals von Kamera 1, Monitoring-Gerät oder SPS kann eine gewisse vorher definierte Szene aus dem Ringpuffer an das Monitoring-Gerät übertragen werden. Die dazu erforderliche Anpassung von Triggerquelle und Ziel erfolgt ebenfalls durch Fernkonfiguration. Länge der Bildfolge und Position im Ringpuffer richten sich nach der bei der Einrichtung bestimmten Verzögerung zwischen der Bearbeitung und der im Anschluss daran erfolgenden Inspektion ein und desselben Bauteils.
Im Monitoring-Gerät werden die einzelnen Informationen zusammengeführt und evtl. notwendige Korrekturen an Zeitstempeln bzw. der Synchronität zwischen Merkmalen, Bilddaten und Maschinendaten durchgeführt. Der gesam-

te Datensatz wird komprimiert und an den Fernüberwachungs-Rechner übermittelt.

4.3 Auswertung der Daten

Der Fernüberwachungs-Operator kann die Daten nach erfolgreicher Übertragung auswerten. Dazu werden verschiedene Analysen durchgeführt. Die Meta- und Triggerdaten aus der Messkamera (1) können mit Ergebnissen aus den Simulationen des optischen Systems verglichen werden. Anhand der Bilder aus der Überwachungskamera (2) kann ermittelt werden, welche Aktion oder Bedienschritte zu Fehlern am Werkstück geführt haben. Mittels der Steuerdaten und des internen Zustands der SPS wiederum kann ermittelt werden, ob z.B. Steuerprogramm oder Messfehler in der integrierten Sensorik Ursachen für das Fehlverhalten waren.
Die gewonnenen Erkenntnisse können nach erfolgreicher Datenanalyse dafür verwendet werden

- den Prozess zu optimieren,
- Fehler in der Steuerung zu korrigieren,
- den Operatoren Hinweise bei Fehlbedienung zu geben,
- das Fernmonitoring per Software zu konfigurieren oder
- dem Operator bei der Änderungen des Kamerasetups zu unterstützen.

Durch den Einsatz der flexiblen und rekonfigurierbaren Fernüberwachung wird es möglich, auch bei der Suche nach komplizierten nur sporadisch auftretenden Problemen zu unterstützen und eine langwierige Fehlersuche beim Kunden zu vermeiden.

4.4 Bedeutung der Fernüberwachung

Das Fernüberwachungssystem kann direkt im Rahmen der Inbetriebnahme der Anlage beim Kunden mit installiert werden. Treten während des Testbetriebs unvorhergesehene Störungen auf, besteht die Möglichkeit das System vor Ort oder aus der Ferne zu konfigurieren. Für bestimmte Aufgaben, wie z.B. die 3D-Vermessung von Oberflächen und Werkstücken mittels Laserlichtschnitt oder die Beobachtung von Schweiß oder Laserbearbeitungsprozessen mittels HDR-Funktionalität, kann es erforderlich sein zusätzliche Komponenten (Laser, Beleuchtung, Montage) nachzuliefern und den Messaufbau umzukonfigurieren. Diese Änderungen sollen von dem vor Ort zur Verfügung stehenden Personal durchgeführt werden können, was unter Umständen eine Erfolgskontrolle aus der Ferne durch den Fernwartungsoperator erfordert.
Nach der Inbetriebnahme der Anlage muss es gegebenenfalls möglich sein, das Fernüberwachungssystem wieder zu demontieren und dem mit der Fernwartung beauftragten Unternehmen zurückzuschicken.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „FemoBiDiS“ wurde ein neues Konzept zum Fernmonitoring sehr schneller Fertigungs- und Prüfprozesse mittels einer flexiblen und per Software rekonfigurierbaren Hard- und Softwarearchitektur erforscht. Sie basiert auf einem Hochgeschwindigkeits-Bildsensor-System-on-Chip, einer frei programmierbaren Kamera-Architektur und einem Monitoring-Gerät zur Adaption an die SPS der zur überwachenden Anlage.
Der Fernüberwachungs-Operator soll mit modernen Methoden und Software zur Modellierung und Simulation bei Einrichtung und Betrieb des Systems unterstützt werden. Ziel dabei ist, den Umfang der Änderungen möglichst auf den Austausch von Software-Modulen und Parametern an der bereits installierten Anlage zu beschränken. Sollte eine Umkonfiguration der Hardware erforderlich sein, so besteht der Anspruch, diese durch Personal am Einsatzort auch ohne tiefgreifende Systemkenntnisse durchführen zu lassen.
Durch den Einsatz des neuartigen Fernwartungssystem soll es möglich sein, in Zukunft sowohl den Zeitaufwand als auch die Kosten für die Inbetriebnahme komplexer Fertigungs-, Mess- und Prüfanlagen zu senken.

6 Literaturverzeichnis

[1] B. Blanco-Filgueira, P. López, J. Döge, M. Suarez und J. B. Roldan, *Evidence of the lateral collection significance in small CMOS photodiodes,* Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS): IEEE, 2012.

[2] J. Döge, P. Reichel und O. Enge-Rosenblatt, *Entwurfsmethodik für integrierte Mixed-Signal Bildverarbeitungssysteme,* Dresdner Arbeitstagung Schaltungs- und Systementwurf (DASS 2013), Dresden: Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS / EAS, 2013.

Die Arbeiten werden gefördert vom BMBF im Rahmen des KMU-innovativ – Verbundprojektes „*Fernmonitoring komplexer Fertigungs- und Prüfprozesse auf Basis von Hochgeschwindigkeits-Bildsensoren mit hohem Dynamikumfang und integrierter hochparalleler Signalverarbeitung (FemoBiDiS)*“.