

USB-3.0-Zeilenkameras

Industriegerechte Kameraserie mit monochromen, Farb- und TDI-Zeilensensoren

Peter Gips, Dirk Ahrens, Anja Krischke und Ulrich Oechsner

USB 3.0 ist im Moment ein viel beachtetes Thema in der Bildverarbeitungsbranche. Während Matrixkameras mit USB-3.0-Schnittstelle auf dem Markt schon etabliert sind, waren USB-3.0-Zeilenkameras bis vor kurzem nicht erhältlich (Abb. 1). Ihre Vorzüge sind unter anderem die hohe optische Auflösung, die freie Dimensionierung der Bildhöhe, die Synchronisierbarkeit jeder einzelnen Zeile und die hohe Geschwindigkeit der Sensoren. Die große Bandbreite der USB-3.0-Schnittstelle erlaubt die Erfassung der Kameradaten mit maximaler Zeilenfrequenz. Anschraub- und arretierbare USB-Steckverbinder sowie ein robustes Gehäuse sorgen für Industrietauglichkeit. Aufgrund der großen Verbreitung der USB-3.0-Schnittstelle sind die Systemkosten gering. Dies macht sie zu einer interessanten Alternative zu anderen etablierten Schnittstellen.

Funktionsweise einer Zeilenkamera

Zeilenkameras sind Halbleiterkameras mit typischerweise nur einer lichtempfindlichen Zeile. Sie finden ihre Verwendung vor allem im industriellen Umfeld oder in der Messtechnik, z. B. bei Laserdiffraktionsmessungen mit mikrometergenauer Messwertaufzeichnung im kHz-Bereich oder der Lasertriangulation. Hochauflösende, zweidimensionale Bilder entstehen in Verbindung mit einer scannenden Bewegung – ähnlich wie bei einem Kopierer. Die einzelnen Zeilensignale werden nach der Übertragung im Rechner Stück für Stück zu einem 2D-Bild zusammengesetzt.

Dieses Aufnahmeprinzip erlaubt eine freie Dimensionierung der Bildhöhe und eröffnet eine Vielzahl an Möglichkeiten für den Einsatz in der indus-

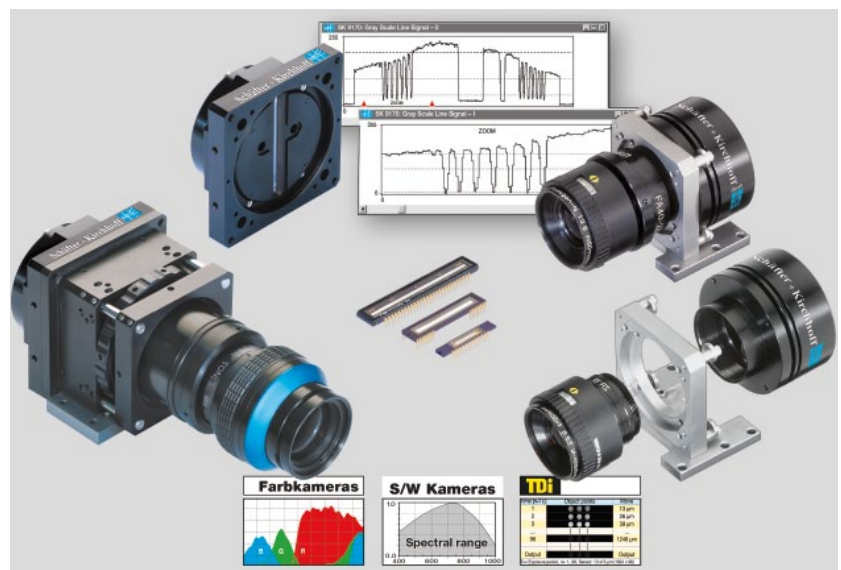


Abb. 1 Weltweit erste USB-3.0-Zeilenkamera-Serie mit monochromen, Farb- und TDI-Sensoren.

triellen Bildverarbeitung, darunter auch kontinuierliche Endlosaufnahmen bei Bahnmaterialien oder Förderbändern. Die Basis für die erfolgreiche Anwendung von Bildverarbeitungsalgorithmen sind scharfe, kontrastreiche und detaillierte Bilder. Diese werden durch eine Kombination aus Zeilenkamera, hochauflösendem Objektiv, geeigneter Beleuchtungstechnik und einer präzisen Motoreinheit (Linear- oder Rotationsantrieb) erreicht.

Für eine proportional richtige Abbildung müssen die Transportgeschwindigkeit und die Kameraaufnahme exakt synchronisiert werden. Dies kann durch die Anpassung der Transportgeschwindigkeit an die Zeilenfrequenz der Kamera erfolgen. In der Praxis sind jedoch häufiger die Transportgeschwindigkeit und die Bildauflösung vorgegeben und die erforderliche Zeilenrate wird zum Auswahlkriterium für die Kamera.

Bei konstanter Transportgeschwindigkeit, z. B. bei der Untersuchung von Objekten auf Förderbändern, ist es möglich, Zeilenkameras im Freilauf zu betreiben. Bei Geschwindigkeitsschwankungen, Anfahr- und Abbremsrampen während der Aufnahme ist die äquidistante Triggerung der Zeilenkamera z. B. durch einen Inkrementalgeber der Motorsteuereinheit erforderlich.

Typische Schnittstellen

Genauso vielfältig wie die Einsatzmöglichkeiten von Zeilenkameras sind die Anforderungen an die verwendete Schnittstelle. Sie muss schnell genug sein, um die Kameradaten mit maximaler Zeilenfrequenz übertragen zu können und sie muss flexibel sein, um auch schnell wechselnde Bildhöhen behandeln zu können. Für die Rechneranbindung von Zeilenkameras sind heute CameraLink, Gigabit Ethernet und USB verbreitet.

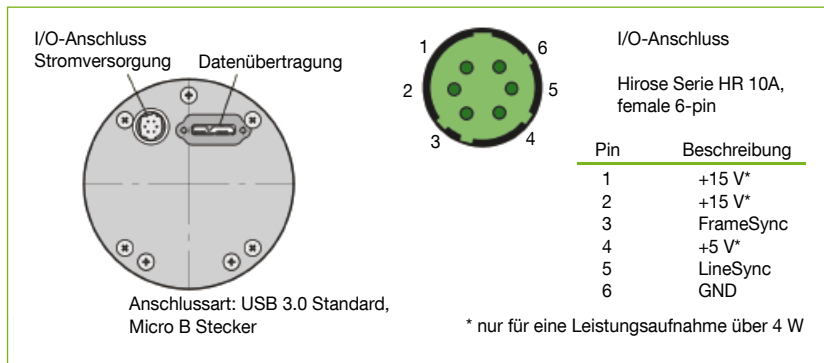


Abb. 2 Rückwand einer USB-3.0-Zeilenkamera mit Anschlussmöglichkeit für USB-3.0-Datenkabel, I/O Triggerkabel bzw. Stromversorgung.

GigE Vision ist einer der jüngeren Schnittstellenstandards in der industriellen Bildverarbeitung. GigE-Zeilenkameras arbeiten mit Standard-Netzwerkkomponenten (Gigabit Ethernet) und benötigen keinen zusätzlichen Grabber. Sie werden direkt an die Ethernet-Buchse des PCs angeschlossen. Die maximale Datenrate beträgt 120 MHz. Dieses Limit begrenzt die Zeilenfrequenz und die Bittiefe von einzelnen Sensoren mit noch höherer Pixelfrequenz.

Zeilenkameras mit CameraLink-Interface werden mit Hilfe spezieller CameraLink-Kabel mit einem im PC installierten Frame Grabber verbunden.

Die Geschwindigkeit der CameraLink-Schnittstelle ist in verschiedenen Konfigurationen definiert. Die schnellste Variante (Full) besitzt eine Bandbreite von ca. 680 MB/s. Damit handelt es sich um die schnellste derzeit verbreitete Schnittstelle in der industriellen Bildverarbeitung, aber auch diejenige mit den höchsten Investitionskosten. Da die Frame Grabber ursprünglich für die Steuerung von Matrixkameras entwickelt wurden und vorrangig für die Erfassung fester Framegrößen konzipiert sind, tun sich manche Grabber

schwer mit dem raschen Umprogrammieren der Bildhöhe im laufenden Betrieb, von einer Zeile pro Bild zum Anzeigen des Helligkeitsprofils an einer Position auf z. B. 10 000 Zeilen pro Bild im Scanvorgang, wie bei der Anwendung von Zeilenkameras häufig angewendet.

Was bringt USB 3.0?

USB 3.0 ist die nächste Generation des Universal Serial Bus (USB), einer sowohl in industriellen Umgebungen als auch im Konsumerbereich weit verbreiteten Schnittstelle. Bei der neuen Auflegung wurden die alten Stärken von USB 2.0 ausgebaut. Daraus ergeben sich für die industrielle Bildverarbeitung entscheidende Verbesserungen.

Eine Zeilenkamera mit USB-Schnittstelle wird direkt an die USB-3.0-Buchse des PCs angeschlossen. Die neue Transfermethode Superspeed erlaubt eine Datenübertragung von 5 GBit/s – zehnmals schneller als USB 2.0 und viermal schneller als Gigabit Ethernet. Die effektiv verfügbare Bandbreite liegt bei etwa 400 MByte/s.

Die Datentransferrate bietet genügend Reserve, um die volle Performance

der Zeilenkameras auszunutzen. Diese wird durch die Pixel- bzw. Zeilenfrequenz des Sensors und die größtmögliche Bittiefe des A/D-Wandlers bestimmt.

Modernste Technologien machen die Zeilenkameras äußerst rauscharm. Somit liefern die Kameras auch bei einer 12-Bit-Auflösung die volle Dynamik.

Ein weiterer Fortschritt von USB 3.0 gegenüber USB 2.0 ist, dass nun bis zu 900 mA zur Stromversorgung für Endgeräte zur Verfügung stehen. Oft lassen sich Zeilenkameras ohne zusätzliches externes Netzteil betreiben. Erst ab einer Leistungsaufnahme von mehr als 4 W benötigen sie eine externe Stromversorgung. Das betrifft Kameras mit besonders schnellen Sensoren und mehr als 100 MHz Pixelfrequenz.




Abb. 2 zeigt die Rückwand der robusten Gehäuseausführung einer USB-3.0-Zeilenkamera mit Anschlussmöglichkeit für das schraub- und arretierbare USB-3.0-Datenkabel und einem I/O-Anschluss für externe Synchronisation und – falls notwendig – externe Stromversorgung.

Die Zeilenkameras können in den Energiesparmodus geschaltet werden, ohne dass die Verbindung unterbrochen werden muss und sind mit USB 3.0-Schnittstelle auch abwärtskompatibel zu USB 2.0. Die wichtigsten Merkmale der verbreiteten Schnittstellen für Zeilenkameras im Vergleich zeigt Tab. 1.

USB 3.0 bietet eine schnelle Datenübertragung bei vergleichsweise niedrigen Systemkosten, die auch in Zukunft den Betrieb einer Zeilenkamera mit größtmöglicher Bittiefe und Geschwindigkeit ermöglicht.

Schnittstelle	Zeilen-synchronisation	Bild-synchronisation	Max. Pixel-frequenz	Externe Stromversorgung	Datentransfer-kabellänge	PC-Interface	Systemkosten
USB 3.0	x	x	210 MHz	nein*	3 m (erweiterbar)	USB 3.0	gering
GIG	x	x	120 MHz	ja	100 m	Gigabit Ethernet	mittel
CAMERA Link	x	x	210 MHz (3 x 70 MHz)	ja	10 m	PCI/PCIe-Slot	hoch
USB 2.0	x	–	15 MHz	nein	5 m	USB 2.0	gering

Tab. 1 Schnittstellen in der industriellen Bildverarbeitung im Vergleich, Stand: Schäfer+Kirchhoff 8/2013 (* Leistungsaufnahme bis 4 W).

Typ	Pixelanzahl	Max. Zeilenfrequenz	Integration Control	Anti-Blooming	Shading-Correction	Thresholding	Externe Synchronisation
 B/W monochrom	512 – 8160	83 kHz	x	x	x	x	Line, Frame
 RGB-Farbe	3 × 2096 – 3 × 7600	9,28 kHz	x	x	x	–	Line, Frame
 TDI	96 × 2048 – 96 × 4096	43,5 kHz	–	x	x	x	Line, Frame

Tab. 2 Eigenschaften von monochromen, Farb- und TDI-Zeilenkameras mit USB-3.0-Schnittstelle.

Eigenschaften der USB-3.0-Zeilenkameras

USB-3.0-Zeilenkameras gibt es mit monochromen, RGB-Farb- und TDI-Sensoren (siehe Tab. 2). Monochrome Zeilenkameras besitzen eine lichtempfindliche Zeile und sind in einem Spektralbereich zwischen 400 – 1000 nm empfindlich.

Zeilenkameras mit „Time Delayed Integration“ (TDI)-Technologie besitzen eine 96-fach höhere Lichtempfindlichkeit als herkömmliche Zeilenkameras und lassen damit höhere Mess- und Scangeschwindigkeiten zu. Sie bestehen aus 96 nebeneinander liegenden Sensorzeilen. Das Objekt wird mit einer durch die Zeilenfrequenz definierten Geschwindigkeit – synchron zu einem zeilenweisen Ladungstransfer – parallel bewegt, sodass als Ergebnis eine 96-fache Mehrfachbelichtung stattfindet.

Farbzeilenkameras von Schäfter+Kirchhoff besitzen Triple-Line-Sensoren mit drei getrennten Sensorzeilen für die Grundfarben Rot, Grün und Blau. Mit bis zu 3 × 7600 Pixeln sind sie besonders hochauflösend. Der räumliche Abstand zwischen den drei Sensorzeilen wird als Line-Spacing bezeichnet. Je nach Sensor beträgt das Line-Spacing das 1- bis 9-fache einer Pixelhöhe, bzw. 9,3 µm bis zu 112 µm. Dieser Abstand muss bei der Erzeugung eines Farbbildes korrigiert werden. Mit der Zeilen- und Frametriggerung bieten die USB-3.0-Zeilenkameras die erforderlichen Mechanismen für die exakte Synchronisation von Transportgeschwindigkeit und Kameraaufnahme. Diese garantiert das richtige Seitenverhältnis und ist Voraussetzung für eine präzise Farbmischung im Bild.

Eine weitere Eigenschaft der USB-3.0-Zeilenkameras ist die Shading-Korrektur. Sie dient der Kompensierung von Vignettierungseinflüssen und Ungleichmäßigkeiten der Beleuchtung. Hierfür wird das Objekt vorübergehend

durch eine homogene weiße Vorlage ersetzt. Das erzeugte Bild der weißen Vorlage dient als Referenz für die Berechnung der Korrekturfaktoren. Bei Farbzeilenkameras wird diese zusätzlich für den Weißabgleich verwendet. Unterschiedliche Sensitivitäten der einzelnen Farbkanäle werden hierdurch ebenso ausgeglichen, wie ungleichmäßige Farbanteile der Beleuchtung. Die Kamera kann beide Korrekturen speichern.

Bei Farbzeilenkameras ist zu beachten, dass der Weißabgleich allein noch nicht die farbgetreue Abbildung aller Farbnuancen einer Vorlage garantiert. Darauf haben einerseits die spektralen Eigenschaften der Beleuchtung und des Sensors Einfluss. Zum anderen ist das Weiß der benutzten Vorlage für den Weißabgleich in der Regel nicht eindeutig definiert. Eine verbindliche Farbrepräsentation eines Scanners macht eine Farbkalibrierung z. B. mit IT8-Targets erforderlich. Ein IT8-Target hat objektiv definierte Farben und eine standardisierte Form. Ein Scanner liest das Target ein und anhand von Referenzwerten wird ein ICC-Profil berechnet. Dieses findet bei

allen nachfolgenden Scan-Vorgängen Berücksichtigung und sorgt für ein farbgetreues Scan-Ergebnis.

Oberflächenanalyse von Gesteinsproben vor Ort

Aufgrund ihrer Plug&Play-Funktionalität und der Leistungsfähigkeit moderner Laptops eignen sich USB 3.0-Kameras besonders zur Ausstattung mobiler Messplätze oder für Anwendungen mit häufig wechselnden Messrechnern.

Abb. 3 zeigt ein transportables Oberflächen-Scan-Makroskop mit USB-3.0-Zeilenkamera, hier zur Untersuchung von zylindrischen Prüfobjekten mit glatter Oberfläche. Ein Anwendungsbeispiel ist die Vorort-Untersuchung von Bohrkernen. Hierzu wird mit Hilfe der Zeilenkamera ein 2D-Bild der abgerollten Oberfläche aufgenommen. Die exakte Synchronisation von Motoreinheit und Zeilenkamera sorgt dabei für die Darstellung im richtigen Seitenverhältnis und die reproduzierbare Auflösung in X- und Y-Richtung. Letztere hängt vom Durchmesser ab und beträgt 900

Die Firma

Schäfter+Kirchhoff GmbH Hamburg

Schäfter+Kirchhoff wurde vor rund 50 Jahren als Ingenieurbüro für Optik-Entwicklung gegründet. Während anfänglich die Berechnung hochwertiger optischer Systeme im Vordergrund stand, hat sich der Schwerpunkt der Firma im Laufe der Jahre in Richtung Optosensorik, Lasermesstechnik und polarisationserhaltende Faseroptik verschoben. Heute ist Schäfter+Kirchhoff in allen drei Bereichen mit eigenen Produktlinien und kundenspezifischen Lösungen aktiv.

Im Bereich Optosensorik stehen vor allem Zeilenkameras und Zeilenkamerasysteme im Vordergrund, häufig kombiniert mit einer an die jeweilige Messaufgabe angepassten Beleuchtungs- und Aufnahmetechnik. Die Entwicklung und die Produktion finden am Firmenstandort in Hamburg statt, von dort wird auch der weltweite Vertrieb durchgeführt.

www.SuKHamburg.de

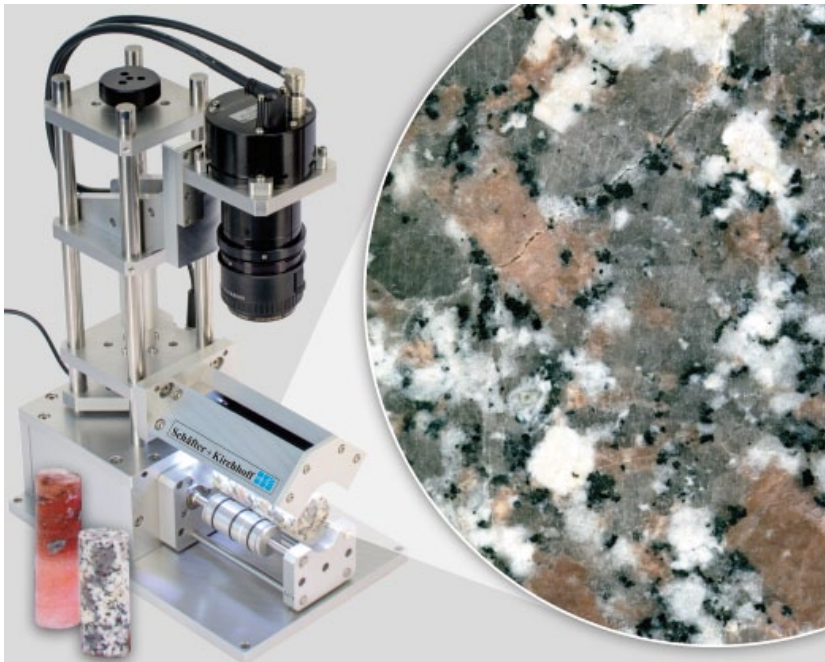


Abb. 3 Der Core Plug-Scanner SK2096-USB3-Color („Gold, Diamond and Oil Sniffer“) ist ein mobiles zeilenkamerabasiertes Bilderfassungssystem für die Inspektion von geologischen Prüfkörpern.

bis 350 dpi für Bohrkern mit 25,4 mm bis 50,8 mm Durchmesser.

Kernstück eines solchen Untersuchungssystems ist eine RGB-Farbzeilenkamera, hier mit USB-3.0-Schnittstelle. Zusammen mit einem Objektiv, einer LED-Weißlicht-Beleuchtungseinheit (optional: UV-Beleuchtung für Fluoreszenzaufnahmen, Infrarotbeleuchtung oder selektive monochrome Beleuchtung), einer Motoreinheit zum Drehen der Gesteinsproben sowie geeigneter Software bildet diese Einheit den Core-Plug-Scanner.

In diesem Gerät kommen die zuvor beschriebenen Funktionen für Weißab-

gleich und Farbkalibrierung zum Einsatz. Die optimale Anpassung der Signalintensität an die unterschiedlichen Farben der Core Plug-Oberflächen erfolgt durch die Integrationszeitregelung der Kamera. Die daraus resultierende Zeilenfrequenz steuert die Rotationsgeschwindigkeit des Motors.

Abb. 3 zeigt den Core-Plug-Scanner, exemplarische Bohrkern sowie eine Gesteinsaufnahme mit einer Auflösung von 9,4 μm pro Pixel. Es sind deutlich die unterschiedlichen Gesteinsarten, sowie kleine Oberflächenanomalien wie Risse oder Spalten zu erkennen. Solch hochauflösende 2D-Aufnahmen stel-

len die Grundlage für eine ausführliche Analyse der strukturellen und petrophysikalischen Eigenschaften, z. B. für eine Korngrößenanalyse dar. Aus den gewonnenen Informationen ziehen Experten dann Rückschlüsse auf die Anwesenheit von Bodenschätzen wie Gold, Öl oder Diamanten.

Fazit

USB-3.0-Zeilenkameras eignen sich besonders für schnelle und hochauflösende Scan- und Messaufgaben. Die Verwendung von Standardkomponenten erlaubt eine vergleichsweise kostengünstige Realisierung schneller Messsysteme.

In industriellen Umgebungen punkten sie mit schraub- und arettierbaren Steckverbindern und einer industriegeeichten Gehäuseausführung. Durch ihre Plug-and-Play-Fähigkeit sind die USB-3.0-Zeilenkameras auch für mobile Scanner-Anwendungen prädestiniert.

Die Bandbreite der Schnittstelle bietet genügend Reserve, um die derzeit auf dem Markt verfügbaren CCD-Zeilen Sensoren mit maximaler Geschwindigkeit zu betreiben. Die große Verbreitung von USB-Schnittstellen und die Abwärtskompatibilität sowie das große Potenzial machen USB-3.0-Zeilenkameras zu einer sicheren Investition für die Zukunft.

DOI: 10.1002/opph.201300024

Die Autoren



Peter Gips studierte Informationstechnik an der TU Dresden. Nach Forschungstätigkeiten im Bereich digitale Signalverarbeitung

kam er 1991 zu Schäfter+Kirchhoff. Er ist dort verantwortlich für die digitale Bildverarbeitung und Softwareentwicklung.



Dirk Ahrens kam bereits 1983 zu Schäfter+Kirchhoff. Er ist seit 31 Jahren zuständig für die Elektronikentwicklung

und Mikrocontrollerprogrammierung sowie verantwortlicher Entwickler für analoge und digitale Zeilenkameras.



Anja Krischke studierte Physik an der Universität Würzburg mit Fokus auf der Beschreibung ultrakurzer Laserpulse und Quanten-

kontrolle. Sie ist bei Schäfter+Kirchhoff seit 2011 tätig und arbeitet in der Optik-Entwicklung.



Ulrich Oechsner schloss sein Studium der Physik an der Universität Hamburg mit der Promotion ab. Nach Forschungen in der Elektro-

physiologie und physiolog. Optik kam er 2000 zu Schäfter+Kirchhoff. Er ist verantwortlich für die Bereiche Optik- und Systementwicklung.