

Spektral regelbare Lichtquelle zur Erzeugung beliebiger Spektralverteilungen zur mehrkanaligen Bildaufnahme

Markus Schnitzlein, Chris Maurer

Océ Document Technologies GmbH

Abteilung DE / Scanner-Technik und Bildverarbeitung

Max-Stromeyerstr. 116

78467 Konstanz

www.odt-oce.com

email: markus.schnitzlein@odt-oce.com

Abstract

Die Gewinnung digitaler Farbbilder zur hochwertigen Reproduktion setzt eine umfassende und präzise Erfassung der physikalisch optischen Eigenschaften des Objektes voraus. Diese messtechnische Erfassung führt vor allem bei hoch orts aufgelösten oder großformatigen Vorlagen zu sehr großen technischen Problemen. Im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bei der Océ Document Technologies GmbH wurde ein Farbscansystem entwickelt, das speziell zur hoch aufgelösten mehrkanaligen (multi-spektralen) Erfassung großformatiger Vorlagen eingesetzt werden kann und dessen besonderer Vorzug darin besteht, dass die Lichtquelle - mit Hilfe eines DLPs (Digital Light Processor) – beliebige spektrale Verteilungen erzeugen kann. Ein besonderer Augenmerk gilt hierbei vor allem auf der direkten Erzeugung von Normspektralverteilungen zur direkten Erfassung im Lab-Raum. Zielsetzung der Entwicklung ist es, ein Scansystem zur Verfügung zu stellen, mit dem ein „digitales Master“ auch im Hinblick auf die Farbproduktion unter Metamerie-Gesichtspunkten und dem Streuverhalten der Oberfläche möglich wird.

1. EINLEITUNG

1.1 Aufbaukonzept des Bildaufnahmesystems

Auf Basis speziell adaptierbarer Lichtquellen und einer neuen Scanner-Technologie wurde ein System zur hochwertigen Digitalisierung sensibler Vorlagen geschaffen, das wesentliche Vorzüge gegenüber herkömmlichen Scannern besitzt. Zielsetzung ist es hierbei auch für großformatige Vorlagen (bis zu A0) Auflösungen im Bereich zwischen 400 dpi und 600 dpi erzielen zu können. Der Einsatz von Zeilensensoren mit bis zu 24.000 Bildpunkten pro Zeile und Farbauszug, wird dabei unumgänglich. Die neue Beleuchtungstechnik zeichnet sich vor allem eine optimierte Lichtführung, sowie die spektrale Modulierbarkeit und die schnelle Schaltbarkeit der Lichtquelle aus. Die verwendeten Sensoren sind vom tri-linearen Typ und können entweder als herkömmliche Farbsensoren eingesetzt werden, oder - bei der Verwendung für die Mehrkanal-Aufnahme - als reiner Grausensor mit einer definierten spektralen Empfindlichkeit benutzt werden.

Durch drei wichtige Merkmale wird das neuartige Scansystem ausgezeichnet und charakterisiert:

1. Die Lichtquelle wird auf ein schmales Beleuchtungsband fokussiert, das synchron zur Scanbewegung des Kamerasystems über die Vorlage geführt wird. Durch die Beschränkung des Beleuchtungsbereiches auf den relevanten Erfassungsbereich wird die Anforderung an die erforderliche primäre Gesamtlichtmenge auf ein minimales Maß reduziert. (Der Vorzug, dass dabei auch die Lichtbelastung für das zu erfassende Dokument ebenfalls minimalisiert wird, soll dabei nur am Rande erwähnt werden). Die maximal erreichbaren Bestrahlungsstärken auf der Vorlage bewegen sich – bei einer Weißlichtquelle – im Bereich von 20W/m^2 .
2. Das Scansystem ist in der Lage Bildgrößen mit $24\text{K} \times 16\text{K}$ Pixeln und mit 12 Bit pro Farbauszug zu erfassen. Durch die zeilenweise Bildaufnahme ist es möglich durch kontinuierliche Mittelwertbildung zwischen Folgezeilen das Bildaufnahme-Rauschens (Shot-Noise) in nahezu beliebigem Maße zu vermindern, aber vor allem ist es möglich durch zeilensynchrone Modulation der spektralen Charakteristik der Lichtquelle ein mehrkanaliges (multispektrales) Bild der Vorlage zu gewinnen.
3. Die Lichtquelle selbst ist spektral hochaufgelöst modulierbar und kann zwischen zwei Zeilenaufnahmen das emittierte Spektrum umschalten. Die Modellierung erfolgt mittels eines DLPs. Da die Lichteinkopplung über einen faseroptischen Querschnittswandler erfolgt, lassen sich auch andere Lichtquellen zur Bildaufnahme verwenden.

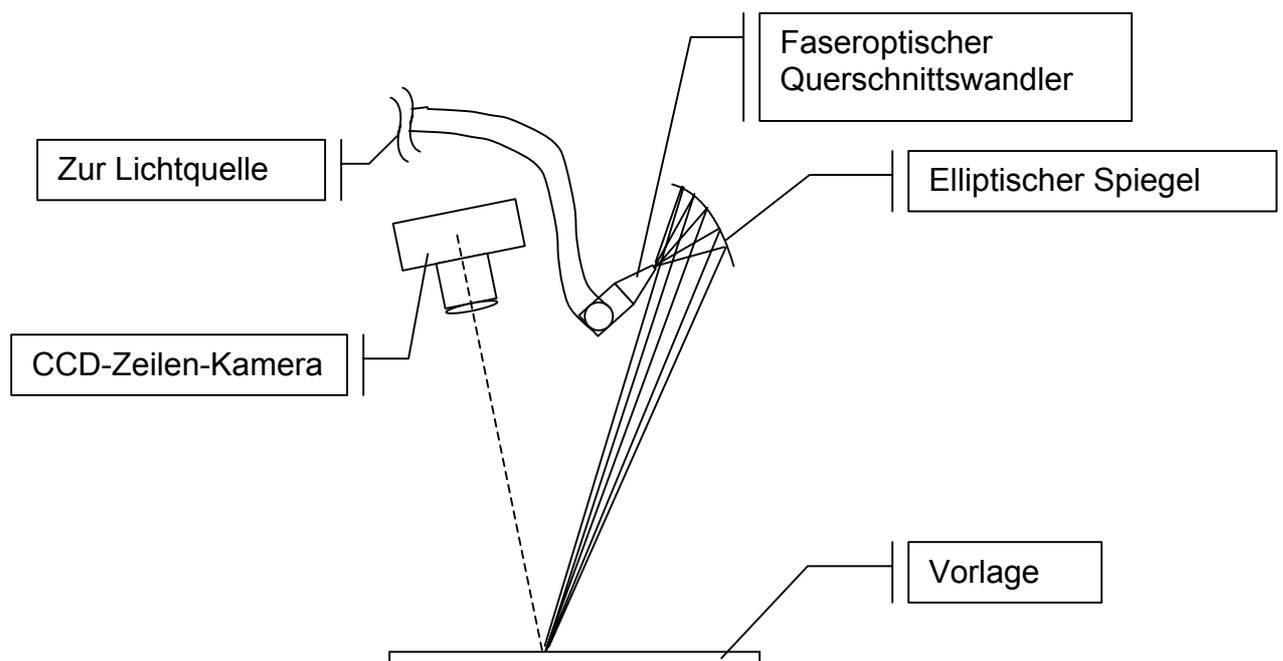


Abbildung 1: Grundsätzlicher Scanneraufbau

Das gezeigte Scan- und Beleuchtungsprinzip wird auch in den Zeuschel-Scannern OS10000 A1 und OS10000 TT verwendet und wurde mittlerweile patentiert.

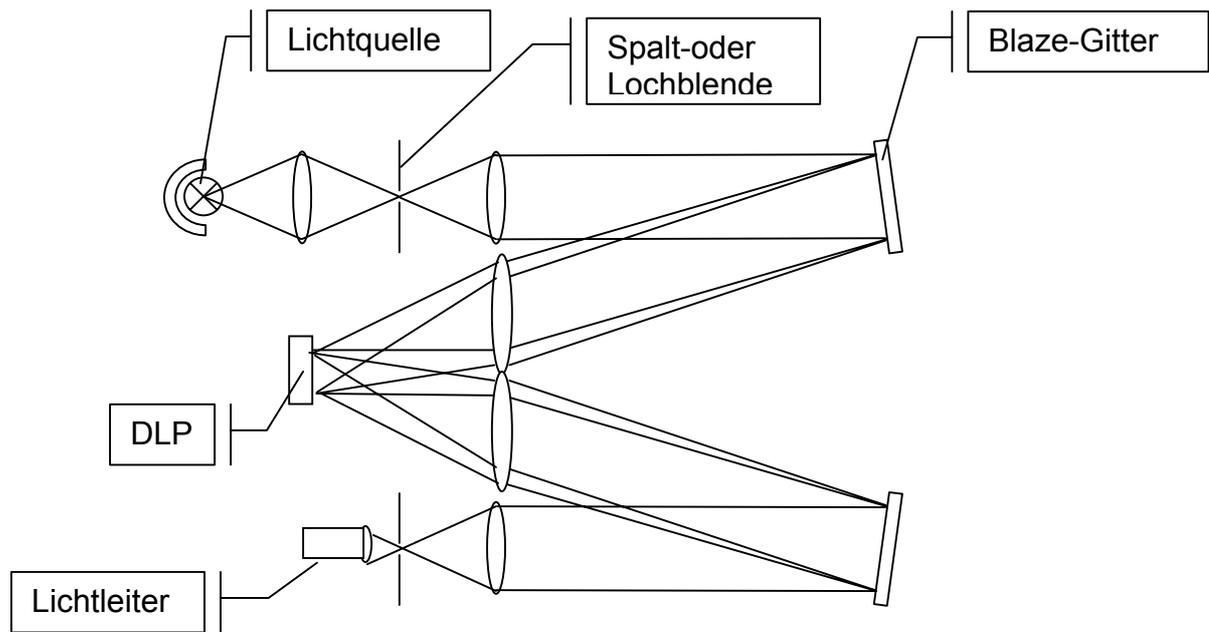


Abbildung 2: Aufbau des spektralen Zerlegung und Modulationssystems

Die Funktionsweise entspricht einem Allochromator.

Zur Formung des emittierten spektralen Verteilung wird ein DLP eingesetzt, der in dem entstehenden streifenartigen 2-dimensionalen Spektrum nur die gewünschten spektralen Anteile reflektiert.

Die Strahlungsstärke pro Kanal läßt sich entweder über die Anzahl der Spiegel, die pro spektraler Linie beitragen, steuern; oder eine zeitgesteuertes Schalten der Einzelspiegel.

Die Grundsatzentscheidung für die Wahl einer spektral modulierbaren Lichtquelle zur Beleuchtung der Vorlage bringt den wesentlichen Vorzug mit sich, dass keine dispersiven Elemente in den bildseitigen Strahlengang eingebracht werden müssen. Diese Elemente mindern üblicherweise die Güte der optischen Abbildung.

1.2 Optische und spektrale Eigenschaften des Gesamtsystems

Grundsätzliches Ziel des Systems ist es, eine aus optischen und spektralen Gesichtspunkten hohe Bildqualität zu erzielen. Die wesentlichen Systemkomponenten sind:

- A. Optisches Abbildungssystem
- B. Beleuchtungssystem
- C. Lichtquelle

Die abbildungsoptischen Eigenschaften werden hauptsächlich durch die Qualität des Objektivs und des Sensors bestimmt, die aber nicht im Rahmen dieses Beitrages besprochen werden. Hinsichtlich des Rauschverhaltens wird – wie eingangs bereits genannt – durch eine mehrfache Mittelung einer Einzelaufnahme einer Bildzeile, das „Shot Noise“ oder „Poisson-Rauschen“ auf ein wählbares Minimalmaß reduziert.

Die Geometrie der Aufnahme, d.h. der Einfallswinkel der Beleuchtung und der Beobachtungswinkel der Kamera, sind wählbar. Somit sind auch die Reflektions- und Streueigenschaften der Vorlage erfassbar.

Beleuchtungssystem und Lichtquelle:

Das Beleuchtungssystem ist derartig konzipiert, dass das emittierte Licht streifenförmig auf das Objekt projiziert wird. Die Realisierung erfolgt über eine streifenförmige Lichtquelle (Lichtquellen), die aber nicht die gesamte Objektausdehnung überdecken müssen. Die Lichtquelle steht dabei im ersten Brennpunkt eines langgestreckten elliptischen Spiegels, in dessen zweiten Brennpunkt sich die Vorlage befindet. Die von der Lichtquelle emittierte Strahlung wird dabei größtenteils auf die Vorlage gelenkt. Die eigentliche Lichtquelle kann sich hierbei entweder direkt im ersten Fokus des elliptischen Spiegels befinden, oder aber sie kann durch die Übertragung mittels eines faseroptischen Querschnittswandlers, auch entfernt davon plaziert werden (Abbildung 1).

Die Konstruktion besitzt unter messtechnischen Gesichtspunkten mehrere herausragende Vorteile:

1. Es wird ein gerichtetes Lichtbündel erzeugt – dies erlaubt eine gezielte Wahl der Beobachtungsgeometrie zur Analyse der Streueigenschaften.
2. Die Beleuchtung mit nur einer einzigen Lichtquelle ist möglich, dadurch können sämtliche Aspekte der Stabilisierung der Emissionseigenschaften bei mehreren Lichtquellen entfallen.
3. Die Fokussierung der Beleuchtung führt zu einer gesteigerten Effizienz, wodurch sich der realistische Einsatz einer solchen Technik bei schwachen Lichtquellen überhaupt erst ermöglichen lässt.
4. Durch die langen Übertragungswege zwischen der Quelle und der Vorlage, kommt es zu einer sehr guten Lichtdurchmischung entlang des Beleuchtungsstreifens auf dem Objekt. Diese Durchmischung ist sowohl hinsichtlich der Abstrahlungsinhomogenitäten der Lichtquelle selbst, als auch deren spektralen Inhomogenitäten, günstig.

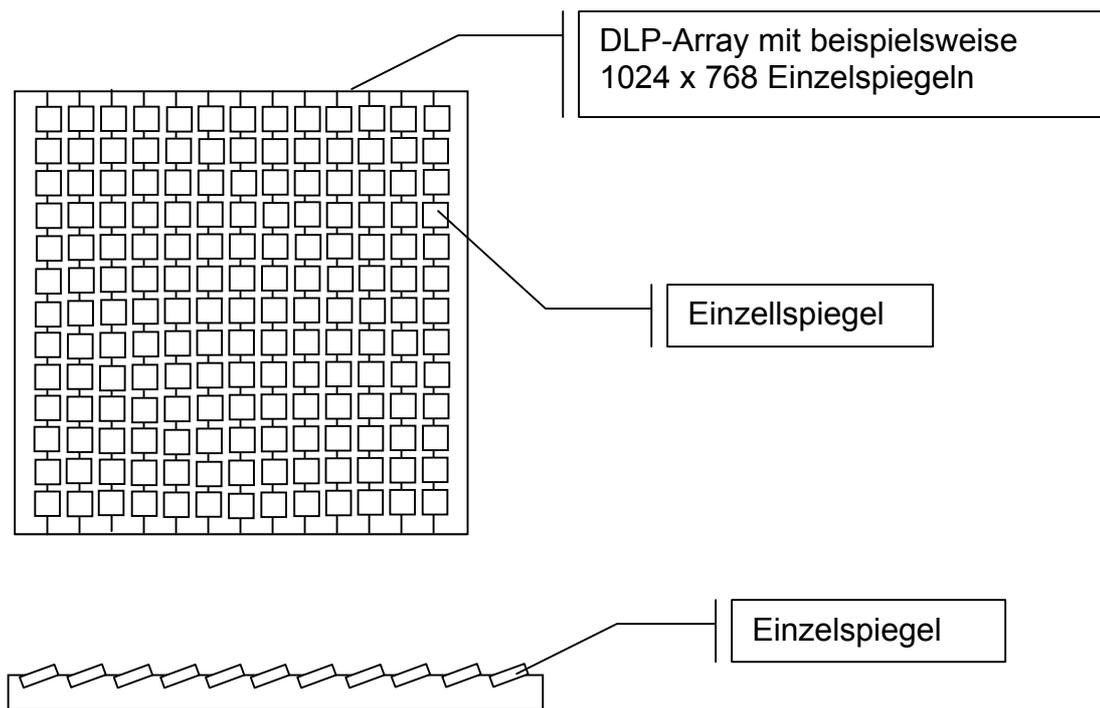
Als primäre Lichtquelle wird eine Xenon-Hochdrucklampe eingesetzt, die im sichtbaren Spektralbereich eine wenig ausgeprägte Linienstruktur besitzt. Von 380 nm – 780 nm wird eine weitgehend gleichmäßiges kontinuierliches Spektrum emittiert.

Zur spektralen Trennung wird das Licht durch eine Lochblende parallelisiert und auf ein Blaze-Gitter gebracht, das 1800 Linien/mm besitzt und auf eine Wellenlänge von 550 nm optimiert ist.

Das Spektrum wird auf ein DLP mit 800 x 600 Elementen abgebildet.

Durch die wahlfreie Ansteuerung des DLPs ist es möglich unterschiedliche Wellenlängen zu selektieren und durch die Anzahl der eingeschalteten DLP-Elemente in einer spektralen Spalte, die übertragene Energie innerhalb des gewählten spektralen Bereiches zu steuern.(Abbildung 2)

Die spektrale Zusammensetzung lässt sich mit dieser Methodik äußerst differenziert steuern. Verteilt man die 800 spektralen Kanäle auf den sichtbaren Bereich von 400 nm, so ergibt sich eine Teilung von 0,5 nm / Kanal. Diese Bandbreite bewegt sich in derselben Größenordnung, wie die spektrale Trennung, die sich durch die verwendeten optischen Elemente ergibt - insbesondere durch die gewählte Spaltblende, die zur Parallelisierung des primären Lichtes verwendet wird. Die Zusammenführung in ein gleichmäßig durchmischtes Lichtbündel erfolgt durch die inverse polychromatische Anordnung (Allochromator) und endet in der Einkopplung des spektral selektiv zusammengesetzten Lichtes in das Lichtleitfaserbündel.



DLP- Digital Light Prozessor

Abbildung 3: DLP (Digital Light Processor) mit überlagerten Spektrum
 DLP (Digital Light Processor) / Mikrospiegelarray, in dem die einzelnen Spiegel einzeln beweglich angeordnet sind. Mittels einer Spannungsquelle, lässt sich jeder einzelne Spiegel ansteuern. Es sind zwei Kipp-Zustände stabil einstellbar. Durch die zeitliche Modulation lässt sich die Lichtmenge, die von jedem Element in eine bestimmte Richtung reflektiert wird, wählen.

2. SPEKTRALE MODULATION

Die erreichbare spektrale Auflösung von 0,5 nm pro DLP-Element (400 nm relevanter Spektralbereich – verteilt auf 800 DLP-Elemente) wird nicht von der Auflösung des Gitters oder der Beugungsbegrenzung beschränkt, sondern einzig von der Breite des verwendeten Eintrittsspalt, der auch gleichzeitig die Effizienz hinsichtlich der transmittierten Gesamtenergie bestimmt.

Das realisierte System verwendet ein Blaze-Gitter mit 1800 LP/mm, es wird ein Strahlquerschnitt von ca. 20mm in quadratischer Form benutzt. Für diesen Fall betrachten wir die Beugungsbegrenzung, die Auflösung aufgrund der Gittereigenschaften, die Winkeldispersion des Gitters und die Winkelfehler (Divergenzfehler) im Strahlenbündel.

Beugungsbegrenzung:

Die Beugungsbegrenzung des Systems wird gegeben durch:

$$a = 2.44\lambda \frac{r(\lambda)}{W \cos \beta}$$

hierbei bedeutet

a ist die Ausdehnung des Airy-Scheibchens

$r(\lambda)$ ist der Abstand der spektralen Ebene vom diffraktiven Element

W ist die Ausdehnung des einfallenden Strahlbündels

β ist der Ablenkungswinkel zur ersten Ordnung

Die Ausdehnung des Airy-Scheibchens kann in unserer Apparatur im Bereich von 10λ ($4\mu\text{m} - 8\mu\text{m}$) angegeben werden und liegt damit unterhalb der Ausdehnung eines DLP-Spiegelelementes ($15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$).

Spektrale Auflösung:

In einfacher Herleitung ist die Auflösung R gegeben durch

$$R = mN$$

hierbei ist

m die relevante Beugungsordnung

N die Anzahl der effektiv zur Beugung betragenden Linien

Bei genauerer Betrachtung der Verhältnisse bei Blaze-Gittern, wird R bestimmt zu

$$R_{\max}(\lambda) = \frac{2Nd}{\lambda}$$

mit d als Gitterkonstanten.

Im erstgenannten Fall ergibt sich $R \sim 36.000$, für den zweiten Fall beträgt $R_{\max}(\lambda)$ zwischen 60.000 und 120.000 .

In beiden Fällen ist die Auflösung des Gitters deutlich besser (mind. 20x), als die nachfolgende Selektion durch die DLP-Elemente.

Winkeldispersion

$$D = \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} = \frac{G}{\cos \beta}$$

hier bedeutet

G ist die Linienfrequenz

β ist der Ablenkungswinkel zur ersten Ordnung

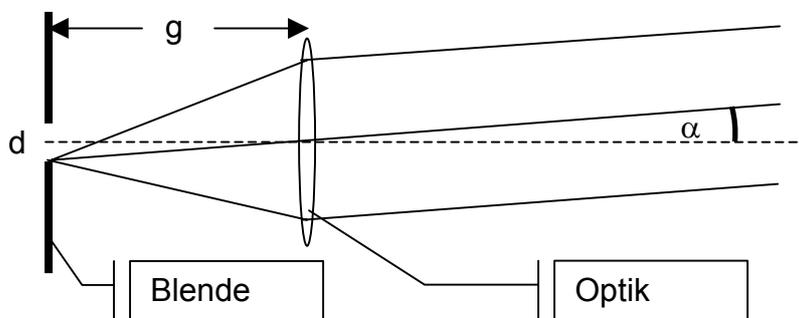
D beträgt in unserem Aufbau etwa 1250/mm

Ist $r(\lambda)$ der Abstand der spektralen Ebene vom diffraktiven Element, so ergibt sich mit $D r(\lambda)$ die lineare Dispersion in der spektralen Messebene zu $D_L = 30000$

Divergenzfehler:

Das Hauptproblem, um einen nutzbaren Scanneraufbau zu realisieren, liegt in der Effizienz, um eine ausreichende Bestrahlungsstärke auf der Vorlage zu erreichen. Diese Effizienz wird in besonderer Weise durch die notwendige Parallelisierung des Lichtbündels innerhalb der Allochromators bestimmt. Die hierzu notwendige – möglichst kleine – Blendenöffnung wird der nutzbare Anteil der primär emittierten Lichtenergie bestimmt.

Der sich ergebende Divergenzfehler hinter der Blende ist gegeben durch



$$\tan \alpha = \frac{d}{2g}$$

d = Blendendurchmesser

g = Abstand Blende-Abbildungselement

Typische Werte für den sinnvollen Blendendurchmesser, die sich auch aus der Geometrie der Lichtquelle ergeben, betragen zwischen 0,5 mm – 1 mm.

Die hieraus entstehenden Winkelfehler sind bedeutend größer, als die o.g. anderen Fehler. Die spektrale Trennung zur Generierung der Zielspektren hängt direkt von der Effizienz des Systems ab.

3. ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem gezeigten Scan- und Beleuchtungssystem ist es möglich äußerst hochwertige und hochaufgelöste Bilder von großformatigen Vorlagen zu gewinnen. Die mehrkanalige bzw. multispektrale Bildaufnahme, die mittels eines DLP-Elementes realisiert wird, bietet neue Möglichkeiten hinsichtlich der colorimetrischen Erfassung von Vorlagen.

Im weiteren läßt sich aber dieser Beleuchtungsansatz elegant verallgemeinern. Weitere Aspekte liegen in der spektralen Homogenisierung von Lichtquellen, der wählbaren Erzeugung von Normbeleuchtungen, bis hin zur direkten Erzeugung der Normspektralwerte X, Y, Z (bei vorheriger Kenntnis der spektralen Sensorempfindlichkeit).

Die Verkopplung eines solchen flexiblen Beleuchtungssystems mit einem „standardisierten“ Aufsichtsscanner (Fa. Zeutschel - www.zeutschel.de) ermöglicht neue Qualitäten in der Erfassung, Präsentation und Reproduktion von historischen Werken.



Abbildung 4:
Zeutschel-Farbscanner OS10000 A1
Auflösung bis zu 600 dpi



Abbildung 5:
Zeutschel-Farbscanner OS10000 TT
Max.Format A2
Auflösung bis zu 600 dpi