

**UNTERSUCHUNGEN ZUR FARBBILDREPRODUKTION
DURCH ZEILENSPEKTROMETRIE MIT EINEM
SPEKTRALEN FLACHBETTSCANNER**

Dissertation zur Erlangung des
Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften
im Fachbereich
Design - Kunst- und Musikpädagogik - Druck
an der
Bergischen Universität - Gesamthochschule Wuppertal

vorgelegt von
Karl-Peter Lukowski
aus Dormagen

Wuppertal 2001

1. Berichtstatter: Universitätsprofessor Dr. rer. nat. S. Brües

2. Berichtstatter: Universitätsprofessor Dr. rer. nat. J. Rodriguez-Giles

Abstract

A concave, cylindrical grating was developed for first time mounting in a mini-spectrometer. The optical construction of the spectrometer allows scan line spectrometry. An intermediate image projection at the place of the entry slit leads to possible applications in almost every standard flat-bed scanner. In this way color picture spectrometry can be realized using the principle of flat-bed scanning.

An optical aberration within the spectrometer was easily corrected by linear compensation. The angular guiding of light in the spectrometer facilitates the elimination of stray light considerably. No stray light from spectral distribution disturbs the results of measurement. The spectral reflectivity of color fields shows amazing agreement in comparison with a calibrating-measurement over the range of spectral light. The Spectral Flat-Bed Scanner works therefore also as a fast color measuring instrument for characterization testcharts.

Color pictures whose colors are in the range of the available spectrum were scanned with the Spectral Flat-Bed Scanner. The picture reproductions on screen showed a faithful color rendering.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
2. Physikalisches und technisches Prinzip.....	8
3. Ergebnisse zur Untersuchung der technischen Realisierbarkeit.....	14
3.1 Abmessungen der lichtzerlegenden Komponente.....	14
3.2 Abschätzung der benötigten Lampenleistung zur Beleuchtung.....	19
3.3 Größe des scanbaren Bildes, Auflösung der Abbildung und spektrale Auflösung, Geschwindigkeit.....	25
4. Verarbeitung der gescannten Daten.....	26
4.1 Kalibrierung des Spektralen Flachbettscanners.....	26
4.2 Die Reflexion des Farbbildes.....	27
4.3 Bildschirmdarstellung und Dateiabspeicherung spektral gescannter Bilder sowie die Bestimmung ihrer Qualität.....	28
5. Aufbau des Spektralen Scanners im Labor.....	34
6. Korrektur der Optik durch die Software.....	39
7. Scanverhalten.....	41
7.1 Linearität des CCD Sensors.....	41
7.2 Spektraler Remissionsverlauf des Spektralen Flachbettscanners im Vergleich zu einer Eichmessung.....	45
7.3 Mit dem Spektralen Flachbettscanner gescannte Farbbilder.....	50
8. Entwicklungsmöglichkeiten des Spektralen Scanners.....	54
9. Zusammenfassung.....	56
10. Literaturverzeichnis.....	57

1. Einleitung

Die bisherigen Flachbettscanner arbeiten mit drei Farbkanälen. Die in einer Zeile gescannten Bildpunkte werden mit optischen Farbfiltern in drei Farben, in der Regel Rot, Grün und Blau, zerlegt. Mit diesen drei Farbinformationen wird dann ein farbiges Bild reproduziert.

Der aufgebaute Spektrale Flachbettscanner ermöglicht, ein Bild Zeile für Zeile spektral aufgelöst zu scannen. Hierbei wird jeder abgetastete Bildpunkt einer Zeile gleichzeitig optisch in 79 Spektralkanäle im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes von 380 nm bis 770 nm zerlegt.

Obwohl die Scanner mit dem Dreifarbenprinzip für keinen Farbbereich blind sind, arbeiten sie mit einer stark eingeschränkten Fähigkeit zwischen verschiedenen Farbtönen zu unterscheiden. Die Farbdaten werden geräteabhängig digitalisiert. Die vollständige Farbinformation, die das Original enthält, geht beim Scannen für die weitere Bildbearbeitung endgültig verloren. Diese Information fehlt insbesondere für die Reproduktion des Bildes. Der Grad der möglichen Vielfalt der spektralen Strahlungsverteilungen, die von den verschiedenen Farbtönen remittiert werden, wird begrenzt. Die Reproduktion der Farben wird dadurch unbestimmter.

Die eingeschränkte und unbestimmte Festlegung der spektralen Strahlungsverteilung für die Farbe führt zur unerwünschten Metamerie eines reproduzierten Bildes.

Die Verminderung der möglichen spektralen Strahlungsverteilung ist nicht nur Ursache für die Metamerie, sondern es ist deswegen bisher nicht möglich, Farben aufgrund ihrer gescannten und digitalisierten Information exakt auf verschiedenen Ausgabemedien zu reproduzieren. Besonders deutlich wird dieser Nachteil bei der Reproduktion von Originalen, die Sonderfarben (z. B. „Coca-Cola Rot“) enthalten.

Die spektralen Daten eines Farbbildes wurden bisher durch verschiedene Rekonstruktionsalgorithmen ermittelt. Keusen ¹ schlägt 1996 vor, mit Hilfe von Splines oder der „Modifizierten Diskreten Sinus Transformation (MDST)“ das Spektrum zu berechnen. Als Grundlage seiner Berechnung benutzt er mindestens sechs spektrale optische Filter, die das Licht vor einer CCD-Kamera definiert durchlassen. Diese multispektrale Kamera dient auch für die Arbeiten von König und Praefcke ² als messtechnisches Gerät. Sie schlagen als Rekonstruktionsalgorithmus je nach Bandbreite der optischen Filter die Algorithmen der „Smoothing Inverse“ oder der „Wiener Inverse“ bei mittlerer Bandbreite und bei kleiner Bandbreite das Verfahren der „Modifizierten Diskreten Sinus Transformation“ und der „Modifizierten Diskreten Sinus Transformation mit Aperturkorrektur“ vor. Zusätzlich zeigen Sie ein multispektrales Codierverfahren auf. Von Bedeutung ist hierbei die „Principal Component Analysis (PCA)“, mit der eine Transformation in ein Basissystem durchgeführt wird, die die RGB-Werte als Komponententeil enthält. Die RGB-Werte können wie üblich in einer TIFF-Datei aufgenommen werden und sorgen so für Kompatibilität zum Dreifarbensystem. Die zusätzliche Information des Basissystems kann in einem dafür zu bestimmenden Tag des TIFF-Formats abgelegt werden. Eine Rücktransformation führt wieder zum Spektrum.

Die PCA und die Transformation von RGB-Werten zum Spektrum bildet auch die Grundlage für die Arbeit von Künzli ³ aus 2000. Künzli misst zunächst das Spektrum von Druckfarben mit einem Spektralphotometer am Farbkontrollfeld eines Druckes. Diese Messung dient als Kalibrierung, aus der ein Basispektrum mit der PCA bestimmt wird. Mit Hilfe der gemessenen RGB-Werte des Farbdruckes unter Einbeziehung des Basispektrums lässt sich ein Spektrum eines Bildpunktes voraussagen.

Diese Verfahren beruhen allerdings nicht auf einer exakten Messung des Spektrums eines Bildpunktes. Steile spektrale Ausschläge der Spektralwerte lassen sich nur durch eine vollständige spektrale Zerlegung des Lichtes eines Bildpunktes, wie es mit einem Spektralphotometer möglich ist, feststellen. Da allerdings ein Spektralphotometer wenig zweckmäßig ist, die gesamten Bild-

punkte eines Farbbildes zu messen, stellt sich die Frage nach einer hierfür geeigneten Technik.

Der Zweck dieser Doktorarbeit besteht deshalb darin, den Einsatz gerade möglich gewordener Technik, wie ein Lichtleiterquerschnittswandler zur Zeilenbeleuchtung, ein zylindrisches, konkaves Reflexionsgitter in einem Minispektrometer und die Datenverarbeitung mit einem schnellen Personal-Computer für die Messung und Auswertung der spektralen Daten eines Bildes auszuprobieren und zusätzliche Information für die Einsatz- und zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten zu gewinnen. Der neu entwickelte Minispektrometer passt in einem handelsüblichen Flachbettscanner und führt somit zur Herstellung des Spektralen Flachbettscanners.

Der konstruierte Spektrale Flachbettscanner erhöht die Farbinformation für den Reproduktionsprozess um mehr als das 26fache. Die Digitalisierung der Farbdaten erfolgt geräteunabhängig. Die Metamerie in einem gedruckten Bild kann deutlich gemindert werden. Eine hinreichende spektrale Farbinformation ist die Grundvoraussetzung für die exakte Wiedergabe einer Farbe auf verschiedenen Ausgabemedien.

Auch ist gegenüber den bisherigen Flachbettscannern die Dynamik der Bildaufnahme verbessert - dies ergibt sich aus der Zerlegung des Lichtes in die hohe Anzahl der spektralen Bereiche. Nach Bedarf kann die spektrale Auflösung eines Farbtons vergrößert oder verkleinert werden.

Zusätzlich ermöglicht der Spektrale Flachbettscanner, Testcharts, die das Profil eines Ausgabegerätes darstellen, in einem Scandurchlauf spektrometrisch zu erfassen. Bei den bisherigen Spektralphotometern wird zwar ein Farbpunkt optisch spektral zerlegt. Da sie jedoch nur jeweils eine Farbe messen können, erfordert es einen hohen Zeitaufwand bis alle Farbfelder eines Testcharts (z. B. 432 Farbfelder) gemessen sind. Da Testcharts mit einem Spektralen Flachbettscanner in einem einzigen Scandurchlauf erfasst werden, wird viel Zeit beim Messen des Ausgabeprofiles z. B. eines Druckers gespart.

2. Physikalisches und technisches Prinzip

Die mechanische Konstruktion des Spektralen Flachbettscanners fährt jede Zeile eines Originalbildes nacheinander an. Eine Kombination aus einem konkaven, zylindrischen Gitter und einer Zylinderlinse zerlegt das aufgenommene Licht einer Originalbildzeile spektral und wirft es in definierten spektralen Abständen auf ein zweidimensionales CCD-Matrixelement.

Eine Koordinate des CCD-Matrixelementes nimmt die örtliche Anordnung der gescannten Zeile auf und die zweite Koordinate die dazugehörige spektrale Zerlegung. Wegen dieser zweidimensionalen Aufteilung genügt es, das spektralzerlegte Bild einer Zeile nur als Grauskala zu messen. Für das CCD-Matrixelement findet deshalb das CCD-Bildaufnahmefeld einer Schwarz-Weiß-CCD-Kamera Verwendung.

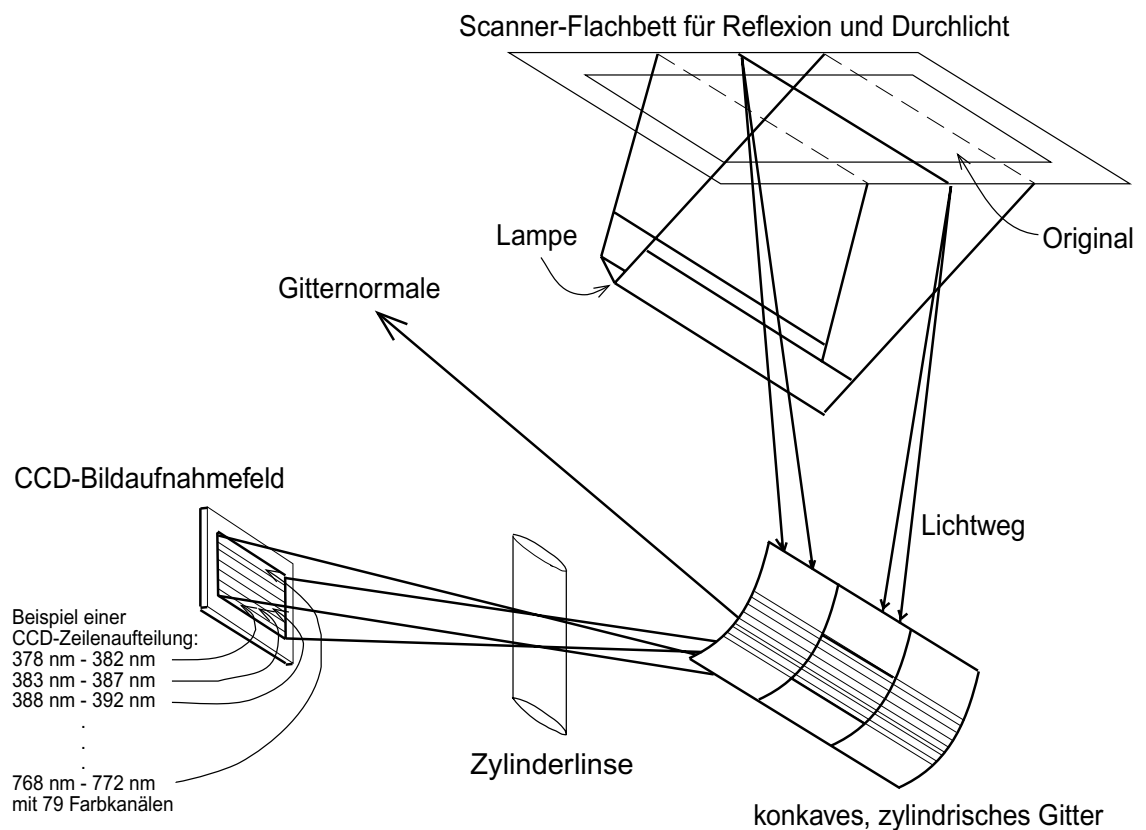
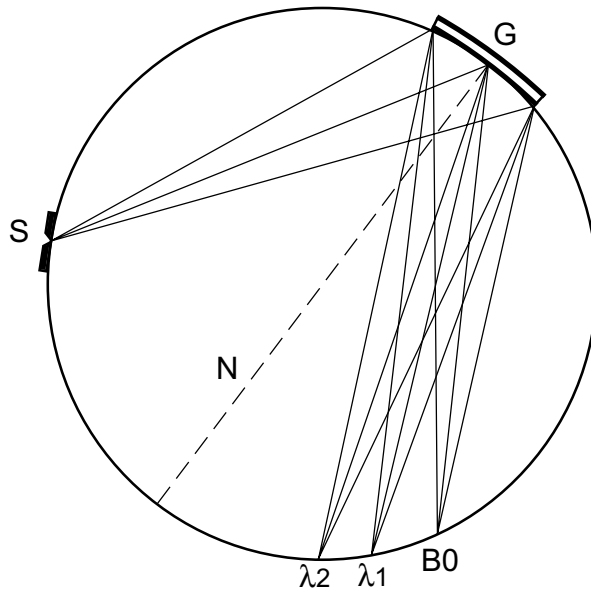


Abb. 2.1: Skizze zum Prinzip des Spektralen Flachbettscanners

Originalbildzeile, Gitter und Sensorebene sind auf einem Rowlandkreis ⁴ angeordnet.



S: Spalt
G: Konkavgitter
N: Gitternormale
B0: Beugung 0. Ordnung
 λ_1, λ_2 : Spektrallinien des Beugungsspektrums

Abb. 2.2: Anordnung eines Konkavgitters im Rowlandkreis

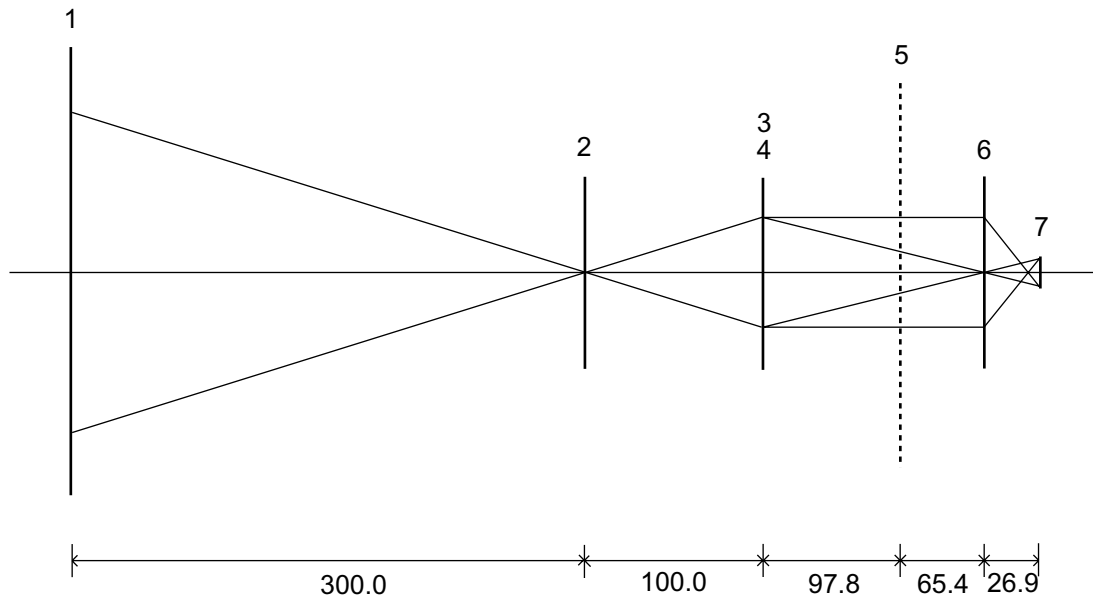
Der Rowlandkreis liegt in der meridionalen Ebene. Senkrecht dazu befindet sich die saggitale Ebene. Der Abstand der Bildzeile des Originals zum konkaven Gitter und der Abstand der Sensorebene zum konkaven Gitter entsprechen der Brennweite des konkaven Gitters (Abb. 2.2). Die Originalbildzeile befindet sich am Eintrittsspalt des Spektrometers, der auf dem Rowlandkreis abgebildet wird. Dies erspart zusätzliche lichtmindernde meridionale Fokussieroptik innerhalb des Spektrometers und ermöglicht einen kompakten Gesamtaufbau.

Die Breite des Eintrittspaltes und die Zusammenfassung der spektralen Wellenlängenbereiche durch die CCD-Zeilenaufteilung auf dem CCD-Bildaufnehmer bestimmt die Anzahl der Farbkanäle. Je höher die Anzahl der Farbkanäle, um so höher ist die gemessene Farbinformation.

Die Länge einer CCD-Zeile ist kleiner als die Länge der Originalbildzeile. Eine zwischen zylindrischem Gitter und CCD-Bildaufnehmer montierte Zylinderlinse verkleinert die Länge der Originalbildzeile. Das Gitter und die Zylinderlinse ermöglichen nur zusammen eine vollständige Abbildung. Das Gitter übernimmt die meridionale und die orthogonal dazu angeordnete Zylinderlinse die saggitale Abbildung. Diese optische Zusammensetzung bildet die Bildpunkte der Originalbildzeile als komplett getrennte Spektren gleichzeitig auf den CCD-Bildaufnehmer ab.

Eine zusätzliche Krümmung des zylindrischen Gitters in Richtung der Gitterlinien gibt dem Gitter eine toridiale Oberflächenform. Dieses toridiale Gitter ermöglicht, eine Zylinderlinse geringerer Dicke zu verwenden. Beim sphärischen Gitter sind beide Krümmungen gleich und da meridionale und saggitale Fokussierung auch gleich sind, ist eine Zylinderlinse für die saggitale Abbildung nicht nötig. Wegen der starken Krümmung in Zeilenrichtung lassen sich mit sphärischen Gittern nur sehr kurze Zeilen fehlerfrei abbilden^{5, 6, 7, 8}.

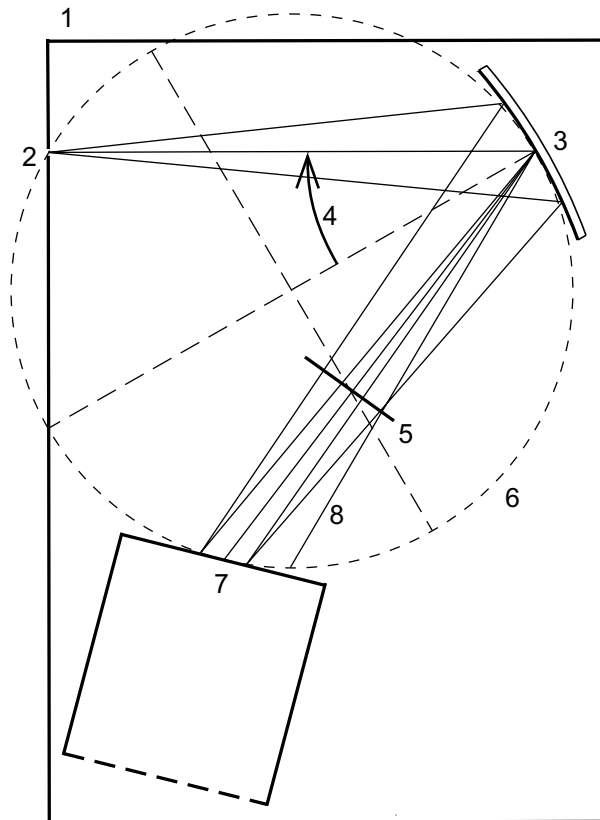
Das Grundprinzip des Spektralen Flachbettscanners der Abb. 2.1 lässt sich bei einer Verlängerung des Abstandes Scanner-Flachbett zum Gitter mit einer zusätzlichen Optik außerhalb des Spektrometers verwirklichen⁹. Diese Optik besteht dann aus einem Kollimator und einer Feldlinse. Der Eintrittsspalt des Spektrometers befindet sich dann am Ort der Feldlinse. Abb. 2.3 zeigt diesen Zusammenhang.



- 1: Originalbildzeile
- 2: Achromat, $f = 75.0$
- 3: Spalt
- 4: Feldlinse, $f = 61.7$
- 5: konkaves, zylindrisches Reflexionsgitter mit Konkavradius $R = 90.417$
- 6: Zylinderlinse, $f = 22.4$
- 7: CCD-Fläche, Breite = 6.4

Abb. 2.3: Optischer Aufbau des Spektralen Flachbettscanners

Senkrecht zur Skizze in Abb. 2.3 findet die spektrale Zerlegung in einem Bildzeilenspektrometer statt. Die Anordnungen der Komponenten im Spektrometer sind der Abb. 2.4 zu entnehmen.



- 1: Spektrometergehäuse
- 2: Spalt
- 3: konkaves, zylindrisches Gitter mit Konkavradius $R = 90.417$
- 4: Einfallswinkel 29°
- 5: Position der Zylinderlinse, $f = 22.4$
- 6: Rowlandkreis
- 7: CCD-Matrixelement mit Gehäuse
- 8: Beugung 0. Ordnung

Abb. 2.4: Aufbau des Bildzeilenspektrometers mit Strahlengang

Die in Abb. 2.3 dargestellte Optik bildet auf den Ort des Eintrittspaltes des Spektrometers ein 3 zu 1 verkleinertes Zwischenbild des Originalbildzeilenausschnittes ab. Der Eintrittspalt des Spektrometers blendet die benachbarten Zeilen der Scanzeile aus.

Die Beleuchtungslampe, das Gitter, die Zylinderlinse und der CCD-Sensorkopf sind zueinander fest angeordnet und werden parallel zur Oberfläche des Originals und nur in Richtung zu einer seiner Kantenseiten verschoben.

Eine hinreichende spektrale Beleuchtung wird dadurch erreicht, dass das kontinuierliche Licht einer Halogenlampe über ein Lichtleiterbündel die Scanzeile gleichmäßig beleuchtet.

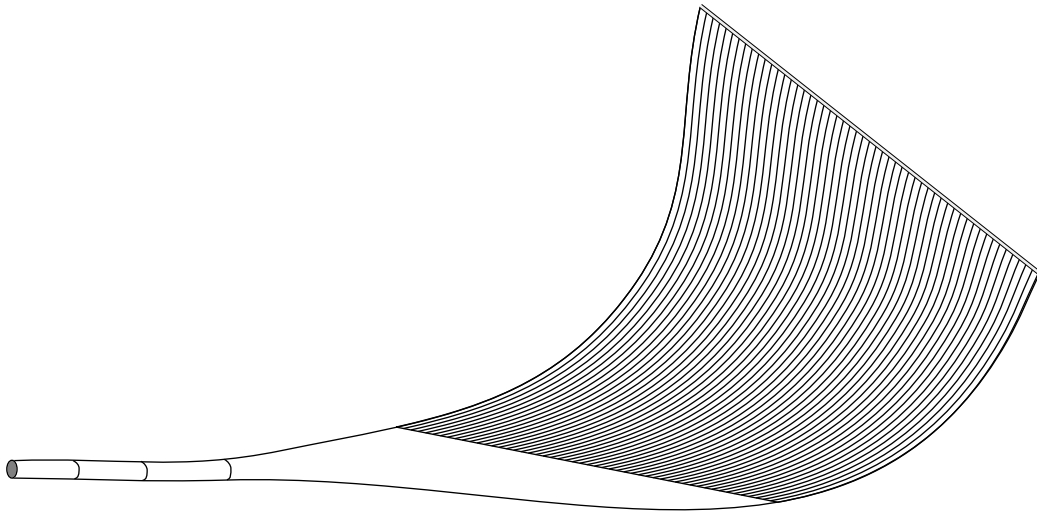


Abb. 2.5: Skizze des Lichtleiterbündels zur Zeilenbeleuchtung

Das Lichtleiterbündel ist als Querschnittswandler (Abb. 2.5) angeordnet. Die Ausgangskonstruktion des Querschnittswandlers sorgt zusätzlich für eine Beleuchtung und Bildaufnahme nach der $45^\circ/0^\circ$ -Geometrie. Diese Bedingung stimmt sehr gut mit den Verhältnissen überein, die bei der visuellen Farbmusterung vorliegen ¹⁰. Die Fassung der Lichtleiter für den Ausgang zeigt Abb. 2.6.

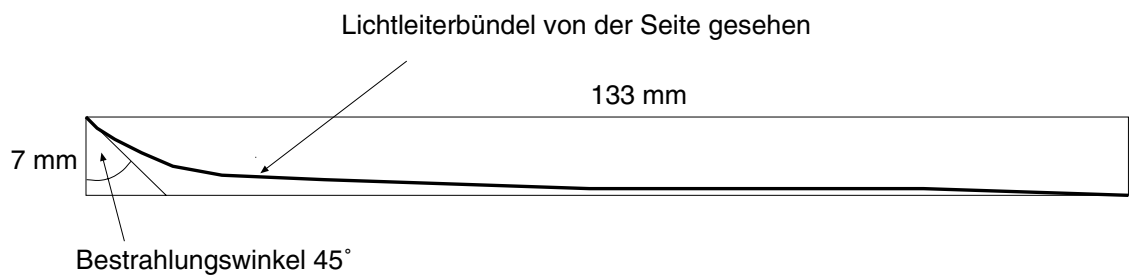


Abb. 2.6: Schnittzeichnung des Endstückes des Querschnittswandlers für den Lichtaustritt zur Zeilenbeleuchtung

3. Ergebnisse zur Untersuchung der technischen Realisierbarkeit

3.1 Abmessungen der lichtzerlegenden Komponente

Der physikalische Hintergrund beim Spektralen Flachbettscanner beruht auf ein Konkavgitter-Spektrometer ^{11, 12}. Konkavgitter bewirken neben der spektralen Zerlegung eine optische Abbildung. Die Brennweiten liegen auf dem Rowlandkreis, der als Durchmesser den Krümmungsradius des Gitters hat. Es kann auf zusätzliche platznehmende abbildende Elemente verzichtet werden. Eintrittsspalt, Konkavgitter und CCD-Sensorfläche werden dabei auf einen Kreis montiert, der das Gitter berührt.

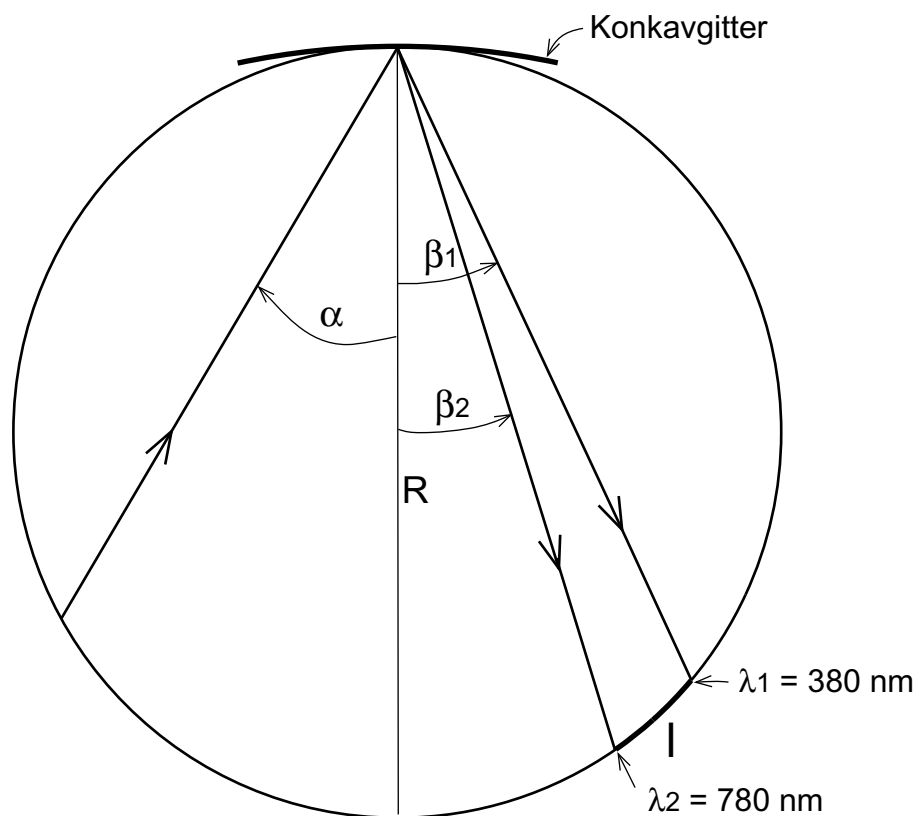


Abb. 3.1: Spektrale Zerlegung des Lichtes in der Rowlandkreisordnung.

Das physikalische Prinzip der Rowlandkreisordnung zeigt Abb. 3.1. Die spektrale Zerlegung des Lichtes erfolgt nach folgender Gesetzmäßigkeit:

$$\beta(\lambda) = \arcsin\left(\sin \alpha - \frac{\lambda}{d}\right) \quad (3.1)$$

Der Gitterspektrometer muss so kompakt sein, dass er als fahrbares Element in einen Flachbettscanner eingebaut werden kann. Zusätzlich muss er das Bild seines Eingangsspalt es nicht nur spektral zerlegen, sondern auch die Anordnung der Bildpunkte spektral zerlegt auf die Breite eines CCD-Chips scharf abbilden.

Mit der folgenden Beziehung lassen sich die physikalischen Grenzen einer Rowlandkreisordnung für den Spektralen Flachbettscanner grafisch darstellen:

$$l = \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{360} \cdot \left| \arcsin\left(\sin \alpha - \frac{\lambda_1}{d}\right) - \arcsin\left(\sin \alpha - \frac{\lambda_2}{d}\right) \right| \quad (3.2)$$

wobei die Größen folgende Bedeutung haben:

- l: Länge des Kreisbogens auf dem das Spektrum von der Wellenlänge λ_1 bis λ_2 abgebildet wird;
- r: Radius des Rowlandkreises; Gitterkrümmungsradius $R = 2 r$;
- α : Einfallswinkel bzgl. der Gitternormale;
- d: Gitterkonstante;

Bleibt die Länge l des Kreisbogens, auf der das Spektrum von 380 nm bis 780 nm abgebildet wird, mit 4,8 mm konstant, so kann der Konkavradius in Abhängigkeit von den Gitterlinien pro mm ermittelt werden. Im folgenden Diagramm (Abb. 3.2) ist der Konkavradius gegenüber den Gitterlinien pro mm aufgetragen. Der Einfallswinkel α wurde auf 30° gesetzt.

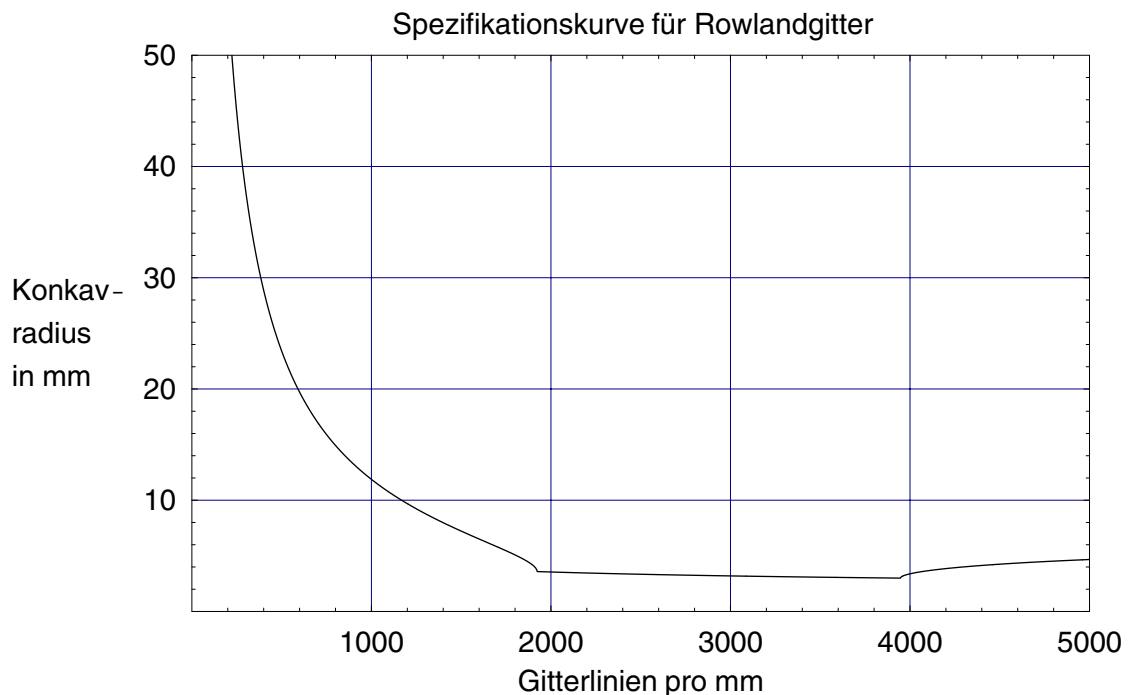


Abb. 3.2: Physikalische Grenze einer Rowlandkreisanordnung mit $l = 4,8$ mm. Unterhalb der Kurve ist die Verteilung des Spektrums von λ_1 bis λ_2 kleiner als l und oberhalb der Kurve größer als l .

Deutlich ist zu sehen, dass ein geeignetes Gitter unter 200 Gitterlinien pro mm hat, da nur hier die Konkavradien im technisch leicht realisierbaren Bereich über 5 cm liegen.

In Abb. 3.3 wird dieser technisch realisierbare Bereich näher betrachtet und gleichzeitig der Einfallswinkel als dritte Dimension eingeführt. Der Einfallswinkel sollte mindestens so groß sein, dass Eingangsspalt und Kameragehäuse noch genug Platz haben (Abb. 2.4). Das Diagramm zeigt, dass bei steigendem Einfallswinkel der Spielraum für die technische Realisierbarkeit kleiner wird.

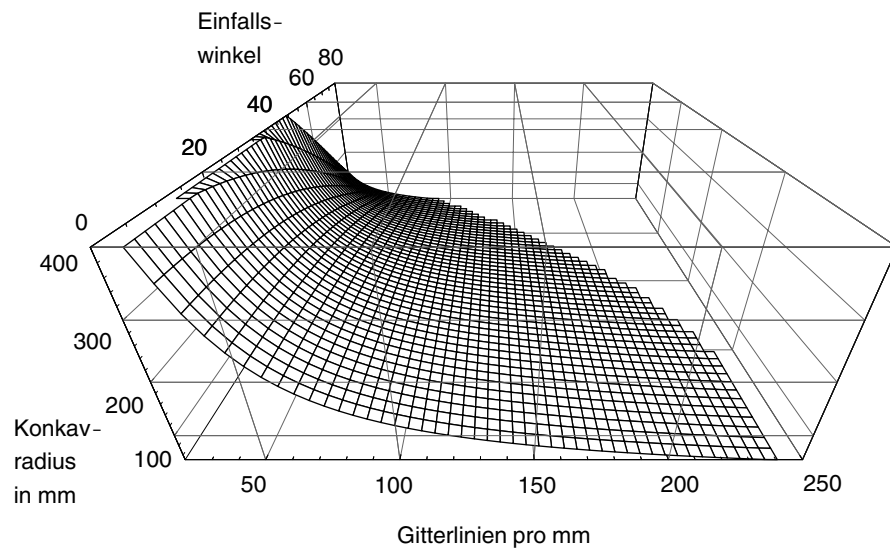


Abb. 3.3: Physikalische Grenzfläche der Rowlandkreisanordnung mit Berücksichtigung des Einstrahlwinkels

Ein Einstrahlwinkel von 30° führt zu einer zweckmäßigen Montierung des CCD-Sensors mit seinem Gehäuse. Deshalb ist in der Abb. 3.4 der Einfallswinkel bei 30° wieder konstant gehalten.

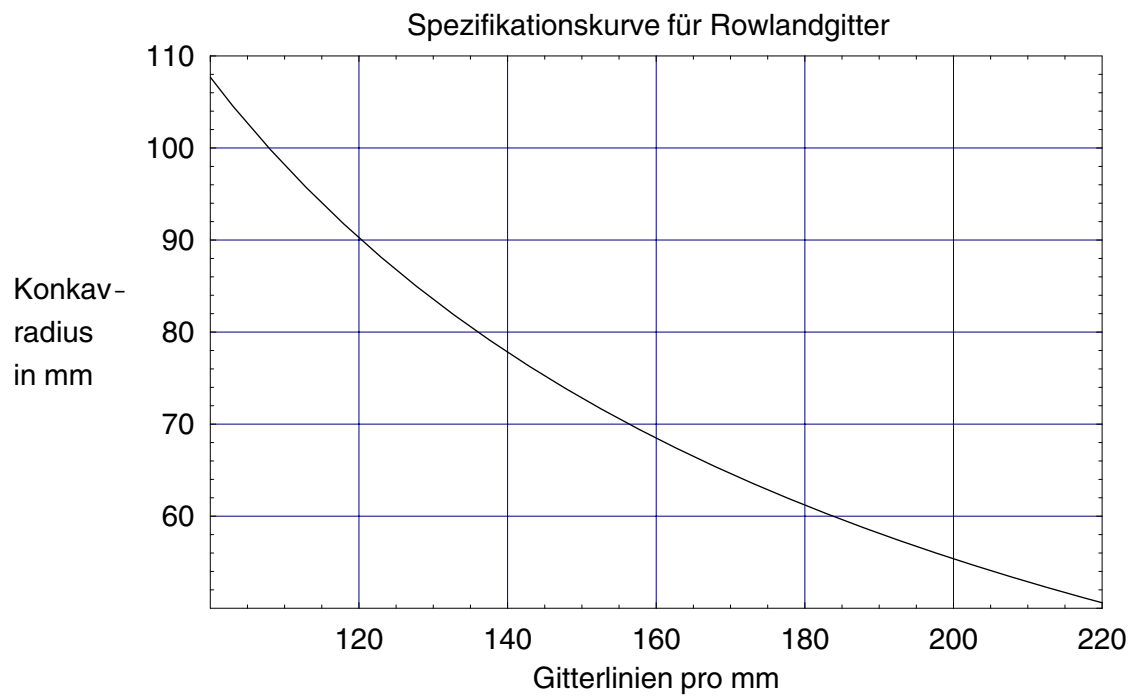


Abb. 3.4: Wie Abb. 3.2 unter Betracht geeigneter Größen für die technische Konstruktion

Ein Konkavradius $R = 90,147$ mm und 120 Gitterlinien pro mm ergeben ein geeignetes Konkavgitter im Spektrometer des Spektralen Flachbettscanners.

3.2 Abschätzung der benötigten Lampenleistung zur Beleuchtung

Das entscheidende Prinzip des Spektralen Flachbettscanners ist die Zerlegung des Lichtes in seine spektralen Komponenten. Damit jeder der spektralen Farbkanäle ein messbares Signal für den CCD-Chip liefert, benötigt der Spektrale Flachbettscanner eine höhere Lichtenergie als der Dreifarbenscanner. Um die Beleuchtungsart des Scanners festlegen zu können, ist es von Bedeutung, die benötigte Lampenleistung zu berechnen.

Die benötigte Lampenleistung hängt im wesentlichen von folgenden Punkten ab:

1. Der Effizienz, mit der die Lichtquelle genutzt wird,
2. der Einkoppelung des Lichtes in den Lichtleiterquerschnittswandler und der Transmission des Lichtleiterquerschnittswandlers zu Beleuchtung der Bildzeile,
3. der Empfindlichkeit des CCD-Detektors und dem notwendigen Signal/Rausch-Verhältnis,
4. der spektralen Auflösung,
5. der Beleuchtungszeit,
6. der Öffnung der abbildenden Linse und des Spektrometers und
7. der spektralen Transmission des Spektrometers.

Aus folgenden Beziehungen kann die erforderliche Lichtleistung abgeschätzt werden:

1. Der Bruchteil c_L der spektralen Strahlungsenergie der Lichtquelle, der in den Eingang des Lichtleiterquerschnittswandlers fokussiert wird, beträgt ca. 10%.

Hiervon werden dann $k_L = 60\%$ in den Querschnittswandler eingekoppelt, da aufgrund der Bündelung der Lichtleiterfaser und ihrer Hülle 40 % der Fläche ungenutzt bleiben.

Die Transmission t_{LL} des Lichtleiterquerschnittswandlers, mit dem die Bildzeile beleuchtet wird, beträgt ca. 90 %.

Somit bestimmt c_L als Nutzungseffizienz der Lichtquelle, k_L als Anteil des Lichtes, der eingekoppelt wird und die Transmission t_{LL} die spektrale Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda LL}$ nach Verlassen des Lichtleiterquerschnittswandlers:

$$\Phi_{\lambda LL} = t_{LL} \cdot k_L \cdot c_L \cdot \Phi_{\lambda 0} \quad [\text{W/nm}]$$

2. Die spektrale Strahldichte $L_{\lambda T}$, die von der zu scannenden Bildzeile ausgeht, lässt sich nun mit der spektralen Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda LL}$ ermitteln. Dabei wird die beleuchtete Bildzeile als diffuser Lambertscher Strahler vorausgesetzt¹³. Die beleuchtete Bildzeile hat die Fläche A_T und die konstante Reflexion r . Dann kann die spektrale Strahldichte $L_{\lambda T}$ mit der spektralen Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda LL}$ in folgender Gleichung ausgedrückt werden:

$$L_{\lambda T} = r \cdot \frac{\Phi_{\lambda LL}}{\pi \cdot A_T} \quad [\text{W}/(\text{sr m}^2 \text{ nm})]$$

3. Bevor das von der Bildzeile reflektierte Licht die Optik des Spektrometers erreicht, wird es von drei Ablenkspiegeln leicht abgeschwächt. Entsprechend vermindert sich die spektrale Strahldichte $L_{\lambda T}$:

$$L_{\lambda TSp} = r_{Sp}^3 \cdot L_{\lambda T} \quad [\text{W}/(\text{sr m}^2 \text{ nm})]$$

4. Mit der spektralen Strahldichte $L_{\lambda TSp}$ kann die spektrale Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda Sp}$ auf der Öffnung des Achromaten vor dem Spektrometer ermittelt werden:

$$\Phi_{\lambda Sp} = L_{\lambda TSp} \cdot A_T \cdot A_0 / D^2 \quad [\text{W/nm}]$$

mit D : Entfernung Originalbildzeile/Achromat;

A_T als Originalbildzeilenfläche, die auf den Eintrittspalt des Spektrometers abgebildet wird und

$A_0 = \pi \cdot r^2$, wobei r der Radius der Öffnung des Achromaten ist.

5. Die spektrale Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda_{Sp}}$ ist notwendig, um die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda_{Sp}}$ am Eingangspalt des Spektrometers berechnen zu können. Der Achromat fokussiert die Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda_{Sp}}$ auf den Ort des Eingangsspalt des Spektrometers mit der Größe A_{BS} . Der Eingangspalt hat indessen die kleinere Fläche A_{ES} , auf der die spektrale Bestrahlungsstärke E_{λ_S} entsteht:

$$E_{\lambda_S} = \Phi_{\lambda_{Sp}} \cdot \frac{A_{ES}}{A_{BS}} \quad [W/(m^2 \text{ nm})]$$

6. Um die Strahlungsenergiedichte ε_S auf der CCD-Oberfläche zu bestimmen, wird eine CCD-Zeilenzusammenfassung mit der spektralen Auflösung $\Delta\lambda$ betrachtet, also die CCD-Pixel mit dem gleichen Wellenlängenintervall:

$$\varepsilon_S = E_{\lambda_S} \cdot \Delta\lambda \cdot t \cdot T \quad [J/m^2].$$

Hierbei ist t die Belichtungszeit und T die Transmission des Spektrometers.

Für die weitere Abschätzung wird die Energiedichte, die dem Rauschen entspricht und das Signal/Rausch-Verhältnis (S/N) der CCD benötigt. Die Berechnung erfolgt bei 400 nm, da bei den höheren Wellenlängen günstigere Werte zu erwarten sind.

Laut Angabe des CCD-Herstellers beträgt das Rauschen in Elektronen pro Pixel:

$$N = 70 \text{ Elektronen}$$

Die Quanteneffektivität beträgt bei 400 nm ca. 25 %:

$$Q = 0,25$$

Das bedeutet, das Rauschen entspricht 280 Photonen pro Pixel.

Ausgehend davon, dass die Energie eines Photons $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ ist, ergibt sich für die Energiedichte ε_N des Rauschens eines Farbkanals $\Delta\lambda$ auf der CCD-Fläche, wenn ein Farbkanal mit 7 Pixelzeilen gemessen wird:

$$\varepsilon_N = \frac{1}{\sqrt{7}} \cdot \frac{N}{Q} \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot A_P} \quad [\text{J/m}^2],$$

wobei A_P die Fläche eines CCD-Pixels ist.

Mit den vorstehenden Beziehungen kann die spektrale Strahlungsenergie $\Phi_{\lambda 0}$ der Lampe aus dem Verhältnis

$$\frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_N} = \frac{S}{N}$$

ermittelt werden.

Es folgt für die spektrale Strahlungsleistung der Lampe:

$$\Phi_{\lambda 0} = \varepsilon_N \cdot \left(\frac{S}{N} \right) \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \frac{A_{EB}^2}{A_{ES}} \cdot \frac{1}{r_{Sp}^3 \cdot r \cdot \Delta\lambda \cdot t \cdot T \cdot t_{LL} \cdot k_L \cdot c_L \cdot A_0} \quad (3.3)$$

Bei Einsatz von

$$\begin{aligned} \varepsilon_N &= 7,36 \times 10^{-7} \text{ J/m}^2; \text{ S/N} = 100; \text{ D} = 300 \text{ mm}; \text{ A}_{\text{EB}} = 200 \text{ } \mu\text{m} \times 70 \text{ mm}; \\ \text{A}_{\text{ES}} &= 50 \text{ } \mu\text{m} \times 25 \text{ mm}; \text{ r}_{\text{sp}} = 0,9; \text{ r} = 0,5; \Delta\lambda_{\text{min}} = 5 \text{ nm}; \text{ t} = 1,5 \text{ s}; \\ \text{T} &= 0,10; \text{ t}_{\text{LL}} = 0,90; \text{ k}_L = 0,60; \text{ c}_L = 0,1; \text{ A}_0 = 78,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

führt die Abschätzung zu einer spektralen Strahlungsleistung der Lampe bei 400 nm zu

$$\Phi_{400\text{nm}} = 2,82 \text{ mW/nm.}$$

Wie in der Abb. 3.5 zu sehen ist, reicht bei 400 nm eine 12 V 100 W Halogen-
glühlampe aus. Mit zunehmender Wellenlänge liegt die benötigte Strahlungs-
leistung stärker unterhalb der Kurve der Strahlungsleistung der Lampe. Die
Lampe kann sogar mit geringerer Leistung als der Nennwert betrieben werden,
was die Lebensdauer erhöht.

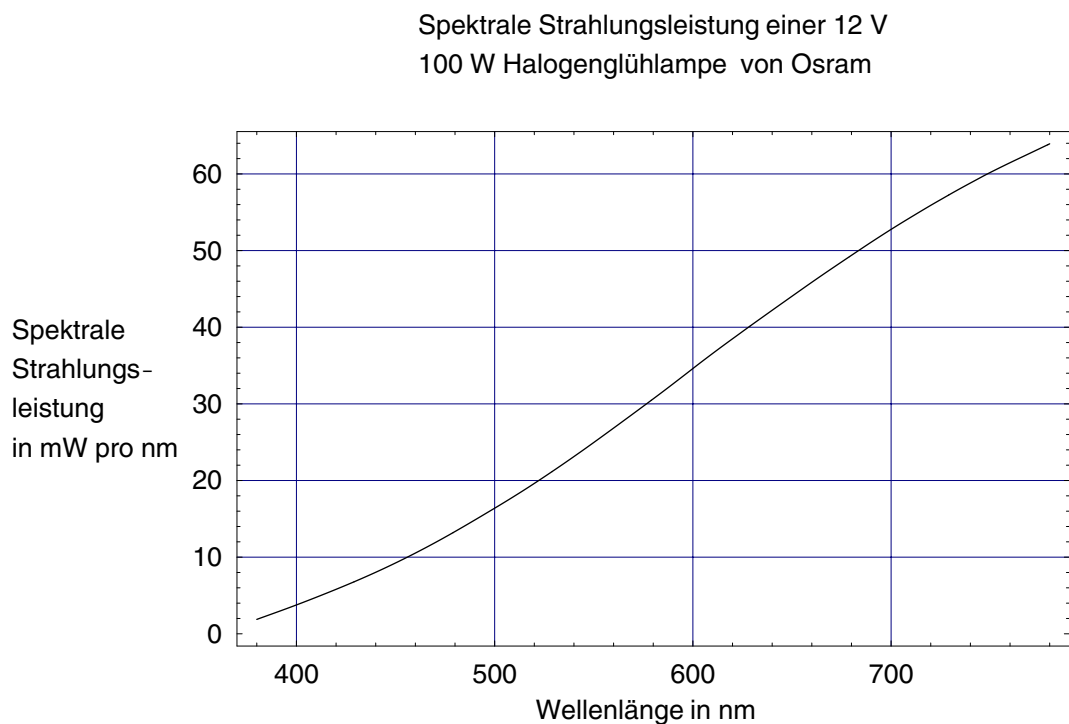


Abb. 3.5: Verlauf der spektralen Strahlungsleistung einer 12 V 100 W Halogen-
glühlampe von Osram, gemessen laut Angabe des Herstellers mit einem De-
tektor aus großer Entfernung

Abb. 3.6 zeigt die relative spektrale Systemantwort gebildet aus dem Produkt der spektralen Strahlungsleistung der 12 V 100 W Halogenglühlampe und der relativen spektralen Empfindlichkeit des verwendeten CCD-Sensors. Die spektrale Transmission der Linsen, des Lichtleiters und des Spektrometers sind vernachlässigt, da ihre spektrale Transmission in einem vergleichbaren Rahmen gehalten werden können. Da das S/N-Verhältnis sich proportional zur relativen Systemantwort verhält, glättet das Wegfiltern von Licht mit geeigneten optischen Filtern diese Kurve. Eine zu starke spektrale Veränderung des S/N-Verhältnisses wird dadurch vermieden.

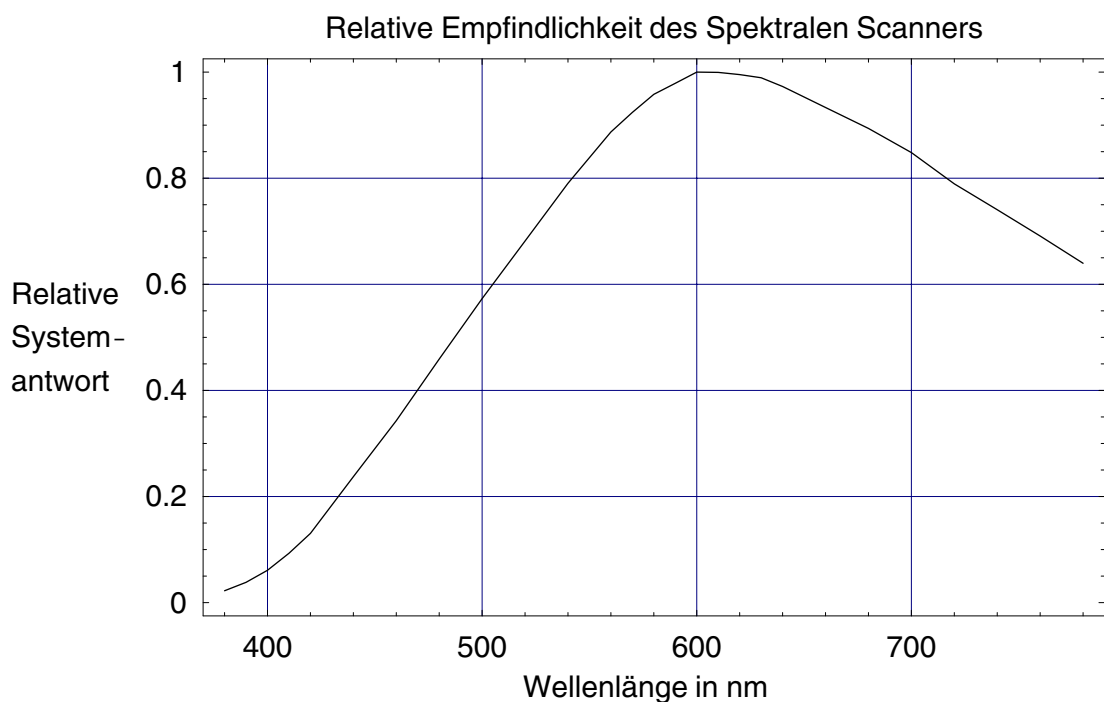


Abb. 3.6: Verlauf der relativen spektralen Systemantwort aus CCD-Sensor und Halogenglühlampe

3.3 Größe des scanbaren Bildes, Auflösung der Abbildung und spektrale Auflösung, Geschwindigkeit

Der konstruierte Spektrale Flachbettscanner ist in der Lage, ein Bild von 7 cm Breite und 25 cm Länge zu scannen.

Die Auflösung in Scanrichtung beträgt 170 dpi und ist abhängig von der Breite des Eintrittspaltes des Spektrometers.

Die Auflösung in Zeilenrichtung ist abhängig vom Abbildungsmaßstab und von der Anzahl der effektiven Bildpunkte in Zeilenrichtung auf der CCD. Sie beträgt bei einem Bild mit 7 cm Breite ca. 200 dpi.

Die Auflösungsgrenze des Gitters liegt bei $\Delta\lambda_{600} = 1,2 \text{ nm}$. Der Eintrittsspalt des Spektrometers hat eine Breite von $d = 50 \text{ }\mu\text{m}$. Damit ist Beugung noch vernachlässigbar. Da der Spalt auf die CCD-Sensorfläche spektral zerlegt in 1. Ordnung abgebildet wird, ergibt sich die Anzahl der spektralen Kanäle aus der spektralen Breite auf der CCD in 1. Ordnung dividiert durch die Spaltbreite d . Die Anzahl der Farbkanäle ist somit auf 96 begrenzt.

Die Pixelanordnung auf dem CCD-Sensor erlaubt es, mit 7 CCD-Pixelspalten einen Farbkanal aufzunehmen.

Die Scangeschwindigkeit liegt bei 12 Sekunde pro mm. Ein Bild von 10 cm Länge benötigt 20 Minuten.

4. Verarbeitung der gescannten Daten

4.1 Kalibrierung des Spektralen Flachbettscanners

Die Kalibrierung des Spektralen Flachbettscanners erfordert folgende Schritte:

1. Die Kalibrierung der spektralen Achse für die Aufnahme der Bilder erfolgt mit Spektrallampen mit bekannten Spektrallinien, wie Na, Cd, He und K.
2. Bei Sperrung des Lichteintritts kann das Dunkelbild aufgenommen und gespeichert werden.
3. Aufnahme und Speicherung des Bildes als Weißreferenz. Für die Daten der Reflexion muss ein Referenztarget mit bekannter spektraler Reflexion verwendet werden. Hierfür eignet sich eine weiße Keramikplatte.

Dunkelbild, Weißbild und später die Farbbilder müssen mit den gleichen Systemparametern wie Belichtungszeit, Linsensystembrennweite und Temperatur aufgenommen werden.

4.2 Die Reflexion des Farbbildes

Die Reflexion des Farbbildes wird Pixel für Pixel aus dem Verhältnis von jedem Farbbildpunkt zum Weißbild ermittelt, wobei das Dunkelbild schon vom Farb- und Weißbild abgezogen ist:

$$R_{ij} = \frac{\text{Farbbild}_{ij} - \text{Dunkelbild}_{ij}}{\text{Weißbild}_{ij} - \text{Dunkelbild}_{ij}} \quad (4.1)$$

Die Indizes i und j bezeichnen die Bildpunkte nach Bildzeile und –spalte.

Diese Berechnungsformel trennt die Reflexion des Farbbildes aus der Systemantwort und führt zum Ausgleich

- des Offsets, der durch den CCD-Dunkelstrom verursacht wird,
- der ungleichförmigen Zeilenbeleuchtung und
- des Drifts der Farbtemperatur der Lichtquelle.

Das optische Streulicht, welches auf die Detektorfläche auftrifft, verursacht einen zusätzlichen Offset der Signale. Ursache für das Streulicht sind die Reflexion von Licht an den Wänden des Spektrometergehäuses, Reflexion an den optischen Komponenten sowie Beugung und Fluoreszenz an der Oberfläche oder innerhalb der optischen Komponenten. Das Streulicht ist abhängig von der Menge des Lichtes, das in das optische System des Spektrometers eintritt. Das Weißbild und jede Scanzeile haben deshalb ihren eigenen Offset. Daher ist es zweckmäßig, die Reflexion mit einem durchschnittlichen Offsetwert zu berechnen. Die Gleichung für die Reflexion des Farbbildes ändert sich somit zu

$$R_{ij} = \frac{\text{Farbbild}_{ij} - \text{Offset}_{\text{Farbzeile}} - \text{Dunkelbild}_{ij}}{\text{Weißbild}_{ij} - \text{Offset}_{\text{Weißbild}} - \text{Dunkelbild}_{ij}} \quad (4.2).$$

4.3 Bildschirmdarstellung und Dateiabspeicherung spektral gescannter Bilder sowie die Bestimmung ihrer Qualität

Die Normfarbwerte X, Y, Z einer Farbvalenz im CIE-System von 1931 lassen sich mit Hilfe der Normspektralwertkurven $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ und des Farbreizes des Objektes berechnen ¹⁴:

$$X = k \int_{\lambda} \phi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda,$$

$$Y = k \int_{\lambda} \phi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda,$$

$$Z = k \int_{\lambda} \phi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda, \text{ mit}$$

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda} \text{ und}$$

$$\phi = \beta(\lambda) S(\lambda) \text{ als Farbreiz des Objektes}$$

wobei $\beta(\lambda)$ die spektrale Reflexion des beleuchteten Objekts ist, und $S(\lambda)$ ist die spektrale Intensität mit der das Objekt von der Lichtquelle beleuchtet wird. Die Integration umfasst den sichtbaren Bereich des Spektrums von $\lambda = 380 \text{ nm}$ bis $\lambda = 770 \text{ nm}$.

Die praktische Berechnung der Normfarbwerte nach den obigen Gleichungen vereinfacht sich mit einer Annäherung der Integrale durch Summen:

$$X = k \sum_{\lambda=\lambda_a}^{\lambda_b} \phi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \quad (4.3),$$

$$Y = k \sum_{\lambda=\lambda_a}^{\lambda_b} \phi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \quad (4.4),$$

$$Z = k \sum_{\lambda=\lambda_a}^{\lambda_b} \phi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \quad (4.5), \text{ mit}$$

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda=\lambda_a}^{\lambda_b} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \quad (4.6).$$

Die Aufsummierung erfolgt in diskreten Abständen von $\lambda_a = 380 \text{ nm}$ bis $\lambda_b = 770 \text{ nm}$ innerhalb des sichtbaren Spektrums.

Die Normspektralwertkurven, die spektrale Reflexion und die spektrale Intensität der Lichtquelle stehen nicht als analytische Funktionen sondern als numerische Wertemenge zur Verfügung. Wird zum Beispiel die spektrale Reflexion $\beta(\lambda)$ eines Objektes durch N Werte bei N Wellenlängen im sichtbaren Bereich von 380 nm bis 770 nm gemessen, erfolgt die Formulierung als N -dimensionaler transponierter Spaltenvektor $\mathbf{f} = [\beta(\lambda_1), \beta(\lambda_2), \dots, \beta(\lambda_N)]^T$. Die N diskreten Werte der Beleuchtung lassen sich in einer N -dimensionale Diagonalmatrix \mathbf{L} ausdrücken:

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} S(\lambda_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S(\lambda_2) & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & S(\lambda_N) \end{pmatrix} \quad (4.7).$$

Der Farbreiz des Objektes $\phi = \beta(\lambda)S(\lambda)$ ergibt sich jetzt als Matrixprodukt $(\mathbf{L} \cdot \mathbf{f})$.

Mit $\mathbf{a}_{\bar{x}} = [\bar{x}(\lambda_1), \bar{x}(\lambda_2), \dots, \bar{x}(\lambda_N)]^T$ und entsprechenden $\mathbf{a}_{\bar{y}}$ sowie $\mathbf{a}_{\bar{z}}$ werden auch die Normspektralwertkurven in eine Matrix $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_{\bar{x}}, \mathbf{a}_{\bar{y}}, \mathbf{a}_{\bar{z}}]^T$ gefasst. Nun ergeben sich die Normfarbwerte X, Y, Z :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = k \mathbf{A} \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{f} \quad (4.8).$$

Für k gilt $k = \frac{100}{\mathbf{a}_{\bar{y}}^T \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{e}_N}$ mit \mathbf{e}_N als N-dimensionaler Einheitsvektor.

Um die gescannten Bilder mit gängigen Programmen zu bearbeiten und um die Güte der kodierten Bilddaten zu bestimmen und zu vergleichen, erfolgt die Transformierung der spektralen Farbdaten in den empfindungsgemäß gleichabständigen Farbraum CIELAB-1976. Die intensitätslinearen Größen werden nun mit den Normfarbwerten aus Gleichung (4.8) durch folgende Beziehungen in empfindungslineare Größen umgewandelt ¹⁵:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \cdot Y^* - 16, \\ a^* &= 500 \cdot (X^* - Y^*), \\ b^* &= 200 \cdot (Y^* - Z^*), \end{aligned}$$

wobei

$$X^* = \sqrt[3]{\frac{X}{X_0}} \quad \text{für } \frac{X}{X_0} > 0,008856,$$

$$X^* = 7,787 \cdot \frac{X}{X_0} + 0,138 \quad \text{für } \frac{X}{X_0} \leq 0,008856,$$

$$Y^* = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} \quad \text{für } \frac{Y}{Y_0} > 0,008856,$$

$$Y^* = 7,787 \cdot \frac{Y}{Y_0} + 0,138 \quad \text{für } \frac{Y}{Y_0} \leq 0,008856,$$

$$Z^* = \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_0}} \quad \text{für } \frac{Z}{Z_0} > 0,008856,$$

$$Z^* = 7,787 \cdot \frac{Z}{Z_0} + 0,138 \quad \text{für } \frac{Z}{Z_0} \leq 0,008856.$$

Die Größen X_0 , Y_0 , Z_0 bezeichnen die Normfarbwerte der unbunten Bezugsfarbe, im Falle des Spektralen Scanners sind es die Farbwerte der Lichtart E.

Die spektral gescannten Bilder werden schließlich in dem zum CIELAB kompatiblen TIFF-Datenformat abgespeichert.

In einem empfindungsgemäß gleichabständigen Farbraum sind die geometrischen Abstände direkt proportional zu den empfindungsgemäßen Farbabständen. Mit dem Farbabstandsmodell CIE 1994 (ΔL^* ΔC^*_{ab} ΔH^*_{ab}) können die empfindungsgemäße Farbabstände im gesamten Farbraum den gleichen geometrischen Abständen zugeordnet werden ¹⁶. Die Berechnung der Farbabstände erfordert die Größen C^*_{ab} für die Buntheit

$$C^*_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

und

$$\Delta H^*_{ab} = \sqrt{\Delta E^{*2}_{ab} - \Delta L^{*2} - \Delta C^{*2}_{ab}} .$$

Zwei verschiedene oder ähnliche Farben haben folgenden Farbabstand:

$$\Delta E^*_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{k_H S_H}\right)^2} \quad (4.9)$$

wobei

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + 0,045 C^*_{ab}$$

$$S_H = 1 + 0,015 C^*_{ab} .$$

Die Faktoren k_L , k_C und k_H legen eine relative Gewichtung der Helligkeit, der Buntheit und des Farbton-Winkels fest – entsprechend den Abweichungen von den Bezugsbedingungen ¹⁶ des Farbabstandsmodells CIE 1994 (ΔL^* ΔC^*_{ab} ΔH^*_{ab}). Unter den Bezugsbedingungen sind alle $k = 1,0$.

Mit dem Farbabstand lässt sich die Qualität der Farbreproduktion des Spektralen Scanners bewerten.

Die Normfarbwerte X, Y, Z stellen keine technisch darstellbare Farbwerte dar. Ein Bild direkt auf dem Bildschirm darstellen zu können, erfordert die Primärfarbwerte R, G, B. Diese lassen sich als Ansteuersignale eines Bildschirms nutzen, da die Farbwertdarstellung auf einem Farbbildschirm der additiven Farbmischung der Primärfarbwerte R, G, B entspricht.

Für die unmittelbare Darstellung des gescannten Bildes auf einem Monitorbildschirm mit der Software des Scanners eignet sich der Standardfarbraum sRGB¹⁷. Hierbei handelt es sich um eine geräteunabhängige Farbdefinition, die sich an die durchschnittlichen Einsatzbedingungen und den üblichen technischen Zustand eines Farbmonitors orientiert. Es bietet sich deshalb an, diesen Farbraum als einen allgemein gültigen Ersatzfarbraum zu nutzen, wenn keine kalibrierten Monitordaten vorliegen. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, mit diesem Farbraum über Farbprofile den Monitor anzusteuern.

Die Beziehung der Normfarbwerte X, Y und Z zu den drei Primärfarbwerten des sRGB-Farbraum wird durch folgende projektive Transformation ausgedrückt:

$$\begin{pmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,2410 & -1,5374 & -0,4986 \\ -0,9692 & 1,8760 & 0,0416 \\ 0,0556 & -0,2040 & 1,0570 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.10).$$

Primärfarbwerte des sRGB-Farbraumes, die negative oder größere Werte als 1,00 ergeben, werden auf 0,0 bzw. 1,0 gesetzt.

Danach erfolgt die Transformation zu nichtlinearen sR'G'B'-Werten:

Falls $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} \leq 0,00304$ gilt

$$R'_{sRGB} = 12,92 \cdot R_{sRGB},$$

$$B'_{sRGB} = 12,92 \cdot G_{sRGB},$$

$$B'_{sRGB} = 12,92 \cdot B_{sRGB}$$

und bei $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} > 0,00304$

$$R'_{sRGB} = 1,055 \cdot R_{sRGB}^{(1,0/2,4)} - 0,055,$$

$$G'_{sRGB} = 1,055 \cdot G_{sRGB}^{(1,0/2,4)} - 0,055,$$

$$B'_{sRGB} = 1,055 \cdot B_{sRGB}^{(1,0/2,4)} - 0,055.$$

Schließlich werden die sR'G'B'-Werte für die digitale Dateiabspeicherung vorbereitet:

$$R_{8bit} = 255,0 \cdot R'_{sRGB},$$

$$G_{8bit} = 255,0 \cdot G'_{sRGB},$$

$$B_{8bit} = 255,0 \cdot B'_{sRGB}.$$

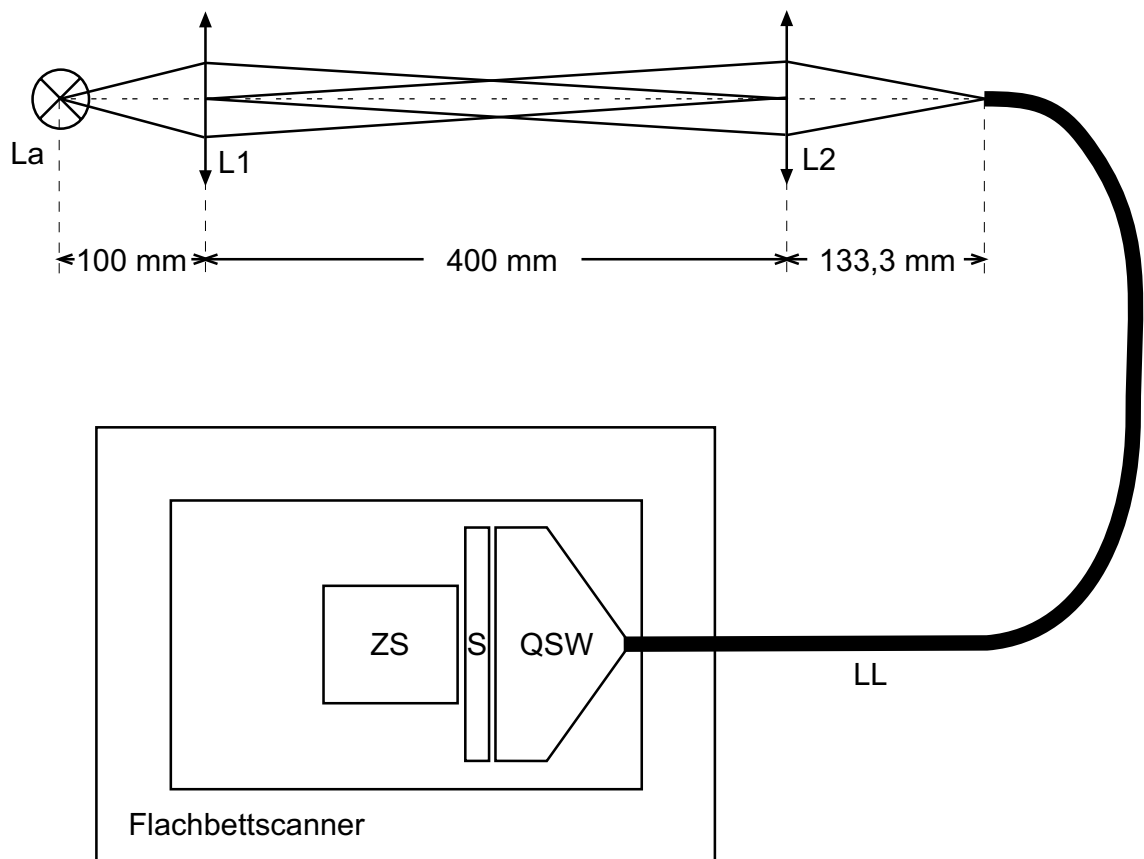
5. Aufbau des Spektralen Scanners im Labor

Die Optik des Zeilenspektrometers erfordert ein scharfes Zwischenbild des zu scannenden Zeilenausschnittes am Ort seines Eintrittspaltes. Da ein handelsüblicher Flachbettscanner eine abbildende Optik enthält, die ein scharfes Bild der Originalbildzeile auf eine CCD Sensorzeile erzeugt, besteht im Prinzip die Möglichkeit, den Zeilenspektrometer in jeden handelsüblichen Flachbettscanner einzubauen. Der Eintrittspalt des Zeilenspektrometers gliedert sich dann immer an der Stelle der früheren CCD Sensorzeile ein. Aus diesem Grunde ließ sich der Zeilenspektrometer problemlos in einen Agfa-Scanner vom Typ Arcus II einbauen. Beim Agfa Arcus II besteht die übernommene Optik aus dem Scannerflachbett für Reflexion, den drei Ablenkspiegel für einen kompakten Aufbau und einem Linsensystem, das eine 3 zu 1 Abbildung auf den Eintrittspalt ermöglicht. Beim Linsensystem handelt es sich um die optische Komponente 2 der Abb. 2.3. Die drei Ablenkspiegel befinden sich zwischen Scanner-Flachbett und der optischen Komponente 2.

Direkt über der Anordnung der Ablenkspiegel und unterhalb des Scanner-Flachbettes beleuchtet das fächerförmige Ende des Lichtleiterquerschnittswandlers die zu scannende Originalbildzeile. Das Originalbild reflektiert das durch das Scanner-Flachbett gekommene Licht. Es durchquert wieder das Scanner-Flachbett, geht durch das System der Ablenkspiegel, durch das abbildende Linsensystem des Arcus II und wird zu einem scharfen Zwischenbild am Ort des Eintrittspaltes.

Der Lichtleiterquerschnittswandler ist eine Sonderanfertigung der BTO Bungert GmbH, Weil der Stadt. Das fächerförmige Ende des Querschnittswandlers besteht aus 3 Lagen mit jeweils ca. 2780 AS UV..VIS 46/50/54 Quarz-Lichtwellenleitern. Die numerische Apertur des Lichtleiters liegt bei 0,22. Entgegen der Spezifikation steigt die Dämpfung ab 600 nm so stark an, dass ab 680 nm kein messbares Licht mehr durchgelassen wird. Aus diesem Grunde stand für die Versuche nur Licht bis ca. 600 nm in hinreichendem Maße zur Verfügung. Jedoch gibt es Lichtleitermaterial, das im sichtbaren Bereich komplett durchlässig ist.

Die Einkopplung des Lichtes in die ca. 8350 Lichtleitfaser erfordert eine gleichmäßige Beleuchtung der runden Fassung des Querschnittswandlers. Dies bewirkt die optische Anordnung in Abb. 5.1. Linse L1 bildet die Wendel der Halogenlampe auf die Eintrittspupille von Linse L2 ab und Linse L2 bildet die Austrittspupille von Linse L1 auf die runde Eintrittsfläche der Lichtleitfaser ab.



- La: Wolframhalogenlampe, 12 V 100 W
- L1: Quarzlinse, $f = 80$ mm
- L2: Quarzlinse, $f = 100$ mm
- LL: Quarzlichtleiter
- QSW: Querschnittswandler zur Zeilenbeleuchtung
- S: 1. Ablenkspiegel
- ZS: Zeilenspektrometer

Abb. 5.1: Gesamtaufbau des Spektralen Flachbettscanners mit Beleuchtung

Die folgenden Abbildungen zeigen Fotoaufnahmen des Spektralen Flachbettscanners und der Beleuchtungsoptik.

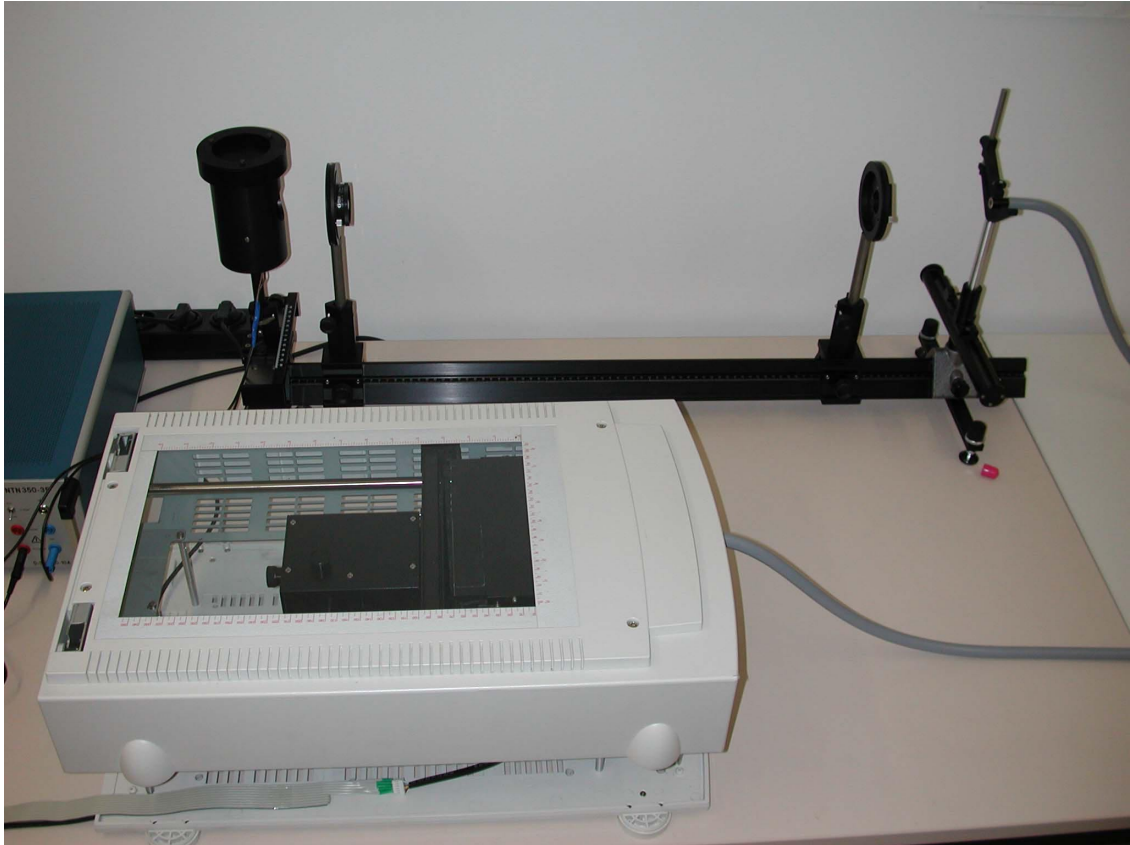


Abb. 5.2: Spektraler Flachbettscanner mit Beleuchtungsoptik

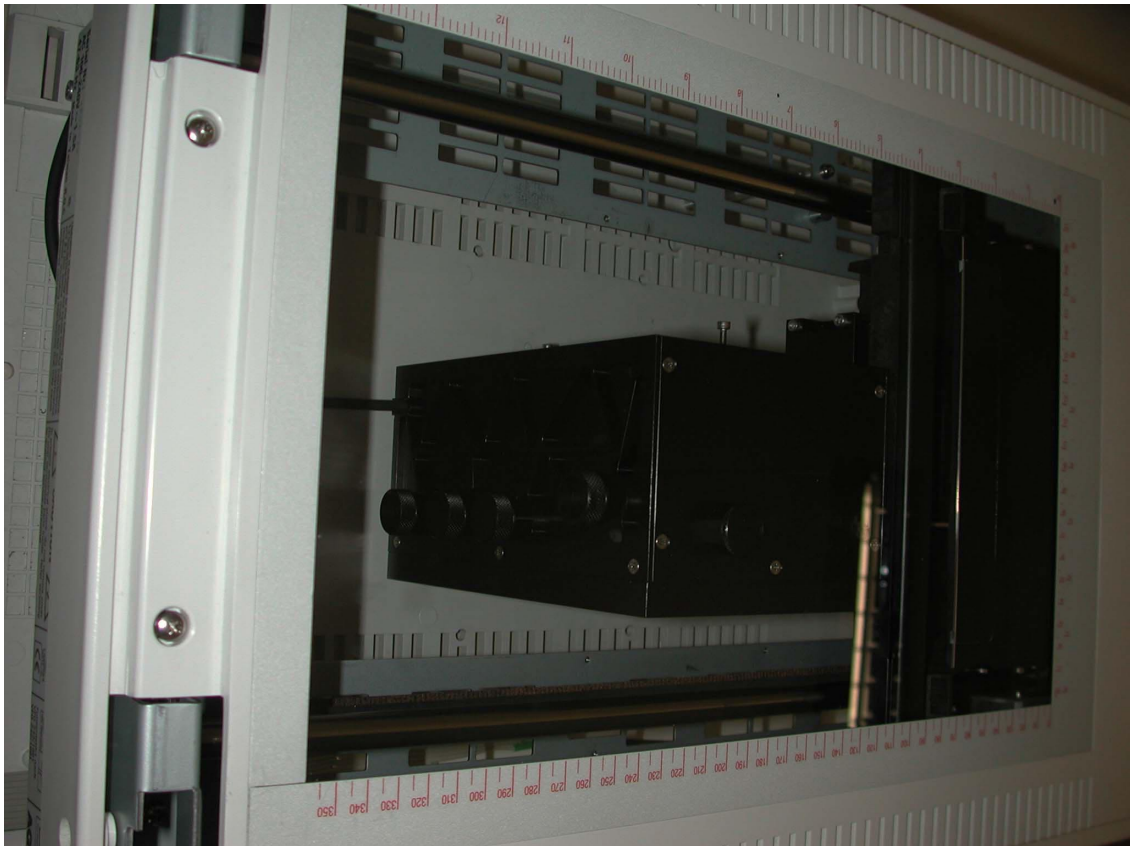


Abb. 5.3: Spektrometer des Spektralen Flachbettscanners

Die Stromversorgung der Wolframhalogenlampe übernimmt ein stromstabilisiertes Niederspannungsnetzgerät Typ NTN 350-35 von F.u.G. Elektronik, Rosenheim.

Der Schrittmotor des Agfa Arcus II zum Scandurchlauf wurde weiter genutzt. Die Ansteuerung erfüllt die Schrittmotoransteuerkarte PC-SM 30 von Owis, Staufen, die über das Betriebssystem Windows 2000 programmiert werden kann.

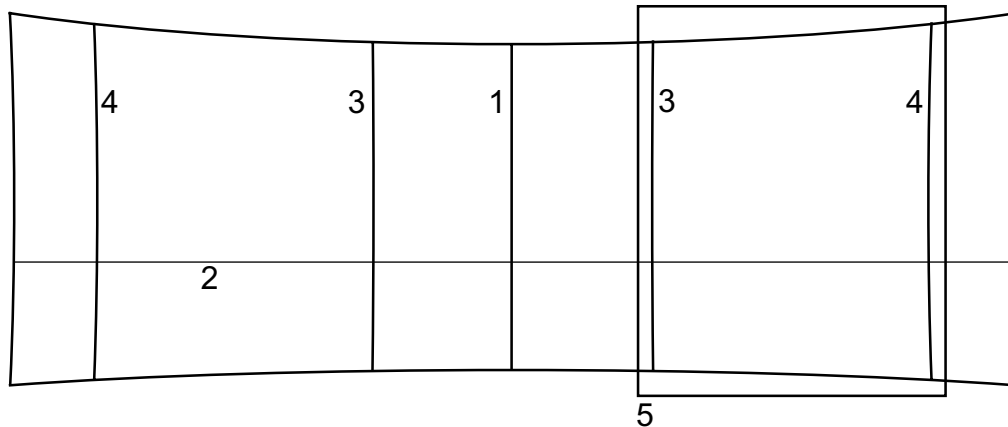
Die Schwarz/Weiß CCD-Kamera 280 SW-D/MB von Spindler und Hoyer ist ebenfalls über das Betriebssystem Windows 2000 gesteuert. Ihr Aufnahmebereich enthält 582 x 740 auslesbare Pixel. Auf der langen Seite mit 740 Pixel verteilt sich die Bildzeile und auf der kürzeren Seite mit 582 Pixel das Spektrum. Die Breite des Eingangspaltes von 50 μm bestimmt die spektrale Auflösung des Zeilenspektrometers. Deshalb lassen sich 79 spektrale Kanäle auf der CCD-Fläche aufteilen. Ein Kanal fasst 7 CCD-Zeilen zusammen. Somit definieren die

5 nm breiten Intervalle wie in Abb. 2.1 jeweils eine Farbe im sichtbaren Spektrum von 480 nm bis 770 nm. Da ein CCD-Pixel mit einer Aufnahmedynamik von 8 Bit arbeitet, ergibt sich durch die Integration von 7 Pixelzeilen eine Dynamik von $10 \frac{1}{2}$ Bit für einen Farbkanal. Die Summenbildung zur Berechnung der Normfarbwerte (Abschnitt 4.3) führt noch mal zu einer Verbesserung der Aufnahmedynamik um etwa 2 Bit.

Der Lauf des Schrittmotors, das Einschalten der Belichtungszeit der Kamera und das Auslesen der Bilddaten sind aufeinander abgestimmt. Aufgrund der langen Belichtungszeiten, ca. 1,5 s, muss der Schrittmotor für die Dauer der Belichtungszeit anhalten.

6. Korrektur der Optik durch die Software

Bei der Abbildung des Zeilenspektrums auf dem Rowlandkreis entsteht eine kissenförmige, positive Verzeichnung wie in Abb. 6.1 dargestellt.



- 1: Bildzeile als Spektrum 0. Ordnung
- 2: Symmetrieachse
- 3: Bildzeile bei 380 nm im Spektrum 1. Ordnung
- 4: Bildzeile bei 770 nm im Spektrum 1. Ordnung
- 5: CCD-Aufnahmefeld, 582 x 740 Pixel

Abb. 6.1: Spektrum 0. und 1. Ordnung des Bildzeilenspektrometers

Die Länge der auf dem CCD-Aufnahmefeld der Kamera abgebildeten spektralen Zeilen wächst mit zunehmender Wellenlänge. Die leichte Krümmung der spektralen Zeilen kann vernachlässigt werden.

Die Veränderung der Zeilenlänge muss dagegen beim Lesen der Pixel berücksichtigt werden. Denn ein Auslesen der Pixel in spektraler Richtung parallel zur Symmetrieachse 2 in Abb. 6.1 verursacht später beim reproduzierten Bild eine spektrale Farbverschiebung. Diese spektrale Farbverschiebung kommt um so stärker zum Vorschein je weiter der Bildpunkt von der Symmetrieachse 2 entfernt liegt. Beim Lesen der spektralen Daten eines Bildpunktes ist deshalb eine Richtungskorrektur, die von der Parallelität zur Seite des CCD-Feldes abweicht, erforderlich. Diese ist natürlich bei der Symmetrieachse 2 gleich Null und am Rand jeweils am größten.

Da lineare Verhältnisse angenähert werden können, lautet die Korrekturbeziehung für eine Pixelkoordinate in Richtung der Bildzeile:

$$x_{\text{korr}}(x, \lambda) = x + a \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_{\text{max}} - \lambda_0} (x - x_0) \quad (6.1)$$

x ist die Pixelstelle der Bildzeile vom Anfangspunkt der Bildzeile bei der Wellenlänge $\lambda_0 = 380 \text{ nm}$ gerechnet und x_{korr} die neue korrigierte Pixelstelle. x_0 bezeichnet die Pixelstelle der Bildzeile auf der Symmetrieachse in Abb. 6.1, auf der keine Korrektur stattfindet. a ist die Korrekturkonstante.

7. Scanverhalten

7.1 Linearität des CCD Sensors

Auch wenn der CCD Sensor selber linear arbeitet, kann daraus nicht geschlossen werden, dass er im optischen Aufbau des Spektrometers die Signale auch tatsächlich linear erfasst. Zum Beispiel verursacht das Streulicht im Spektrometer, dass auf den CCD Sensor auftrifft, eine Störung der Linearität.

Beim vorliegenden Spektrometer kann das Streulicht in zwei Arten aufgeteilt werden:

Die erste Art des Streulichts verteilt sich im Wesentlichen in Richtung der Zeile. Dieses Streulicht wird später in Abschnitt 7.3 noch besprochen.

Die zweite Art des Streulichtes verteilt sich dagegen in Richtung der spektralen Aufteilung des CCD Sensors. Es macht sich durch Störung der Linearität bemerkbar, wenn die Linearität unter Ausschluss des Streulichtes in Zeilenrichtung gemessen wird. Dies ist möglich mit Hilfe von in Zeilenrichtung homogenen Grauzeilern unterschiedlicher Remission. Hierzu wurden auf dem Scannerflachbett Graufächen unterschiedlicher Remission aufgelegt.

Eine Linearitätsüberprüfung des CCD Sensors wurde auf diese Weise bei 400, 450, 500, 550 und 600 nm vorgenommen. Die Remission der Graufächen wurde einerseits mit einem SPM 50 von Gretag gemessen und andererseits mit dem Spektralen Flachbettscanner. Die Ergebnisse der beiden Messgeräte sind in den Diagrammen Abb. 7.1 bis Abb. 7.5 gegeneinander aufgetragen. Als Bezugsmessung dient die Kalibrierung mit einer weißen Keramikfläche. Die Aussteuerung des Detektors ergab bei der weißen Keramikfläche Messergebnisse im obersten Teil des Messbereichs von 0 bis 255. Für die niedrigen Remissionswerte wurde die Fläche von schwarzer Pappe gewählt.

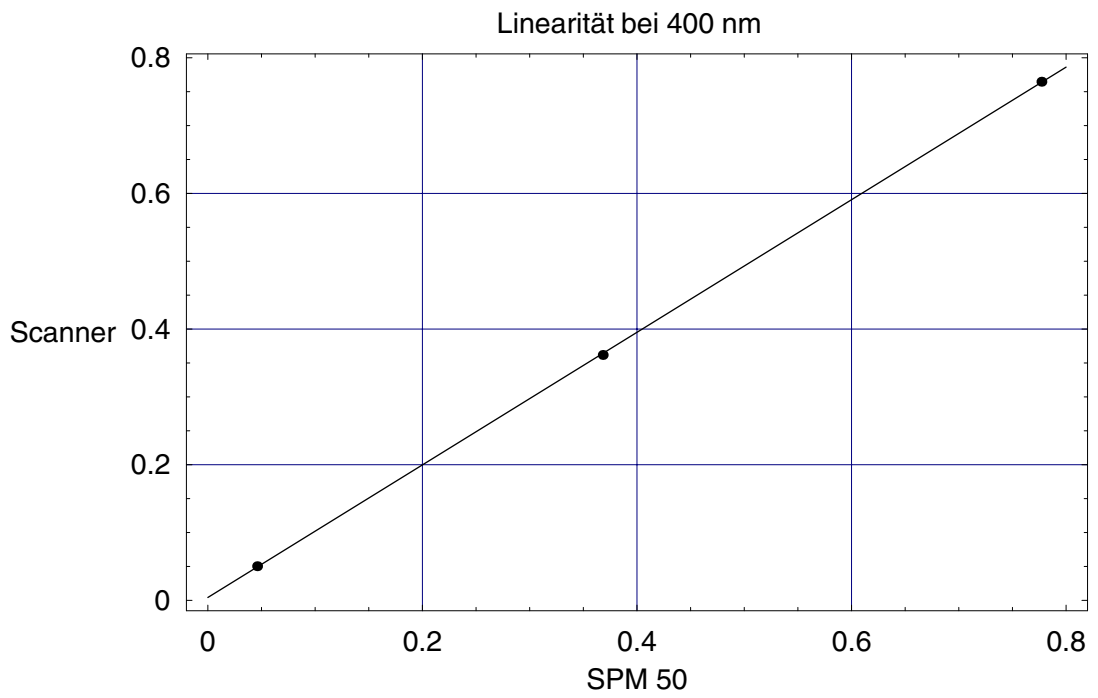


Abb. 7.1: Linearitätsüberprüfung bei 400 nm

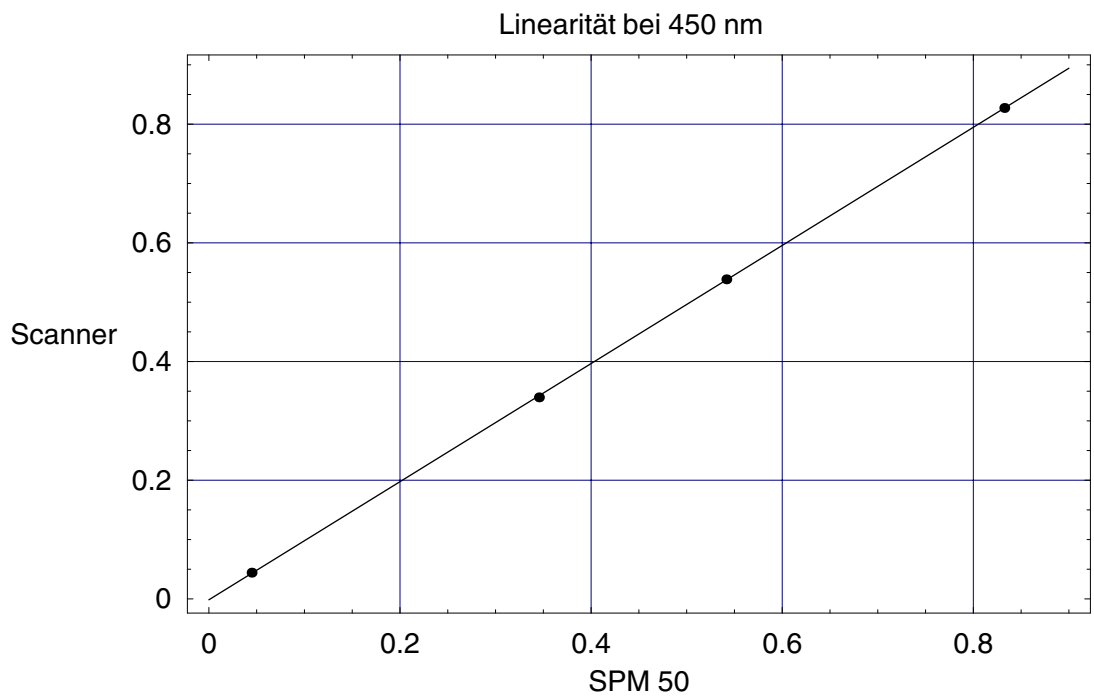


Abb. 7.2: Linearitätsüberprüfung bei 450 nm

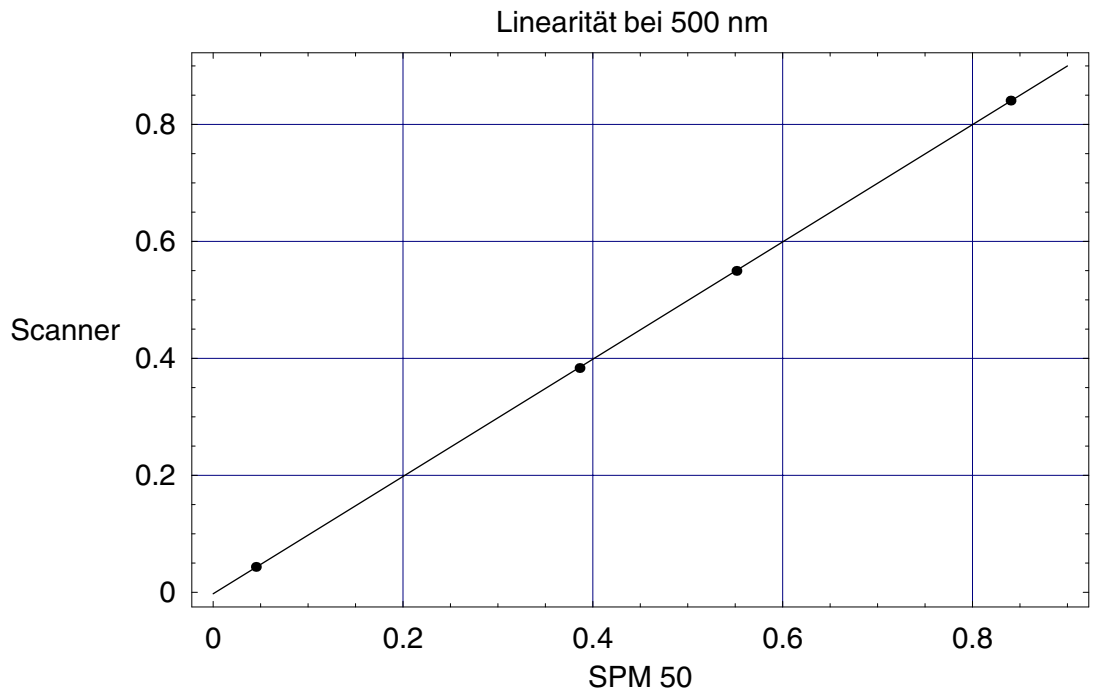


Abb. 7.3: Linearitätsüberprüfung bei 500 nm

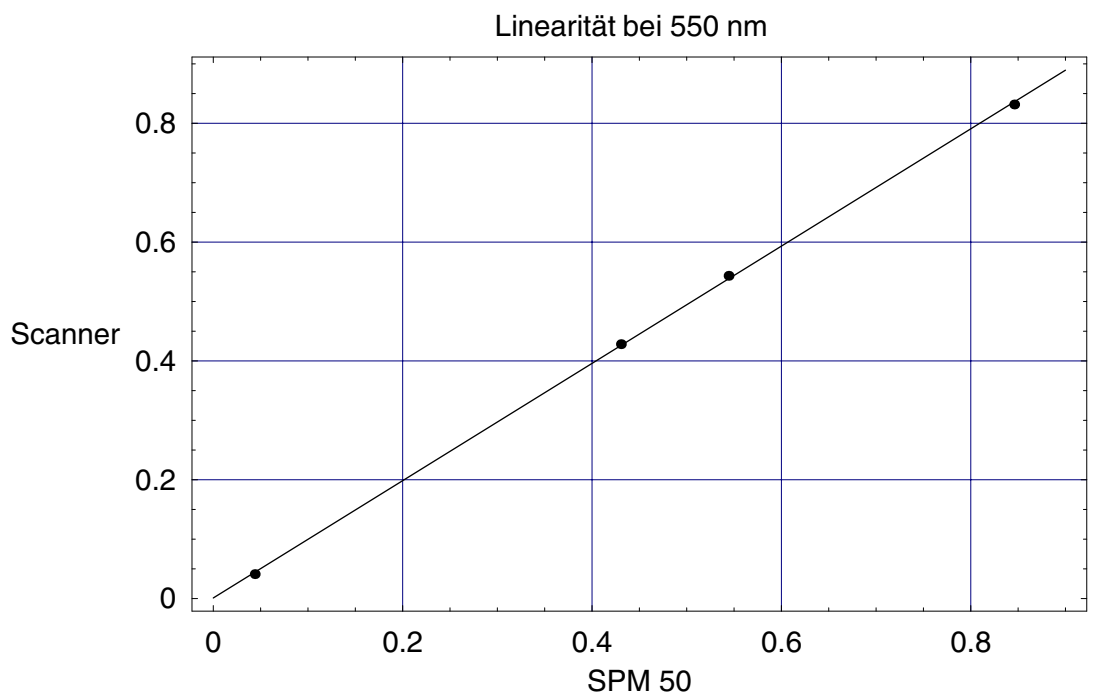


Abb. 7.4: Linearitätsüberprüfung bei 550 nm

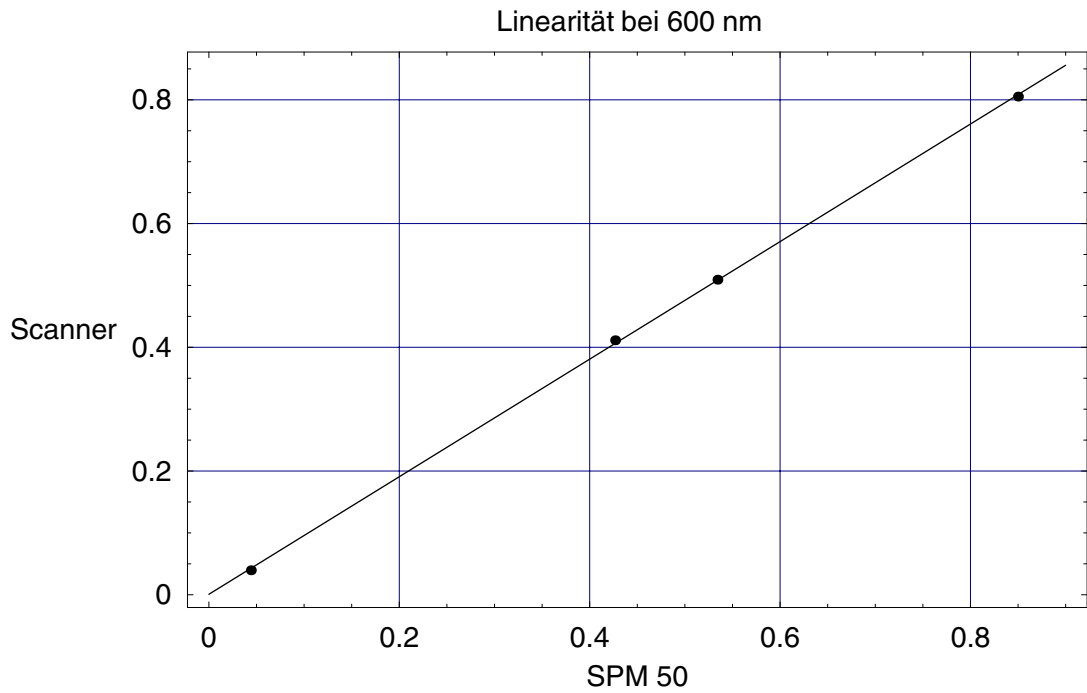


Abb. 7.5: Linearitätsüberprüfung bei 600 nm

Die Diagramme zeigen, dass bei den untersuchten Wellenlängen der CCD Sensor linear arbeitet, wenn das Streulicht in Zeilenrichtung entfällt. Das bedeutet, das Streulicht in Richtung der spektralen Aufteilung des CCD Sensors ist so niedrig, dass es die Linearität nicht stört. Die Vergleiche der Remissionsverläufe des Spektralen Scanners mit Eichmessungen in Abschnitt 7.2 bestätigen diese Feststellung.

7.2 Spektraler Remissionsverlauf des Spektralen Flachbettscanners im Vergleich zu einer Eichmessung

Die folgenden Remissionskurven zeigen eine gute Übereinstimmung der Remissionswerte, gemessen mit dem Spektralen Flachbettscanner und den Eichmessungen der GretagMacbeth mit einem Spektrolino im Wellenlängenbereich 380 bis ca. 600 nm. Verglichen wurde eine Auswahl von Farbfeldern des Eye-One Scan Targets 1.4 von GretagMacbeth (Abb. 7.6).



Abb. 7.6: Eye-One Scan Target 1.4 von GretagMacbeth

Es wurden Farbfelder ausgewählt, die eine besonders ausgeprägte Veränderung im Remissionsverlauf von 380 nm bis 600 nm aufweisen. So lässt sich überprüfen, ob die Messergebnisse des Scanners dieser Veränderung in gleicher Weise gerecht werden wie die Eichmessungen.

Die durchgezogene Linie verbindet jeweils die Messpunkte des Spektralen Flachbettscanners, der jede 5 nm einen Wert liefert. Die Punkte entsprechen den Eichmessungen im Abstand von 10 nm.

Wie bereits in Abschnitt 5 erwähnt, nimmt das Licht zur Zeilenbeleuchtung aufgrund der Dämpfung des Lichtleitermaterials ab 600 nm stark ab. Deshalb sind die Messergebnisse des Spektralen Flachbettscanners ab 600 nm undefiniert. Bei geeignetem Lichtleitermaterial sind jedoch ab 600 nm keine besonderen Schwierigkeiten zu erwarten, da die relative Systemantwort (Abb. 3.6) und somit das S/N-Verhältnis günstige Werte aufweisen.

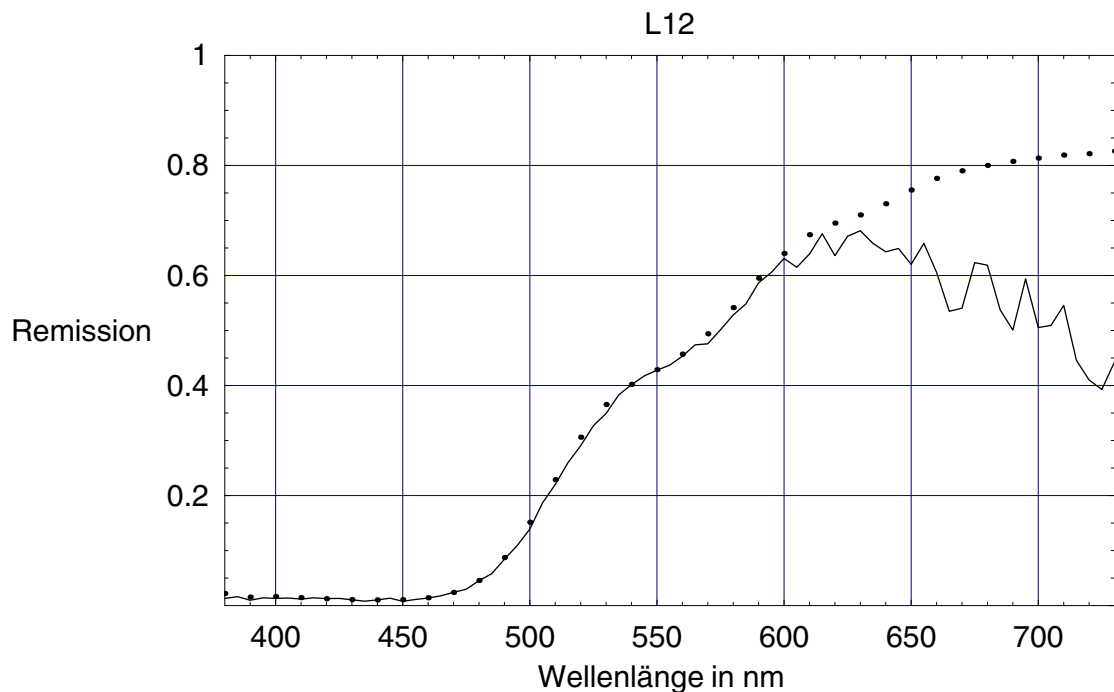


Abb. 7.7: Remissionsvergleich des Farbfeldes L12

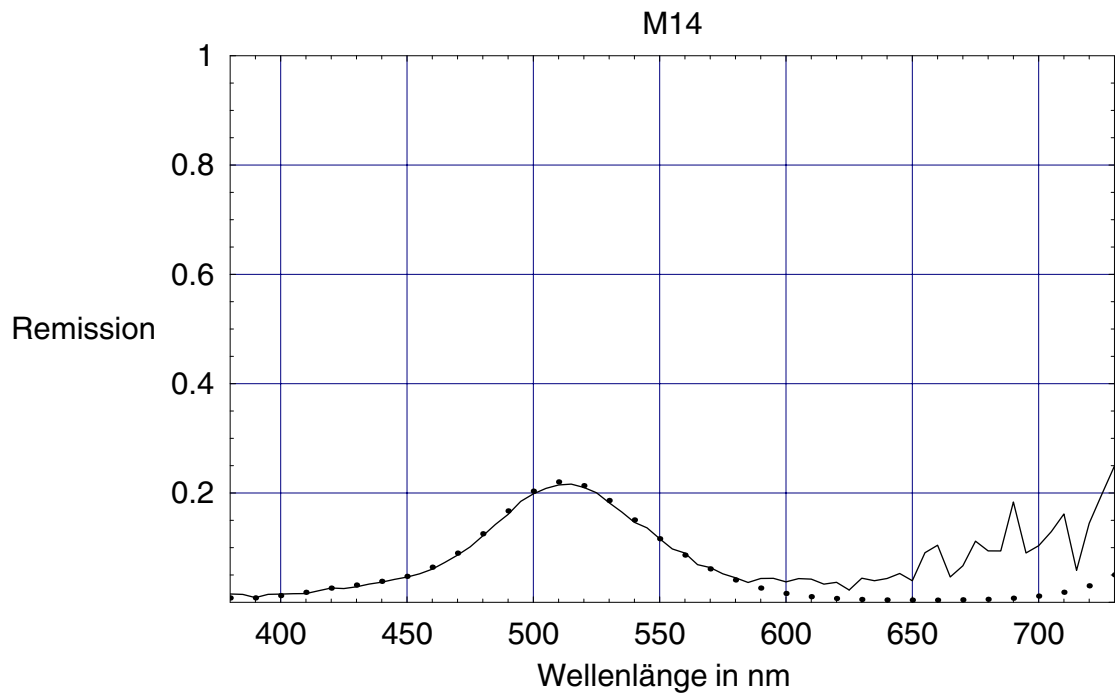


Abb. 7.8: Remissionsvergleich des Farbfeldes M14

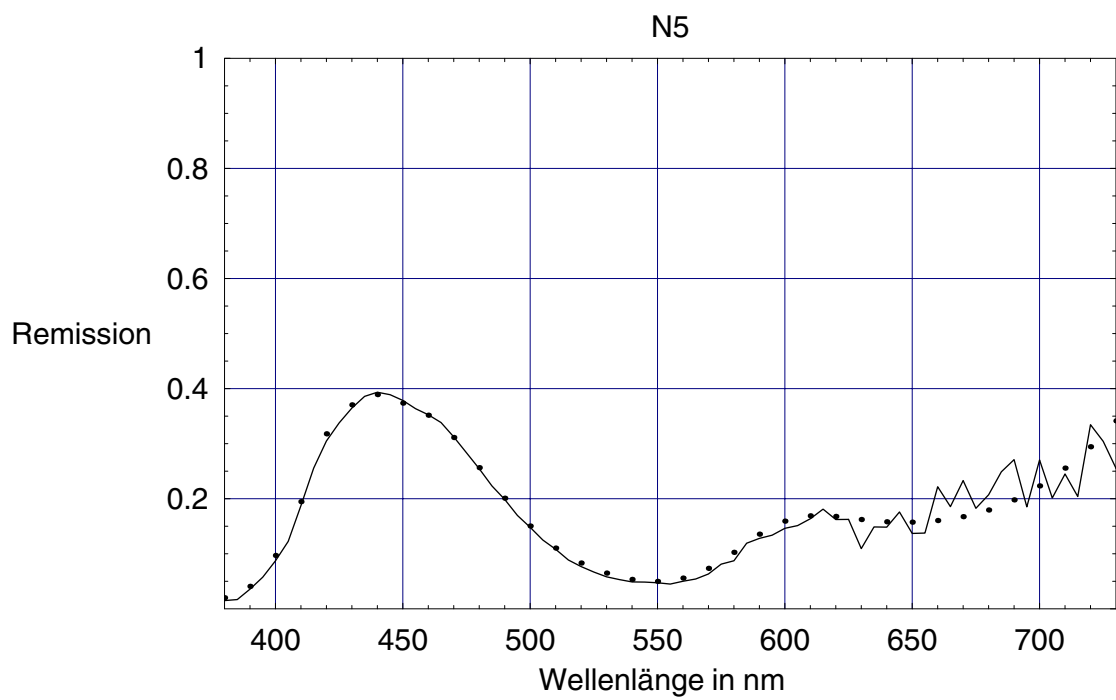


Abb. 7.9: Remissionsvergleich des Farbfeldes N5

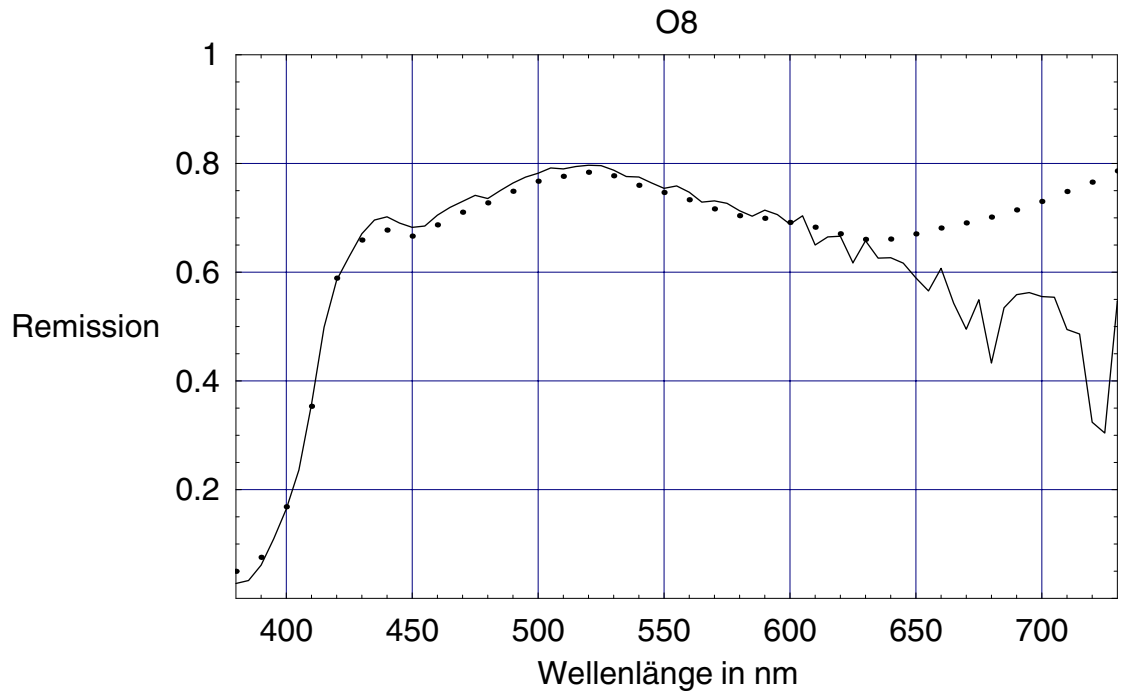


Abb. 7.10: Remissionsvergleich des Farbfeldes O8

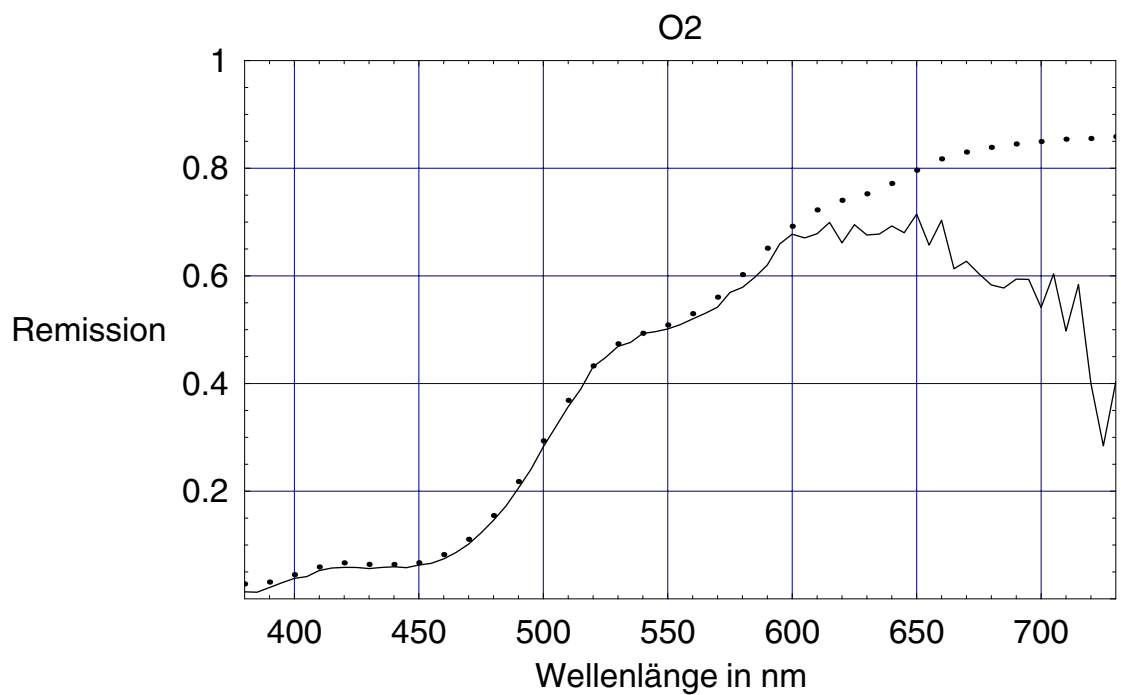


Abb. 7.11: Remissionsvergleich des Farbfeldes O2

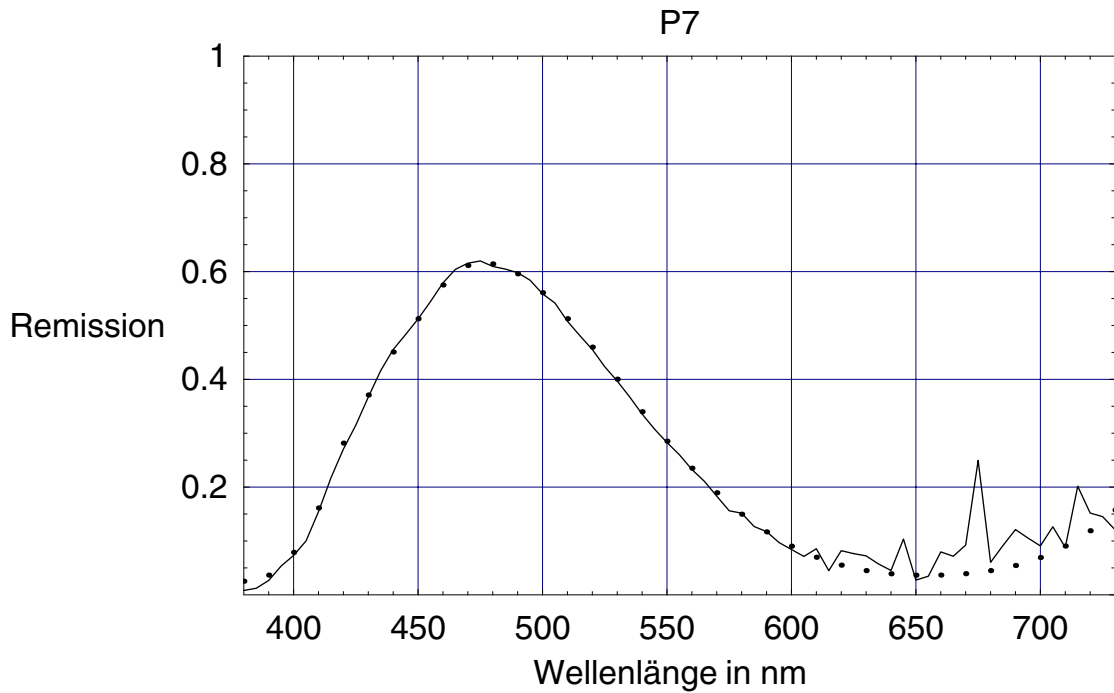


Abb. 7.12: Remissionsvergleich des Farbfeldes P7

Im Bereich von 380 nm bis ca. 600 nm, in dem die spektrale Beleuchtung hinreichend vorhanden ist, stimmen die Messwerte des Spektralen Flachbettscanners mit den Eichmessungen gut überein. Ein schneller Anstieg der Remissionskurve wie beim Farbfeld O8 in Abb. 7.10 zeigen beide Messungen. Dies zeigt, dass störendes Streulicht aus spektraler Richtung, welches die Kurve abflachen würde, ausgeschlossen werden kann.

Die relative spektrale Systemantwort des optischen Gesamtaufbaus wird durch die Dämpfung des Lichtleitermaterials (Abschnitt 5) so stark beeinflusst, dass sie ab 440 nm abnimmt. Bei 500 nm hat sie das Niveau von 400 nm wieder erreicht, um ab 600 nm undefinierte Messergebnisse zu liefern. Das gemessene Rauschen beträgt bis 450 nm bis zu ca. 2 % bei einem Remissionswert von 0,64. Danach steigt es mit der Abnahme der relativen spektralen Systemantwort. Bei einem sehr niedrigen Remissionswert von 0,035 wurde bis 450 nm das Rauschen mit bis zu ca. 8 % gemessen.

7.3 Mit dem Spektralen Flachbettscanner gescannte Farbbilder

Obwohl der Querschnittswandler zur Beleuchtung der Scanzeile drei Lagen besitzt, kommt es vor, dass einzelne Bildpunkte weniger stark ausgeleuchtet werden. Dies liegt an der niedrigen numerischen Apertur von $NA = 0,22$ der Lichtleitfasern. Verbessern ließe sich die Beleuchtung durch Lichtleitfasern, die eine höhere Germaniumdotierung aufweisen und somit eine höhere numerische Apertur besitzen.

Bildpunkte einer Zeile, die weniger beleuchtet werden, haben bei der Weißmessung einen relativ höheren Wert als bei der Farbmessung. Der Grund liegt darin, dass bei der Weißmessung mit größerer Lichtmenge das Streulicht in Zeilenrichtung entsprechend größer ist. Die schwächer beleuchteten Punkte weisen somit fälschlicherweise höhere Remissionswerte auf. Bei der Quotientenbildung Farbpunktmessung dividiert durch Weißmessung ergeben sich dann niedrigere Remissionswerte als bei den gut beleuchteten Zeilenpunkten. Auf einem gescannten Bild entstehen dadurch an den Stellen einer Zeile, wo die Beleuchtung durch den Querschnittswandler schwächer war, Streifen mit geringerer Helligkeit.

Bestätigt wird dieser Effekt durch zwei Versuche:

Bei Überbelichtung durch längere Belichtungszeiten erhöht das Streulicht auch bei der Farbzeilenmessung das Messergebnis bei den schwächer belichteten Stellen. Die dunklen Streifen gehen deutlich zurück.

Beim Scannen derselben weißen Keramikplatte, die bei der Weißkalibrierung benutzt wurde, treten keine Streifen im reproduzierten „Weißbild“ auf.

Wenn ein dunkles Farbbild gescannt werden soll, empfiehlt es sich, die Kalibrierung mit einer grauen Oberfläche vorzunehmen, um das Streulicht in Zeilenrichtung bei der Kalibrierung und beim Scannen in etwa auf einem Niveau zu halten.

Eine Verringerung des Streulichtes in Zeilenrichtung durch Verkleinerung der Blende vor der Zylinderlinse im Spektrometer des Scanners (Abb. 2.4) hätte beim derzeitigen Aufbau wesentlich höhere Belichtungszeiten zur Folge. Dieser Nachteil ließe sich allerdings wettmachen, wenn das noch vorhandene Verbesserungspotential für die Beleuchtung realisiert ist. Die Beleuchtung lässt sich durch eine aufwendigere Konstruktion der Lampe, z. B. ein Lampengehäuse mit Reflektorspiegel, und durch einen Querschnittswandler, der nur den zu scannenden Teil einer Zeile beleuchtet, signifikant verbessern.

Die folgenden Bilder zeigen gescannte Bildmotive, deren Remissionsanteil im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 600 nm besonders hoch liegt. Die Bildschirmfarben stimmen bei profilierter Monitoransteuerung mit den Originalbildfarben so gut überein, dass mit dem bloßen Auge kaum Unterschiede zu erkennen sind.



Abb. 7.13: Bildmotiv mit hohem Blau- und Grünanteil



Abb. 7.14: Bildmotiv mit hohem Blauanteil

Die nächste Abbildung zeigt wiederum ein Bildmotiv mit hohem Anteil im Remissionsbereich von 380 nm bis 600 nm. Diesmal sind die Farben des gleichen Bildes jeweils mit den Lichtarten A, B, C, D50, D65 und E berechnet worden. Bei der Lichtart A zum Beispiel ergibt sich deutlich sichtbar eine Verschiebung der Farben zum rötlichen Teil des Spektrums. Der Grund liegt darin, dass bei der Lichtart A die spektrale Strahlungsleistung im gesamten sichtbaren Bereich von den niedrigen Wellenlängen bis zu den höheren Wellenlängen kontinuierlich steigt.



Abb. 7.15: Bildmotiv mit hohem Blauanteil ausgewertet nach den Lichtarten A, B (obere Reihe), C, D50 (mittlere Reihe), D65 und E (untere Reihe) jeweils von links nach rechts

8. Entwicklungsmöglichkeiten des Spektralen Scanners

Die Auflösung des entwickelten Scanners in Scanrichtung beträgt 170 dpi bei einer Breite des Eintrittsspalt des Spektrometers von 50 μm . Es ist möglich, den Spalt auf bis zu 3 μm zu verkleinern, ohne dass störende Beugungsmaxima auf das Gitter treffen. Die Auflösung in Scanrichtung erreicht dann einen Wert von ca. 2800 dpi. Um die Scangeschwindigkeit zu halten, müsste dann gemäß Gleichung (3.3) die Strahlungsleistung der Beleuchtung um fast das 17fache verbessert werden.

In Zeilenrichtung erreicht der entwickelte Scanner eine Auflösung von ca. 200 dpi. Hierbei bestimmt der Abbildungsmaßstab, mit dem die Originalbildzeile auf den Eintrittspalt abgebildet wird und die Anzahl der Aufnahmepixel der CCD in Zeilenrichtung, die Auflösung. Bleibt der Abbildungsmaßstab und die Scangeschwindigkeit erhalten, steigt linear mit der Erhöhung der Anzahl der Aufnahmepixel der Bedarf an Strahlungsleistung der Beleuchtung.

Die gewählten optischen Komponenten zur Einkoppelung des Lichtes in den Eingang des Lichtleiterquerschnittswandlers waren die kostengünstigste Variante. Jedoch kann die spektrale Strahlungsenergie der Lichtquelle, die in den Eingang des Lichtleiterquerschnittswandlers fokussiert wird, durch ein kostenaufwendigeres Lampengehäuse mit einem Reflexionshohlspiegel und gesondert angefertigten Linsen vor dem Lichtleitereingang (Abb. 5.1 und Abb. 5.2) mindestens um das 4fache noch verbessert werden. Ferner bietet sich noch der Einsatz einer Xenonlampe als Lichtquelle an, die eine höhere Strahldichte im sichtbaren Wellenlängenbereich besitzt.

Schon beim vorliegenden Entwicklungsstand kann der Spektrale Flachbettscanner als schnelles Farbmessgerät eingesetzt werden, wenn ein Testchart mit mehreren hundert Farben gemessen werden soll. Vorausgesetzt ist der Einbau eines Lichtleiterquerschnittswandlers mit hinreichender Durchlässigkeit im gesamten sichtbaren Bereich und eine Verkleinerung der Abbildung der Originalzeile auf den Eintrittspalt auf 6 zu 1. Der Scanner braucht in diesem Falle jeweils die Zeilen mit den Farbfeldern nur einmal anzufahren, so dass ca. 30

Scanschritte für die Messung eines kompletten Testcharts reichen. Bei einer wie oben erwähnten Verbesserung der Beleuchtung liegt das Messergebnis bereits 30 Sekunden nach Beginn der Messung vor. Dies wäre ein erheblicher Zeitgewinn, da die Messung eines Testcharts mit bisherigen Methoden, z. B. mit dem Spektrolino, bis zu 40 Minuten benötigt.

Zu bemerken ist noch, dass auf dem CCD-Detektor ab der Wellenlänge von 760 nm auch das Licht der 2. Beugungsordnung ab der Wellenlänge von 380 nm auftritt. Werden die Wellenlängen oberhalb 760 nm ausgewertet, ermöglicht ein Farbfilter die 2. Beugungsordnung wegzufiltern.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit des Scanners bietet sich beim Aufspüren von Metamerie an. Abb. 7.15 zeigt ein nach sechs verschiedenen Lichtarten ausgewertetes Motiv. In Abhängigkeit von der gewählten Lichtart können Bildpunkte, die bei der Auswertung mit der neutralen Lichtart E noch für das Auge farbunterschiedlich waren, nicht mehr zu unterscheiden sein. In diesem Falle läge ein Metamerieeffekt, der aufgrund des Lichtes der Beleuchtung entsteht, vor.

Diese Art der Metamerie kann mit folgendem Algorithmus aufgespürt werden: Seien $\Delta E(E, pt_i, pt_j)$ und $\Delta E(L, pt_i, pt_j)$ die Farbabstände nach Gleichung (4.9) von 2 gleichen Punkten eines Bildes, das mit der Lichtart E und mit einer weiteren Lichtart L ausgewertet wurde, so führt das gleichzeitige Erfüllen der Bedingungen

$$\Delta E(E, pt_i, pt_j) \geq a \text{ und } \Delta E(L, pt_i, pt_j) < a$$

mit a nahe 0 zum Auffinden von Metamerie.

Die ursprünglich für das Auge farblich unterschiedlichen Punkte pt_i und pt_j können in diesem Fall durch die Beleuchtung mit der Lichtart L nicht mehr unterschieden werden.

Auf diese Weise sind $\frac{n(n-1)}{2}$ Bildpunktvergleiche durchzuführen. n ist hierbei die Anzahl der gesamten Bildpunkte eines Bildes.

9. Zusammenfassung

Es wurde zum ersten Mal ein konkaves, zylindrisches Gitter zum Einbau in ein Minispektrometer entwickelt. Die optische Konstruktion des Spektrometers ermöglicht Zeilenspektrometrie. Ein Zwischenbild am Ort des Eingangsspaltens als Einsatzbedingung des Spektrometers führt zum Einsatz in fast jedem handelsüblichen Flachbettscanner, so dass mit dem Prinzip des Flachbettscanners Farbbildspektrometrie betrieben werden kann.

Ein Abbildungsfehler in der Optik des Spektrometers lässt sich leicht mit einer linearen Beziehung beheben. Die verwinkelte Lichtführung im Spektrometer erleichtert das Eliminieren von Streulicht erheblich. Kein Streulicht aus spektraler Verteilung störte die Messergebnisse. Vergleiche der spektralen Remission von Farbfeldern mit einer Eichmessung zeigen erstaunliche Übereinstimmung im Bereich des Vorhandenseins der spektralen Beleuchtung. Der Spektrale Flachbettscanner funktioniert daher auch als schnelles Farbmessgerät für Testcharts.

Farbbilder, deren Farben im Bereich der vorhandenen Beleuchtung liegen, wurden mit dem Spektralen Flachbettscanner gescannt. Die anschließend auf dem Bildschirm reproduzierten Bilder zeigten eine originalgetreue Farbwiedergabe.

10. Literaturverzeichnis

¹ Keusen, T.

Multispektrale Farbanalyse, Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule Aachen, 1996

² König, F. und Praefcke W.

A multispectral scanner, Colour Imaging Vision and Technology, Wiley, 129-143, 1999

³ Künzli, H.

Proceedings of SPIE, Vol. 3963, 2000

⁴ Rowland, H. A.

Preliminary Notice of the Results accomplished in the Manufacture and Theory of Gratings for Optical purposes, Philosophical Magazine, 5. Series, No. 84, Suppl. Vol. 13, 469-474, 1882

⁵ Haber, H.

The Torus Grating, Journal of the Optical Society of America, Vol. 40, No. 3, 153-165, 1950

⁶ Greiner, H. und Schäffer, E.

Über den Astigmatismus des Konkavgitters mit sphärischer oder torischer Oberfläche, Optik 16, Heft 5, 288-303, 1959

⁷ Kingslake, R.

Optical Instruments Part II, Applied Optics and optical Engineering, Vol. 5, 56-72, 1969

⁸ Grange, R.

Aberration-reduced holographic spherical grating for Rowland circle spectrographs, Applied Optics, Vol. 31, No. 19, 3744-3749, 1992

⁹ Lukowski, K.-P.

Spektraler Flachbettscanner, Deutsches Patent- und Markenamt, Patentschrift
DE 198 46 363 C 1, 2000

¹⁰ Billmeyer, F. W. und Salzman, M.

Grundlagen der Farbtechnologie, Muster-Schmidt Verlag, Göttingen, Zürich,
1993

¹¹ Beutler, H. G.

The Theory of the Concave Grating, Journal of the Optical Society of America,
Vol. 35, No. 5, 311-350, 1945

¹² Namioka, T.

Theory of the Concave Grating. I, Journal of the Optical Society of America, Vol.
49, No. 5, 446-460, 1959

¹³ Bergmann, Schäfer

Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3 Optik, Walter de Gruyter, Berlin,
1993

¹⁴ Wyszecki, G. und Stiles, W. S.

Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, Wiley,
New York, 1982

¹⁵ Deutsche Normen, DIN 6174

Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der
CIELAB-Formel, Beuth Verlag, Berlin

¹⁶ Fairchild, M. D.

Color Appearance Models, Addison-Wesley,
Reading, Massachusetts 1998

¹⁷ Stokes, M. et al.

A Standard Default Color Space for the Internet – sRGB,

<http://www.color.org/sRGB.html>

Diese Arbeit wurde im Fachbereich 5 Kommunikationstechnologie Druck der Bergischen Universität - Gesamthochschule Wuppertal angefertigt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. S. Brües für die interessante Aufgabenstellung und für die Bereitstellung des Arbeitsplatzes sowie sein stetiges und förderndes Interesse.

Bei der Feinmechanikwerkstatt des Fachbereichs 8 Physik unter der Leitung von Herrn Schüngeler bedanke ich mich insbesondere bei Herrn Linck für die Hilfsbereitschaft und die sorgfältige Arbeit.

Allen Mitarbeitern des Fachbereichs 5 danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit.

Schließlich danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung dieses Forschungsvorhabens.