



Diplomarbeit

Visuelle und Material-Effizienz bei farbmeterischer
Farbdruckerausgabe

213276
Stephan Lander

April 2008

Technische Universität Berlin
Fachbereich: Lichttechnik

Die selbstständige und eigenhändige Anfertigung versichert an Eides statt

Berlin, den 14.04.2008

Stephan Lander

Aufgabenstellung

Visuelle und Material-Effizienz bei farbmeterischer Farbdruckerausgabe

Mit geeigneten digitalen Prüfdateien entsprechend Entwurf DIN 33872-1:2007 bis 33872-6:2007, die 1080 Farben enthalten, soll die Ausgabe auf Farbdruckern und im Offsetdruck zusammen mit Druckereien farbmeterisch gesteuert werden.

Hierzu wird eine Erstaussgabe von $9 \times 9 \times 9 = 729$ Standardfarben mit einem xy-Farbmessgerät im Farbsystem CIELAB für die Normlichtart D65 gemessen. Die 729 Tabellenwerte rgb-Lab* dienen zur Ausgabesteuerung. Hierbei wird nach Entwurf DIN 33872 die relative visuelle CIELAB-Gleichabständigkeit in der Farbausgabe für die 5- und 16-stufigen Farbreihen verlangt.

Die Ausgaben sollen visuell beurteilt werden um die visuelle Effizienz zu ermitteln. Für die angenäherte gleichabständige Ausgabe soll die Korrelation der visuellen Beurteilung und der farbmeterischen Beschreibung mit den Formeln CIELAB, CIEDE2000 und LABHNU für 5 Beobachter ermittelt werden.

Die Material-Effizienz kann durch geeignete Separation für den Druck um den Faktor 2 bis 3 erhöht werden. Drei Separationsmodelle zum Druck der Testvorlage mit 1080 Farben aus nur drei bunten Druckfarben, aus höchstens zwei bunten Farben und Schwarz und einer geeigneten Zwischenseparation an jeder Bildstelle soll für die Aufgabe benutzt werden.

Die Ergiebigkeit und die Farbmaterialkosten sind unter der Annahme zu berechnen, dass die unbunte Druckfarbe dreifach weniger kostet im Vergleich zu bunter Druckfarbe. Diese Daten sind zusammen mit visuellen Ergebnissen von 5 Beobachtern zu diskutieren.

Betreuende Professoren:

Prof. Dr. Klaus Richter
Technische Universität Berlin
Fakultät IV: Elektrotechnik und Informatik
Fachgebiet Lichttechnik

Prof. Dr. rer. nat. Heinrich Kaase
Technische Universität Berlin
Fakultät IV: Elektrotechnik und Informatik
Fachgebiet Lichttechnik

Abstract

In der vorliegenden Arbeit wird das Ausgabeverhalten verschiedener Geräte wie Offset-Druckmaschinen, Laserdrucker und Tintendrucker bei farbmtrischer Farbdruckerausgabe untersucht. Ziel der Untersuchung ist es, zu ermitteln, wie sich die verschiedenen Geräte steuern lassen. Dabei wird überprüft, wie sich die Ausgabe von Farbreihen hinsichtlich ihrer farbmtrischen Merkmale optimieren lassen. Ausserdem wird untersucht wie sich der Algorithmus zur Linearisierung auf die vordefinierten Farbmaßzahlen auswirkt. Dabei werden die Farbwerte im CIELAB-System, welches als visuell gleichabständig gilt, geometrisch gleichabständig angeordnet. Die Auswirkung auf die verschiedenen Ausgaben wird farbmtrisch und visuell beurteilt.

In einer weiteren Untersuchung wird die Möglichkeit überprüft, durch eine intelligente Farbseparation, Druckfarbe und damit Druckkosten einzusparen. Untersucht wird das Verhalten verschiedener Ausgabegeräte bezüglich Ihres Materialverbrauchs.

Ziel ist es, Druckfarbe einzusparen und gleichzeitig sowohl die visuelle Effizienz als auch die Materialeffizienz zu erhöhen.

Schlüsselworte: Farbseparation, Buntaufbau, Unbuntaufbau, Bunttondreieck, CIELAB, LABHNU, gleichabständig

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1. Aufbau einer Farbmeterik	3
2.1.1. Normvalenz-System	6
2.2. Weitere Farbsysteme	10
2.2.1. CIELAB-System	11
2.2.2. CIELUV-System	15
2.2.3. LABHNU-System	16
2.3. Farbabstand nach CIEDE2000	17
2.4. Farbmischung	21
2.4.1. Additive Farbmischung	21
2.4.2. Subtraktive Farbmischung	22
2.4.3. Autotypische Farbmischung	23
2.5. Farbseparation	23
2.6. Farbmessung	26
2.7. Programmierung	28
2.7.1. Postscript	28
2.7.2. TCL/TK	29
2.8. Farbmanagement nach ICC Standard	29
2.8.1. Aufbau und Funktionsweise	30
2.8.2. Farbanpassungsmethoden (Rendering Intents)	31
2.8.3. Profilklassen	32
3. Praktische Durchführung	35
3.1. Aufbau der Prüfvorlagen	35
3.2. Aufbau der Spektralmessung zur Ermittlung der Farbwerte	42
3.3. Erzeugung der Ein-/Ausgabedaten	45
3.4. Verfahren zur Ermittlung der Materialeffizienz	47
3.5. Verfahren zur Ermittlung der visuellen Effizienz	48

4. Auswertung der Messdaten	51
4.1. Stabilität des Druckprozesses	51
4.2. Visuelle Effizienz	59
4.2.1. Farbmétrische Beschreibung de Messdaten in der $a_a^*b_a^*$ -Ebene .	60
4.2.2. Farbmétrische Beschreibung de Messdaten im Bunttendreieck .	64
4.2.3. Genauere Betrachtung der Unbuntachse	69
4.2.4. Farbabstände im Soll/Ist-Vergleich	74
4.2.5. Beurteilung der farbmétrisch beschriebenen Gleichmäßigkeit g^*	76
4.2.6. Korrelation der farbmétrisch und visuell ermittelten Daten . . .	78
4.3. Material-Effizienz	83
4.3.1. Berechnung anhand der Separationsauszüge	83
4.3.2. Messung des Farbverbrauchs durch wiegen	86
4.3.3. Beurteilung mittels Lichtmikroskop	88
4.4. Zusammenfassung der visuellen Effizienz und Material-Effizienz	92
5. Zusammenfassung und Ausblick	93
Literatur	99
A. Anhang mit Diagrammen der wichtigsten Ausgabegeräten	101
B. Diagramme Ausgabegerät Nr. 1	103
C. Diagramme Ausgabegerät Nr. 2	113
D. Diagramme Ausgabegerät Nr. 4	123
E. Diagramme Ausgabegerät Nr. 5	133
F. Diagramme Ausgabegerät Nr. 6	143
G. Diagramme Ausgabegerät Nr. 7	159

Glossar

$S(\lambda)$ - Strahlungsfunktion

$\phi(\lambda)$ - Farbreiz

$\tau(\lambda)$ - Transmissionsfaktor

$\beta(\lambda)$ - Reflexionsfaktor

UCR - Under Color Removal

GCR - Gray Component Replacement

UCA - Under Color Addition

PCS - Profile Connection Space

CMM - Color Management Module

ICC - International Color Consortium

CIE - Commission internationale de l'éclairage

GDI - Graphics Device Interface

C - Cyan

M - Magenta

Y - Gelb (Yellow)

O - Orangerot

L - Laubgrün

V - Violettblau

N - Schwarz (Noir)

W - Weiß

CMY0*-Separation - Farbseparation mit nur bunter Farbe

CMYn5*-Separation - Farbseparation mit zwei bunten Farben und Schwarz

CMYn4*-Separation - CMYn5*-Separation mit reduzierter Buntheit

1. Einleitung

Die Möglichkeit, Dokumente in Farbe auszugeben, gehört heute zum Standard in der Büro- und Datentechnik. Waren vor wenigen Jahren für die Farbausgabe noch teure Druckmaschinen notwendig, kann heute mit annähernd jedem Bürosystem eine Farbausgabe produziert werden. Doch wie steht es um die Qualität dieser Ausgaben und mit welchem materiellen Aufwand ist die Farbausgabe verbunden?

Ein Problem, welches die Farbausgabe in Zukunft beschäftigen wird, ist die Veränderung der Zielfarben durch unterschiedliche, technologisch bedingte Primärfarben der Ausgabegeräte. Wird ein Farbwert digital definiert, stehen dem Informationssystem die Anteile der Primärfarben für die Ausgabe zur Verfügung. Doch was bedeutet die Definition einer roten Farbe, die digital im RGB-System mittels 1 0 0 definiert ist, für die Ausgabe? Eine vollständige Ansteuerung der Primärfarbe Rot führt bei verschiedenen Ausgabegeräten, wie beispielsweise CRT-Monitor oder TFT-Monitor, zu unterschiedlichen Farben. Es ist daher sinnvoll, sich mit Eigenschaften idealer Primärfarben für die Farbausgabe zu beschäftigen bzw. allgemeine Standards für die Beschaffenheit absoluter Farbwerte zu vereinbaren.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, inwieweit sich Farbausgaben, die auf verschiedenen Systemen, angefangen vom einfachen *consumer*-System über hochwertige Büro-Systeme bis hin zum professionellen Offset-System, gedruckt wurden, farbmetrisch auf ihre Qualität beurteilen lassen. Qualität wird hier so definiert, dass Anforderungen an die visuelle wie auch materielle Effizienz erfüllt werden müssen. Das heißt, die Farbausgabe muss visuell gleichabständig gestuft sein, so dass keine Farbnuancen in der Informationskette verloren gehen. Ein weiteres Qualitätskriterium ist der Umgang mit materiellen Ressourcen. Eine Zielfarbe kann einerseits nur durch die Mischung von drei bunten Druckfarben erzeugt werden, eine weitere Möglichkeit ergibt sich durch die Mischung von zwei bunten Druckfarben mit Schwarz. Wie sich diese zwei Separationsmechanismen auf den Farbauftrag und damit auf die Material-Effizienz auswirken, wird unter Berücksichtigung von visuellen Kriterien untersucht. Ein Ziel der Arbeit ist es, festzustellen, inwieweit sich Ausgabegeräte farbmetrisch steuern lassen. Dabei wird zwischen visueller Ausgabesteuerung und Materialeinsatz durch verschiedene Separ-

tionsmodelle unterschieden.

Die vorliegende Arbeit ist in drei Teile gegliedert. Zu Beginn werden die Grundlagen der Farbmeterik und Farbverarbeitung nach Stand der Technik eingeführt. Im nächsten Abschnitt wird die Art und Weise beschrieben, wie Messungen durchgeführt wurden und unter welchen Bedingungen die Messwerte zustande kamen. Im dritten Teil werden die Messwerte untersucht, diskutiert und daraus resultierende Ergebnisse abgeleitet.

2. Theoretische Grundlagen

In den folgenden Kapiteln werden die Grundlagen eingeführt, die für die Durchführung der Aufgabenstellung nötig sind. Es werden notwendige Begriffe zur Farbwiedergabe und Farbmeterik sowie zur Mischung und Messung von Farbe eingeführt. Die Grundbegriffe zur Farbmeterik werden nach DIN 5033[4] behandelt und stützen sich auf die Ausführungen von M. Richters *Einführung in die Farbmeterik* [2], ein Standardwerk zur Farbmeterik.

2.1. Aufbau einer Farbmeterik

In der DIN Norm 5033 Teil 1, Grundbegriffe der Farbmeterik, wird Farbe als

"...diejenige Gesichtsempfindung, durch die sich zwei aneinandergrenzende, strukturlose Teile des Gesichtsfeldes bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge allein unterscheiden können."

definiert. Diese Definition zeigt, dass es sich bei Farbe nicht um eine physikalische Eigenschaft eines Körpers handelt, wie z.B. seine Dichte oder sein spezifisches Gewicht, sondern um einen Sinneseindruck. Die ins Auge treffende Strahlung ist zwar von physikalischen Eigenschaften des Körpers abhängig, wie Reflexions- und Transmissionseigenschaften, der Farbeindruck entsteht allerdings erst im Auge des Betrachters. Für die Unterscheidung der empfindungsgemäßen Farbmerkmale werden gerne substantivierte Adjektive wie Buntheit und Helligkeit verwendet.

Im oberen Teil von Bild 2.1 ist die Entstehung der Farbempfindung grafisch dargestellt. Dabei wird ein Körper von einer Lichtquelle beleuchtet. Die Strahlungsfunktion der Lichtquelle ist wellenlängenabhängig und wird mit $S(\lambda)$ bezeichnet. Je nach Reflexionseigenschaft des Körpers wird ein Teil der Strahlung absorbiert oder reflektiert. Das Produkt aus Strahlungsfunktion $S(\lambda)$ und Reflexionsfaktor $\beta(\lambda)$ gelangt in unser Auge und wird als Farbreiz $\phi(\lambda)$ bezeichnet. Für Lichtfarben ist die Farbreizfunktion gleich der Strahlungsfunktion. Bei Körperfarben ist noch zwischen Aufsicht- und Durchsichtvorlagen zu unterscheiden. Bei Aufsichtvorlagen ist der Reflexionsfaktor $\beta(\lambda)$ und bei

2. Theoretische Grundlagen

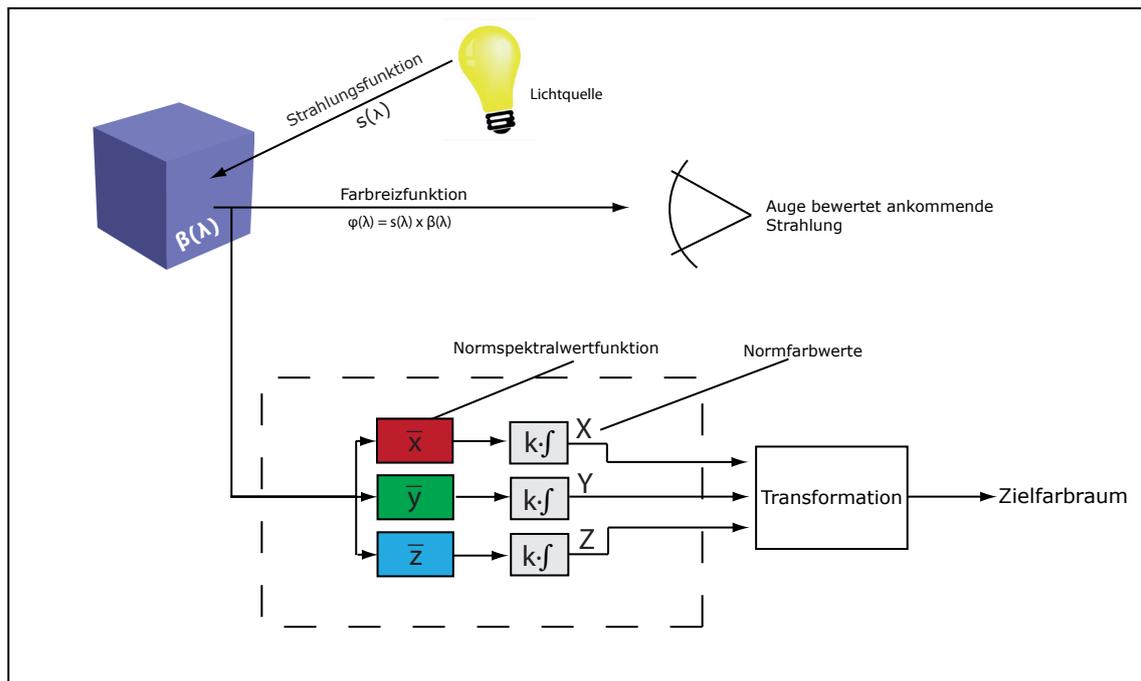


Bild 2.1: Modell der Farbempfindung und Farbmessung

Durchsichtvorlagen der Transmissionsfaktor $\tau(\lambda)$ zu berücksichtigen.

$$\phi(\lambda) = S(\lambda) \quad (2.1)$$

$$\phi(\lambda) = S(\lambda) * \tau(\lambda) \quad (2.2)$$

$$\phi(\lambda) = S(\lambda) * \beta(\lambda) \quad (2.3)$$

Trifft die ankommende Strahlung auf die Netzhaut, werden lichtempfindliche Sinneszellen durch die Strahlung stimuliert. Die Stäbchen sind bei geringen Lichtmengen aktiv und können ausschließlich hell/dunkel Kontraste wahrnehmen (skotopisches Sehen). Die Empfindlichkeit der Stäbchen ist so hoch, dass selbst zwei bis drei eintreffende Photonen detektiert werden können[2]. Für höhere Lichtintensitäten werden die Zapfen aktiv (photopisches Sehen). Die Zapfen sind mit drei unterschiedlichen Empfind-

lichkeiten ausgestattet, die je nach Wellenlänge der eintreffenden Strahlung mit einer anderen Funktion reagieren.

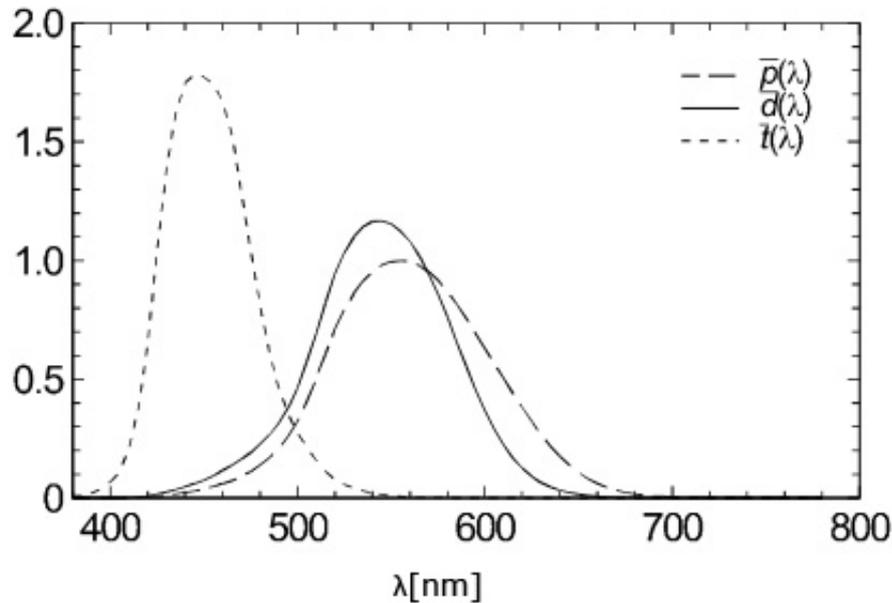


Bild 2.2: Spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfenarten im Auge

In Bild 2.2 ist die spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfenarten dargestellt. Die drei Empfindlichkeitskurven werden mit $p(\lambda)$, $d(\lambda)$ und $t(\lambda)$ bezeichnet und entsprechen der spektralen Empfindlichkeit der drei Zapfenarten S-Zapfen, M-Zapfen und L-Zapfen.

Der entstandene Farbreiz wird vom Auge nicht direkt ans Gehirn weitergeleitet. Vor der Weitergabe des Farbreizsignals an das Gehirn findet im Auge einer Art Vorverarbeitung statt[2]. Dabei wird aus den drei Farbinformationen Rot, Grün und Blau durch additive Farbmischung von Rot und Grün eine vierte Komponente Gelb hinzugefügt. Dabei entsteht ein Elementarfarben-System, ähnlich dem später beschriebenen Lab-Farbraum mit vier Farbkomponenten und einer Helligkeitsinformation.

Die Farbempfindung im Auge wird durch den physikalischen Farbreiz $\phi(\lambda)$ ausgelöst. Elektromagnetische Wellen eines bestimmten Spektrums treffen auf die Netzhaut des Auges und werden nach drei Wirkfunktionen bewertet. Diese drei Wirkfunktionen wurden durch Experimente ermittelt und stellen ein statistisches Mittel der Testpersonen dar. Aufgrund der hohen Anzahl von Testpersonen ist das Ergebnis im statistischen Mittel sehr gut, kann aber von einer Einzelperson zur nächsten durchaus auch größer variieren. Die Funktionen lassen sich nicht analytisch ermitteln oder herleiten.

In Abbildung 2.3 sind die Normspektralwertfunktionen des 2° -Beobachter und 10° -

Beobachter dargestellt. Da sich gezeigt hat, dass für unterschiedliche Größen der betrachteten Fläche sich unterschiedliche Farbempfindungen ergeben, wurde der 2°-Beobachter und 10°-Beobachter eingeführt. Für den 2°-Beobachter ergibt sich z.B. bei einem Abstand von 40cm zum Messobjekt ein Felddurchmesser von 1,4cm. Für den 10° Beobachter ergibt sich eine Feldgröße von 7cm bei gleichem Abstand.

Im Auge befinden sich also drei verschiedene Zapfenarten, die nach den Spektralwertfunktionen aus 2.3 die eintreffende Strahlung zu einem ganzheitlichen, untrennbaren Sinneseindruck, der Farbvalenz, verarbeiten. In einer höheren Verarbeitungsebene werden die drei Primärvalenzen zu einem Vierfarbenprozess verknüpft. So entsteht eine Rot-Grün und eine Gelb-Blau Komponente sowie eine Helligkeitskomponente, die aus der spektralen Hellempfindlichkeit berechnet wird.

2.1.1. Normvalenz-System

Wie lässt sich aus den oben gewonnenen Erkenntnissen nun eine brauchbare Farbmetrik aufbauen?

Der Übergang zu einem mathematischen Modell wird durch eine Transformation in einen dreidimensionalen Vektorraum geschaffen. Jeder Farbempfindung ist hierbei genau einem Punkt im Raum zugeordnet. Der Raum wird somit von drei beliebig wählbaren, aber linear unabhängigen Vektoren aufgespannt. Sie bilden die Basisvektoren des Systems. Dieser Zusammenhang ist im *ersten Graßmannschen Gesetz* zusammengefasst¹. Die Basisvektoren wollen wir im folgenden als Primärvalenzen bezeichnen.

Eine beliebige Farbvalenz F ist also durch die Anteile seiner Primärvalenzen eindeutig bestimmt.

$$\vec{F} = r \cdot \vec{R} + g \cdot \vec{G} + b \cdot \vec{B} \quad (2.4)$$

In 2.4 stellen die Farbwerte (r g b) die Intensität der jeweiligen Primärvalenz (\vec{R} \vec{G} \vec{B}) dar.

Zur Standardisierung eines so genannten *farbmetrischen 2°-Normalbeobachters* wurden von der CIE (Commission internationale de l'éclairage) im Jahre 1931 die drei Primärvalenzen \vec{R} , \vec{G} , \vec{B} als monochromatische Strahlung der Wellenlängen 700nm, 546nm und 435nm definiert. Die sich ergebenden Spektralwertkurven haben den Nachteil, auch negative Farbwertanteile aufzuweisen. Lediglich im langwelligen Spektral-

¹H. Graßmann, Mathematiker, stellte 1853 vier Gesetze zur Farbenlehre auf.

bereich sowie an Primärvalenzen gab es nur positive Werte. Da die Primärvalenzen frei wählbar sind, wurden diese außerhalb der reellen Farbwerte gelegt und mit X, Y und Z bezeichnet. Sie repräsentieren damit eine nur virtuell vorhandene Farbe. Das aus dieser Definition basierende System wird Normspektralwert-System genannt. Die Normspektralwertfunktionen sind in Abbildung 2.3 dargestellt.

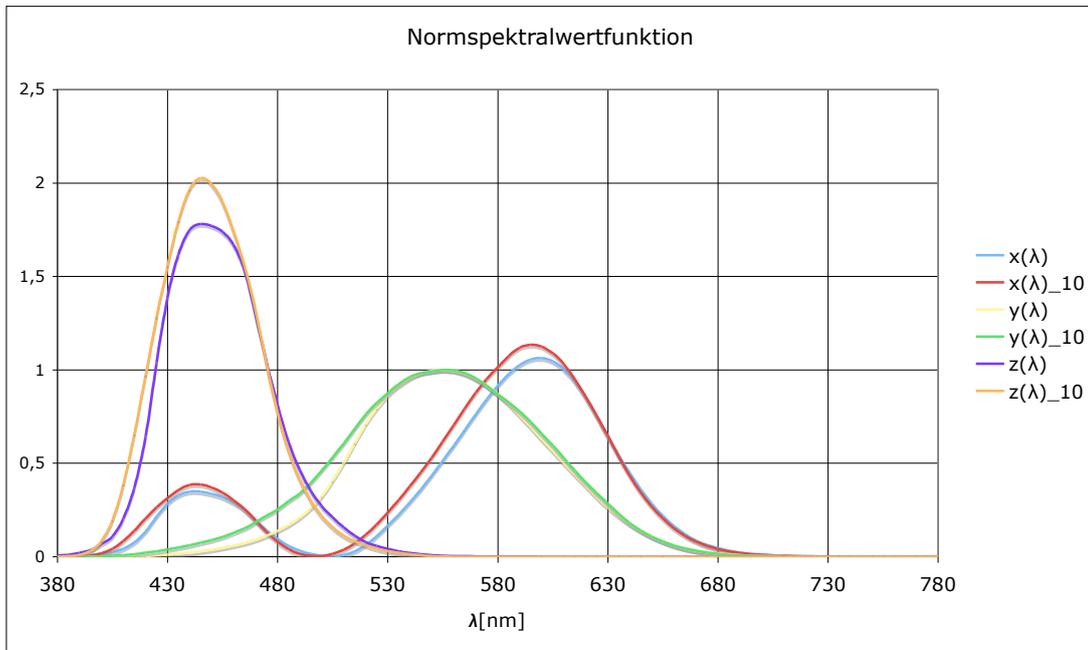


Bild 2.3: Normspektralwertfunktion für den 2° und 10° Standardbeobachter

In der praktischen Anwendung fällt das Gesichtsfeld des 2°-Beobachters (entspricht einem Farbfleck von 1,4cm Durchmesser bei einem Betrachtungsabstand von 40cm) oft etwas klein aus. Aus diesem Grund wurde von der CIE das System um einen 10°-Beobachter (7cm Durchmesser bei 40cm Betrachtungsabstand) erweitert. Die Normspektralwerte liegen in Tabellenform für den 2°-Beobachter und 10°-Beobachter in Schrittweiten von 5nm vor. Die Tabellenform ist praktisch, da eine Weiterverarbeitung meist im Rechner geschieht und daher diskrete Datensätze für die Berechnungen benötigt werden.

Die Normfarbwerte werden nach Gleichung 2.5 bis 2.7 durch eine Integration über das Produkt aus Farbreizfunktion und Normspektralwertkurve über den sichtbaren Spektralbereich ermittelt.

$$X = k \int_{380}^{780} \phi_{\lambda} \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

2. Theoretische Grundlagen

$$Y = k \int_{380}^{780} \phi_{\lambda} \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2.6)$$

$$Z = k \int_{380}^{780} \phi_{\lambda} \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (2.7)$$

Der Korrekturfaktor K erfüllt die Bedingung, dass ein vollkommen weißer Körper ($\beta(\lambda)=1$) auf $Y=100$ normiert ist. der Y -Wert ist der Hellbezugswert einer Farbe.

$$k = \frac{100}{\int S(\lambda) \cdot y(\lambda) d\lambda} \quad (2.8)$$

Eine weitere Vereinfachung des Modells wird dadurch erreicht, dass die Normfarbwerte jeweils auf ihre Summe normiert werden. Damit erhalten wir die Normfarbwertanteile (x , y , und z).

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.9)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.10)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.11)$$

$$x + y + z = 1 \quad (2.12)$$

Die Gleichung 2.11 kann normalerweise entfallen, da durch die Normierung aller Normfarbwertanteile auf eins keine zusätzliche Information in 2.11 steckt. Durch diese Normierung findet eine Reduktion des dreidimensionalen Farbraums auf die Ebene statt. Verloren geht dabei die Helligkeitsinformation, kodiert wird nur noch die Farbart einer Farbvalenz. In Abbildung 2.4 ist eine Normfarbtafel dargestellt, die nach diesem System erstellt wurde. Die Umrandung bildet der Spektralkurvenzug. Auf ihm befin-

den sich alle Farborte der am stärksten gesättigten Farben. Zu erkennen ist, dass die Abstände über dem sichtbaren Spektralbereich nicht gleichabständig sind. Dies spielt eine grosse Rolle für später eingeführte farbmétrische Systeme. Vom langwelligen zum kurzwelligen Spektralbereich wird der Körper durch die so genannte Purpurlinie geschlossen. Auf der Koordinate $(0,333 ; 0,333)$ liegt der Unbuntpunkt, der durch eine Farbsättigung von null gekennzeichnet ist.

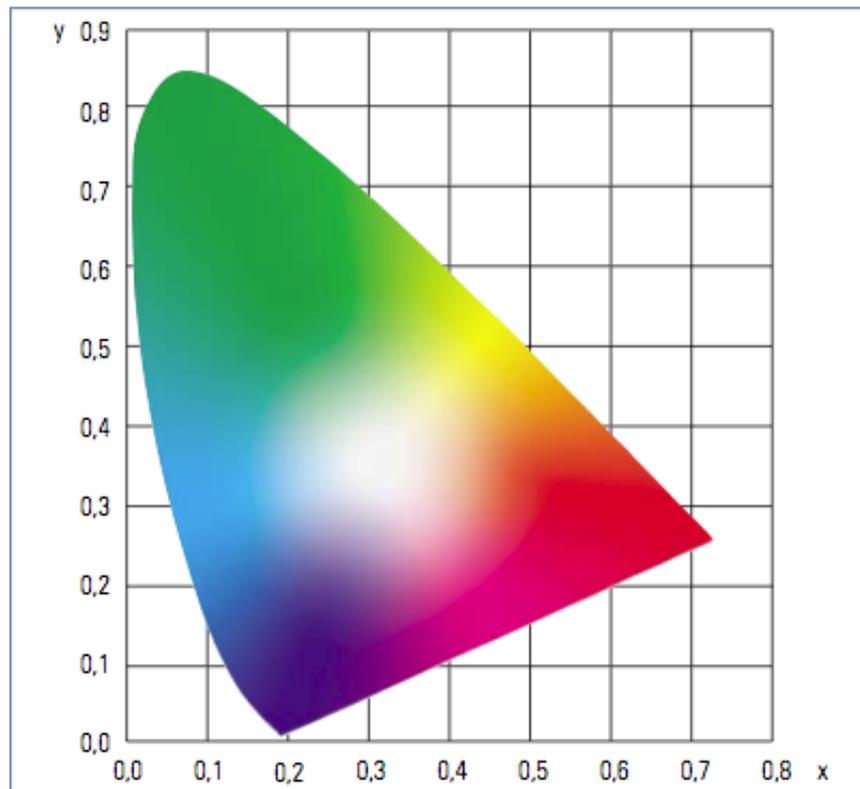


Bild 2.4: CIE Normfarbtafel [3]

Durch die Vereinbarung, dass die Summe der Normfarbanteile gleich eins ergibt, ist das System mit x und y hinreichend definiert und auf eine Ebene transformiert. Trägt man den Spektralfarbenzug, der die maximal gesättigten Farben enthält, wie in Abbildung 2.4 auf, liegen alle Farben durch x und y gekennzeichnet im Inneren des Spektralfarbenzugs. Je nach Wahl der Primärvalenzen ergibt sich ein Farbraum, der durch ein Dreieck im Inneren der Normfarbtafel begrenzt wird.

Die Umrechnung zwischen den verschiedenen Systemen erfolgt durch ein lineares Gleichungssystem. Mit der folgenden 3×3 Matrix lassen sich beispielsweise die R G B Wer-

te des sRGB-Systems auf X, Y und Z Koordinaten zurückführen.

$$\begin{pmatrix} R_s \\ G_s \\ B_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,2406 & -1,5372 & -0,4986 \\ -0,9689 & 1,8758 & 0,0415 \\ 0,0557 & -0,2040 & 1,0570 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Wollen wir die am Bildschirm verwendeten Primärvalenzen R G B in eine Normfarbtafel eintragen, gelingt das durch die folgende Matrizendarstellung.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,62 & 0,21 & 0,15 \\ 0,33 & 0,68 & 0,0415 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Die Darstellung über lineare Abbildungen ist in der Praxis sehr bequem und auch für die Weiterverarbeitung im Rechner hervorragend geeignet. Der Vollständigkeit halber sind im Folgenden die Transformationen des Normfarbdruck-Prozesses nach DIN 16539 (siehe 2.15) sowie die Transformation des Normfarbfernseh-Prozesses nach DIN 6169 (siehe 2.16) abgedruckt.

$$\begin{pmatrix} C_p \\ M_p \\ Y_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16,92 & 21,44 & 70,62 \\ 33,88 & 16,77 & 21,82 \\ 63,13 & 76,28 & 10,48 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 43,03 & 22,19 & 2,02 \\ 34,16 & 70,68 & 12,96 \\ 17,82 & 7,13 & 93,87 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

In Gleichung 2.15 wurden die Variablen mit einem Indize p versehen, um bei der Gelbkomponente (Y) eine Verwechslung mit der Y-Komponente der Normfarbwerte auszuschließen.

2.2. Weitere Farbsysteme

Wie in Kapitel 2.1 schon angedeutet hat die Normfarbtafel ein wesentliches Problem. Das System ist nicht visuell gleichabständig. Wie an 2.4 leicht zu erkennen ist, sind

Farborte im grünen Bereich sehr ausgedehnt, während der blaue und magentafarbene Bereich sehr gestaucht dargestellt wird.

Douglas MacAdams war einer der ersten, der diese Diskrepanz aufgegriffen hat und versuchte, die Normfarbtafel daraufhin zu verbessern. In einer Arbeit, die 1942 publiziert wurde, untersuchte MacAdams den Schwellwert, bei dem die Testpersonen zwei Felder als unterschiedlich klassifizieren konnten. Mit den Messwerten konnte MacAdams Bereiche in der Normfarbtafel zusammenfassen, die vom Beobachter als gleich empfunden werden. Das Resultat war eine Normfarbtafel, die verschiedenen große Ellipsen enthielt. Von 400nm ausgehend wurde die Fläche der Ellipsen zum grünen Spektrum (500nm) hin immer größer, zum roten Spektrum hin (600nm - 700nm) viel die Vergrößerung der Fläche geringer aus. Durch Umrechnung der Ellipsen in gleich große Kreise erhält man ein visuell gleichabständiges System. Da die Umrechnung nicht durch eine analytische Funktion darstellbar ist, eignen sich die MacAdam Ellipsen nicht für eine Farbmeterik mit einfachen Gleichungen. Einen besseren Ansatz liefert das im folgenden dargestellte CIELAB-System.

2.2.1. CIELAB-System

Ein hinsichtlich seiner Gleichabständigkeit verbesserter Farbraum wurde 1979 von der CIE empfohlen. Die Farbräume entstehen aus einer Transformation des Normfarbvalenzsystems und werden als Lab*-Farbenraum CIE 1976 bezeichnet.

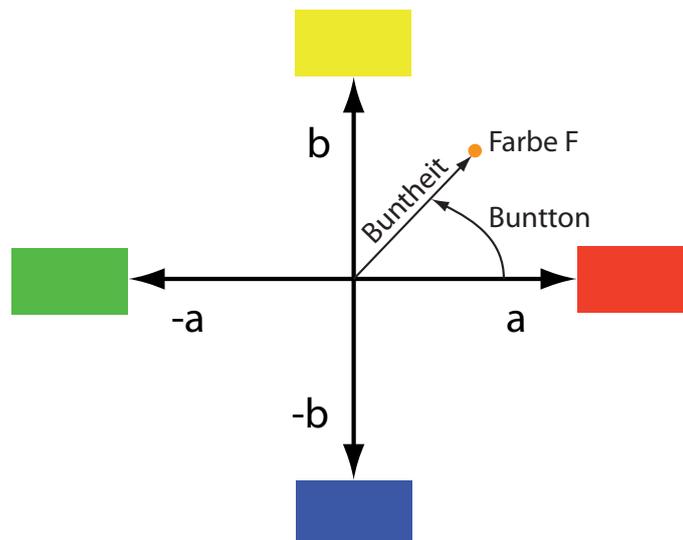


Bild 2.5: a^*b^* Ebene mit Kennzeichnung der Buntheit (C) und des Bunttons (h)

Der Lab*-Farbraum basiert auf einer nichtlinearen Transformation der X, Y und Z

2. Theoretische Grundlagen

Normfarbwerte. Wie beim Buntonkreis befinden sich gegenüberliegend die Farben Grün-Rot und Gelb-Blau. Die Lage der gesuchten Farbe in der Ebene kennzeichnet den Bunton der Farbe. Die Koordinate a^* gibt die Grün-Rot-Buntheit mit Rot in positiver Richtung an. Die Koordinate b^* die Gelb-Balu-Buntheit mit Gelb in positiver Richtung. Die Buntheit wird über die Helligkeit L^* definiert. Der Zusammenhang zwischen a^* und b^* zu deren Buntheit und Bunton in der Ebene ist in Bild 2.5 dargestellt. International wird die Buntheit einer Farbe mit Chroma (C_{ab}^*) bezeichnet. Der Bunton wird mit Hue h_{ab} bezeichnet.

Der nichtlineare Zusammenhang in der Helligkeitsempfindung des menschlichen Auges wird durch eine Transformation zwischen Normfarbwert Y und Helligkeit L^* berücksichtigt. Die Funktion kann recht gut mit einem wurzelförmigen Verlauf beschrieben werden. In Bild 2.6 ist der Zusammenhang grafisch anschaulich dargestellt.

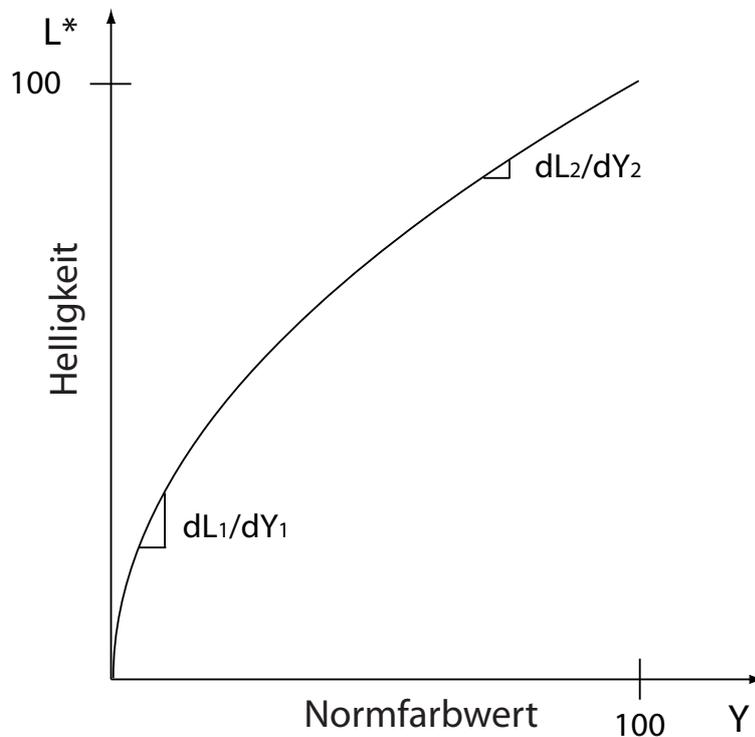


Bild 2.6: Zusammenhang zwischen Hellbezugswert Y und Helligkeit L^*

In Bild 2.6 ist zu erkennen, dass im dunkleren Bereich eine bessere Differenzierung möglich ist, während mit zunehmender Helligkeit die L -Kurve stärker komprimiert wird. Diese Gesetzmäßigkeit wurde schon Mitte des 19. Jahrhunderts als "*Weber-Fächner Gesetz*" bekannt und besagt, dass sich subjektive Stärken von Sinneseindrücken nicht linear, sondern logarithmisch zur Reizfunktion verhalten. Später wurden die Ergebnis-

se zu einer Potenzfunktion, die auch die Reaktion mit einbezieht, der Stevensschen Potenzfunktion, zusammengefasst.

Eine Transformation von den Normfarbwerten X , Y und Z zu den CIELAB-Daten kann wie folgt durchgeführt werden.

In einem ersten Schritt muss eine Lichtart ausgewählt werden, unter der die Farbe betrachtet wird. Für einen europäischen Betrachter unter Verwendung von Tageslicht ist dies meist die Normlichtart D65. Die verwendete Normlichtart wird durch Division der Normfarbwerte X , Y und Z mit entsprechend tabellierten Farbwerten X_n , Y_n und Z_n berücksichtigt und damit der Unbuntpunkt festgelegt. Tabelle 2.1 Listet die Werte für die Normlichtart D65 und Lichtart A für einen 2° -Beobachter nach DIN 5033 Teil 7 auf.

Normlichtart	X_n	Y_n	Z_n
D65	95,05	100	108,90
A	109,85	100	35,58

Tabelle 2.1: Normfarbwerte X_n Y_n Z_n für einen 2° Beobachter

Anschließend können die Koordinaten für L^* , a^* und b^* berechnet werden.

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad (2.17)$$

$$a^* = 500 \left[\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right] \quad (2.18)$$

$$b^* = 200 \left[\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right] \quad (2.19)$$

Nach DIN 6174 ist die Berechnung nur für den Fall gültig, dass der Quotient aus X/X_n und Y/Y_n sowie Z/Z_n jeweils größer als $\left(\frac{24}{116}\right)^3$ ist. Ansonsten muss mit den folgenden Quotienten gerechnet werden.

$$f(X/X_n) = \frac{841}{108} (X/X_n) + \frac{16}{116} \quad (2.20)$$

$$f(Y/Y_n) = \frac{841}{108}(Z/Z_n) + \frac{16}{116} \quad (2.21)$$

$$f(Z/Z_n) = \frac{841}{108}(Z/Z_n) + \frac{16}{116} \quad (2.22)$$

Der daraus resultierende Farbkörper ist nach DIN 5033 Teil 3 empfindungsgemäß gleichabständig. Dies hat den sehr großen Vorteil, dass Farbabstände nun durch einfache geometrische Beziehungen darstellbar sind. Durch den Farbabstand kann sehr einfach der Unterschied zweier Körper hinsichtlich Ihrer Farbe zahlenmäßig erfasst werden. Die Fa. Heidelberg hat in einer Broschüre *Fachwissen Farbe und Qualität* die wahrnehmbare Differenz von Empfindung und Farbabstand, wie in Tabelle 2.2 zu sehen ist, definiert.

ΔE	Visuelle Empfindung
0 - 1	Normalerweise nicht sichtbare Abweichung
1 - 2	Sehr kleine Abweichung, von einem geschulten Auge erkennbar
2 - 3,5	Mittlere Abweichung, auch von einem ungeschulten Auge erkennbar
3,5 - 5	Deutliche Abweichung
>5	Starke Abweichung

Tabelle 2.2: Visuelle Empfindung der Farbabstände [7]

Um den Farbabstand zu berechnen, wird für jede Komponente die Differenz ermittelt und aus der Summe die Wurzel gezogen. Wir erhalten somit auf Grundlage einer geometrischen Berechnung den folgenden Formelsatz.

$$\Delta L^* = L_{ist}^* - L_{soll}^* \quad (2.23)$$

$$\Delta a^* = a_{ist}^* - a_{soll}^* \quad (2.24)$$

$$\Delta b^* = b_{ist}^* - b_{soll}^* \quad (2.25)$$

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2.26)$$

Nach DIN 6174:2007-10 ist die Buntheit (2.27) und der Bunttonwinkel (2.28) folgendermaßen definiert.

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2.27)$$

In Gleichung 2.28 zur Berechnung des Bunttons h_{ab} ist der jeweilige Quadrant zu berücksichtigen, so dass gilt:

$$h_{ab} = \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad 1. \text{Quadrant} \quad (2.28)$$

$$h_{ab} = 180^\circ + \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad 2. \text{und} 3. \text{Quadrant} \quad (2.29)$$

$$h_{ab} = 360^\circ + \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad 4. \text{Quadrant} \quad (2.30)$$

2.2.2. CIELUV-System

Das CIELUV-System ähnelt sehr stark dem CIELAB-System. Das CIELUV-System wird gerne bei der Messung von Lichtfarben wie z.B. bei Monitorfarben benutzt. Die Helligkeitsberechnung gleicht dem CILAB-System. Die Farbmaßzahlen für u^* und v^* , welche die Farbenfläche in der Ebene aufspannen, berechnen sich aus den folgenden Beziehungen.

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (2.31)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (2.32)$$

mit

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (2.33)$$

$$u'_n = \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} = \frac{4x_n}{-2x_n + 12y_n + 3} \quad (2.34)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.35)$$

$$v'_n = \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n} = \frac{9y_n}{-2x_n + 12y_n + 3} \quad (2.36)$$

Die Normfarbwerte mit Index n legen den Unbuntpunkt fest und repräsentieren die Normfarbwerte des vollkommen mattweißen Körpers. Der Farbabstand wird wie im CIELAB-System bestimmt und ist über den euklidischen Abstand definiert.

2.2.3. LABHNU-System

Das LABHNU-System weist nur Unterschiede in der Berechnung der Farbmaßzahlen a^* und b^* auf. Der Helligkeitsbezug L^* und der Farbabstand berechnen sich wie im CIELAB-System. Die Farbmaßzahlen berechnen sich aus den Normfarbwertanteilen wie folgt:

$$a^* = 500(a' - a'_n) \sqrt[3]{Y} \quad (2.37)$$

$$b^* = 500(b' - b'_n) \sqrt[3]{Y} \quad (2.38)$$

mit

$$a' = \frac{1}{4} \sqrt[3]{\frac{x}{y} + \frac{1}{6}} \quad (2.39)$$

$$b' = -\frac{1}{12} \sqrt[3]{\frac{z}{y} + \frac{1}{6}} \quad (2.40)$$

Die Farbarten a'_n und b'_n berechnen sich aus der verwendeten Lichtart und Beobachter nach DIN 5033 Teil 7 Tabelle 3.

Normlichtart	X_n	Y_n	Z_n	X_{10n}	Y_{10n}	Z_{10n}
A	109,85	100,00	35,58	111,15	100,00	35,20
C	98,07	100,00	118,22	97,28	100,00	116,14
D65	95,05	100,00	108,90	94,81	100,00	107,34

Tabelle 2.3: Normfarbwertanteile des vollkommen mattweißen Körpers nach DIN 5033 Teil 7 Tabelle 3

2.3. Farbabstand nach CIEDE2000

Wird der Farbabstand ΔE über den euklidischen Abstand berechnet, kann es zu systembedingten Fehlern in der Berechnung kommen. Die Tatsache, dass zum Unbunten hin Farbabstände besser wahrgenommen werden als für Farben größerer Buntheit, findet in der Farbabstandsformel, wie sie für das CIELAB-System verwendet wird, keine Berücksichtigung. Um dieser Erkenntnis Rechnung zu tragen, muss auch die Buntheit C^* und der Buntton mit in die Berechnung des Farbabstandes einfließen. Eine Berechnung, die diesen Umstand berücksichtigt, ist die Farbabstandsberechnung nach CIEDE2000. Sie basiert auf einer Transformation von kartesischen Koordinaten in Zylinderkoordinaten.

In einem ersten Schritt muss die $a_{CIEDE2000}^*$ Achse gegenüber der a_{CIELAB}^* Achse angepasst werden. Der Übergang von a^* nach a' wird über eine Modifikation der Buntheit C_{ab}^* und Einführung eines Korrekturfaktors G realisiert und mit einem Strich gekenn-

2. Theoretische Grundlagen

zeichnet.

$$C_{ab}^* = \sqrt{a_{ab}^{*2} + b_{ab}^{*2}} \quad (2.41)$$

$$\bar{C}_{ab}^* = \frac{C_{orig(ab)}^* + C_{rep(ab)}^*}{2} \quad (2.42)$$

Mit 2.41 und 2.42 lässt sich der Korrekturfaktor G berechnen.

$$G_{ab} = 0,5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{(ab)}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + 25^7}} \right) \quad (2.43)$$

Für die neuen (gestrichenen) Parameter gilt:

$$a'_{ab} = (1 + G_{ab})a_{ab}^* \quad (2.44)$$

$$L'_{ab} = L_{ab}^* \quad (2.45)$$

$$C'_{ab} = \sqrt{a_{ab}^{\prime 2} + b_{ab}^{*2}} \quad (2.46)$$

$$h'_{ab} = \arctan \left(\frac{b_{ab}^*}{a'_{ab}} \right) \quad (2.47)$$

Vergleichen wir nun eine Erstaussgabe oder Original mit einer Zweitaussgabe (Reproduktion), kann die Differenz wie folgt berechnet werden:

$$\Delta L'_{ab} = L'_{orig(ab)} - L'_{rep(ab)} \quad (2.48)$$

$$\Delta C'_{ab} = C'_{orig(ab)} - C'_{rep(ab)} \quad (2.49)$$

$$\Delta h'_{ab} = h'_{orig(ab)} - h'_{rep(ab)} \quad (2.50)$$

$$\Delta H'_{ab} = 2\sqrt{C'_{orig(ab)}C'_{rep(ab)}} \sin\left(\frac{\Delta h'_{ab}}{2}\right) \quad (2.51)$$

Beim Berechnen der Bunttondifferenz ΔH müssen die Quadranten des Bunttonwinkels beachtet werden. Für eine rechnerbasierte Verarbeitung der Daten empfiehlt sich die folgende systematische Vorgehensweise:

$$\Delta h'_{ab} = \Delta h'_{ab} - 360 \quad \text{if } \Delta h'_{ab} > 180$$

$$\Delta h'_{ab} = \Delta h'_{ab} + 360 \quad \text{if } \Delta h'_{ab} < -180$$

Als nächstes kann das arithmetische Mittel berechnet werden.

$$\bar{L}'_{ab} = \frac{L'_{orig(ab)} + L'_{rep(ab)}}{2} \quad (2.52)$$

$$\bar{C}'_{ab} = \frac{C'_{orig(ab)} + C'_{rep(ab)}}{2} \quad (2.53)$$

$$\bar{h}'_{ab} = \frac{h'_{orig(ab)} + h'_{rep(ab)}}{2} \quad (2.54)$$

In Gleichung 2.54 ist wieder darauf zu achten, dass die Bunttonwinkel in den richtigen Quadranten berechnet werden. Ein sicheres Verfahren gewährt auch hier die Verwendung der oben beschriebenen Rechenroutine.

Mit den jetzt berechneten Parametern kann die Gewichtsfunktionen für Helligkeit S_L

2. Theoretische Grundlagen

und Buntheit S_C berechnet werden.

$$S_{L(ab)} = 1 + \frac{0,015(\bar{L}_{ab}^* - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}_{ab}^* - 50)^2}} \quad (2.55)$$

$$S_{C(ab)} = 1 + 0,045\bar{C}'_{ab} \quad (2.56)$$

Die Gewichtsfunktion für den Buntton S_H ist eine Funktion des Bunttonwinkels und der Buntheit. Sie lässt sich berechnen mit:

$$S_{H(ab)} = 1 + 0,015\bar{C}_{ab}[1 - 0,17 \cos(\bar{h}'_{ab} - 30) + 0,24 \cos(2\bar{h}'_{ab}) + 0,32 \cos(3\bar{h}'_{ab} + 6) - 0,2 \cos(4\bar{h}'_{ab} - 63)] \quad (2.57)$$

Da der blaue Bereich im CIELAB-System sehr nichtlinear ist, wurde eine Rotationsfunktion R_T zum Ausgleich der Nichtlinearitäten implementiert.

$$R_{C(ab)} = 2\sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + 25^7}} \quad (2.58)$$

$$\Delta\theta_{ab} = 30e^{-(\bar{h}'_{ab} - 275^\circ/25)^2} \quad (2.59)$$

$$R_{T(ab)} = -\sin(2\Delta\theta_{ab})R_{C(ab)} \quad (2.60)$$

Und schließlich die finale Berechnung des Farbabstands ΔE_{ab} :

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'_{ab}}{K_L S_{L(ab)}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{K_C S_{C(ab)}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{K_H S_{H(ab)}}\right)^2 + R_{T(ab)} \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{K_C S_{C(ab)}} \frac{\Delta H'_{ab}}{K_H S_{H(ab)}}\right)} \quad (2.61)$$

Die Gewichtsfunktionen K_L , K_C und K_H berücksichtigen experimentelle Bedingungen. In den meisten Fällen sind diese unbekannt und sollten auf den Wert eins gesetzt werden.

Mit Gleichung 2.61 ist eine Formel gegeben, die eine differenzierte Berechnung kleiner Farbabstände ermöglicht. Die Berechnung wird allerdings sehr viel komplexer und eine kurze Überschlagsrechnung in der Praxis ist nicht möglich. Für die Verarbeitung in einem rechnergestützten System ist dies ohne weiteres möglich. Für einen schnelle Überschlagsrechnung in der Praxis hat die klassische CIELAB Abstandsformel hier deutliche Vorteile und wird auch weiterhin verwendet.

2.4. Farbmischung

Jede visuell wahrgenommene Farbe entsteht durch Mischen von Optimalfarben. Eine Optimalfarbe für einen selbstleuchtenden Körper ist dann gegeben, wenn alle Strahlen einer bestimmten Wellenlänge den Körper passieren und alle weiteren gesperrt werden. Bei einem undurchsichtigen Körper werden Strahlen einer bestimmten Wellenlänge vollständig zurückgeworfen. Optimalfarben sind physikalisch dadurch gekennzeichnet, dass sie nur maximal zwei Sprungstellen der spektralen Reflexionskurve zwischen null und eins aufweisen. Optimalfarben lassen sich meist nicht mit Pigmenten oder Farbstoffen nachbilden, sie gehören zur Gesamtheit der denkbaren Farben und begrenzen den theoretischen Farbraum.

Um das Konzept der Farbmischung leichter zu verstehen, empfiehlt sich eine Aufteilung der Begrifflichkeit in Farbmischung und Farbenmischung. Bei der Farbmischung werden Farbanteile im Auge bewertet, man kann auch sagen, im Auge gemischt. Dies entspricht der Theorie der additiven Farbmischung. Beim mischen von Farbe werden allerdings Farbstoffe oder auch Pigmente auf dem Trägermaterial gemischt. Was wir dann sehen und mit unserem Auge bewerten ist die reflektierte Strahlung. Da bei dieser Art von Mischung Farbanteile des Lichtes, welches das Objekt beleuchtet, absorbiert werden, bezeichnet man diese als subtraktive Farbmischung.

2.4.1. Additive Farbmischung

Bei der additiven Farbmischung wird Helligkeit durch die am Mischprozess beteiligten Einzelfarben aufgebaut. So entsteht bei der Überlagerung der drei Farben Orangerot (O), Laubgrün (L) und Violettblau (V) Weiß. Die OLV Farben sind in der Literatur auch oft als Rot (R), Grün (G) und Blau (B) zu finden. Für diese Arbeit sind die Farbentri-

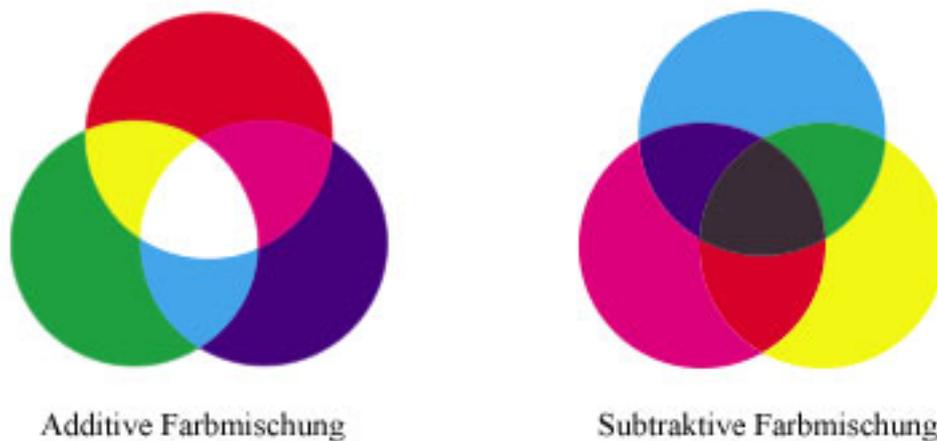


Bild 2.7: Prinzip der Farbmischung

pel RGB als geräteabhängige Grundfarben zu verstehen, mit denen z.B. ein Computermonitor seine darstellbaren Farben realisiert. Geht es um allgemeine farbmimetrische Zusammenhänge, die geräteunabhängig sind, bezeichnen wir Grün als Laubgrün, Rot als Orangerot und Blau als Violettblau. So kommt es nicht zu Verwechslungen.

Eine additive Farbmischung entsteht z.B. durch:

1. Mischen von Lichtströmen (Beamer)
2. Mischung mittels raschem periodischem Wechsel (Farbkreiseln)
3. Mischung dicht nebeneinander liegender Farbpunkte (Drucktechnik)

Die wichtigste technische Erfindung, die auf der additiven Farbmischung beruht, ist das Farbfernsehgerät bzw. der Farbmonitor am Computer. Bei diesem Gerät werden einzelne Lichtpunkte in den RGB-Farben erzeugt und in der Leuchtdichte moduliert. Im Gesichtsfeld des Betrachters entsteht durch Additive Farbmischung die Mischfarbe.

2.4.2. Subtraktive Farbmischung

Bei der subtraktiven Farbmischung handelt es sich um eine Hintereinanderschaltung von Farbfiltern. Somit wird die Mischfarbe mit jedem weiteren Filter dunkler und es entsteht Schwarz beim Mischen der Farben Cyan (C), Magenta (M), und Gelb (Y). Jede weitere Farbe verursacht einen Abbau von Helligkeit. Die klassische und reinste Anwendung der subtraktiven Farbmischung ist die Farbfotografie. Bei dieser Technik wird der Transmissionsfaktor einer Schicht durch Belichtung und spätere Entwicklung gesteuert. Für den Farbfilm liegen drei dieser Schichten in den Farben Cyan, Magen-

ta und Gelb übereinander. Durch Subtraktive Mischung entsteht der Gesamteindruck. Da eine Reproduktion von Bilddaten früher nur über den fotografischen Weg gemacht werden konnte, die digitale Druckvorstufe war noch nicht vorhanden, hat sich die Farbdarstellung mittels CMY auch in der Drucktechnik zum Standard etabliert.

2.4.3. Autotypische Farbmischung

Im Mehrfarbendruck vermischen sich durch Rasterung die Effekte der subtraktiven und additiven Farbmischung wie im Bild 2.8 zu sehen. Die Verschmelzung der grundlegenden Mischprozesse nennt sich autotypische Farbmischung. Die als Druckfarbe zur Verfügung stehenden Farben Cyan, Magenta und Gelb werden direkt auf das Papier gedruckt. Durch Überlagerung der nicht deckenden Druckfarbe entstehen die Mischfarben Laubgrün, Orangerot und Violettblau. Somit stehen 6 bunte und 2 unbunte Farben auf dem Papier zur Verfügung. Ist nun das Raster so klein, dass die Bildpunkte im Auge verschmelzen, entstehen durch additive Mischung im Auge neue Mischfarben. Der Gesamtprozess nennt sich dann autotypische Farbmischung.

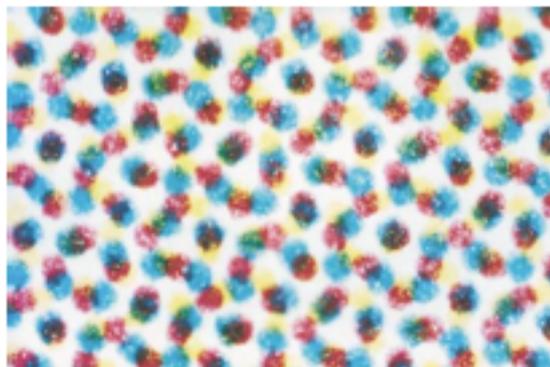


Bild 2.8: Farbrasterpunkte im Vielfarbendruck mit dem Mikroskop vergrößert dargestellt

Die dabei entstehenden Farben sind als Offset Druckfarben standardisiert. Tabelle 2.4.3 zeigt die Normfarbwerte der standardisierten Offset Farben sowie die sich unter der Beleuchtung D65 und 2°-Beobachter ergebenden Lab* Maßzahlen.

2.5. Farbseparation

Im Kapitel über das Farbenmischen wurde gezeigt, dass durch Überlagerung der drei Primärfarben des subtraktiven Farbmodells (Cyan, Magenta und Gelb) im Idealfall

2. Theoretische Grundlagen

	L*	a*	b*	X	Y	Z
Cyan	58,62	-30,63	-42,75	18,74	26,62	68,54
Magenta	48,13	75,20	-6,80	33,06	16,90	22,01
Yellow	90,37	-11,06	96,17	68,06	77,10	9,03
Orangerot	47,94	65,31	52,07	33,13	16,75	2,68
Laungrün	50,90	-62,96	36,71	8,71	19,18	6,62
Violettblau	25,72	31,35	-44,36	7,17	4,65	21,41
W1 ideales Weiß	100	-1,07	5,06	94,44	100,00	100,84
W ISO Papier	95,41	-0,98	4,76	83,69	88,60	89,47
N Schwarz gedruckt	18,01	0,50	-0,46	2,42	2,52	2,82
N0 ideales Schwarz	0,01	0,84	-1,68	0,02	0,00	0,12

Tabelle 2.4: CIELab* Farbmaßzahlen für D65 und Normfarbwerte der Offset Druckfarben nach ISO 2846-1:1997

Schwarz entsteht. Leider sind die Pigmente oder Farbstoffe, die zum Drucken verwendet werden, nicht perfekt, so dass nicht das gesamte Spektrum absorbiert wird. Dies hat wiederum zur Folge, dass kein optimales Schwarz durch die Überlagerung der Primärdruckfarben entsteht.

Dass eine farbmétrisch gleichwertige Überlagerung nach dem additiven Farbmodell keine identische Farbwerte in der Praxis erzeugt, soll durch das Beispiel in Bild 2.9 gezeigt werden. Hier wurden verschiedene additive Überlagerungen in Adobe®Photoshop simuliert. Da diese wiederum einem internen Rendering von Photoshop unterliegen, ist das Beispiel, absolut gesehen, nicht richtig. Es kann jedoch die Tendenz gezeigt werden, dass mathematisch gleichwertige Modelle in der Praxis nicht unbedingt gleichwertige Ergebnisse erzielen.

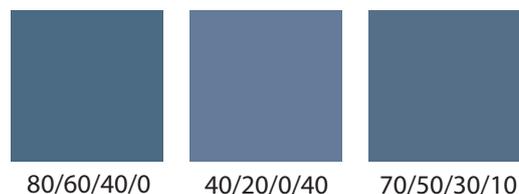


Bild 2.9: Farbmetrisch gleichwertige Farben entsprechend Farbseparation in Bild 2.10

Die Farbseparation beschäftigt sich mit der Aufgabe, wie durch das Mischen von Farbe nach dem subtraktiven Modell eine Vielfarbandarstellung erzeugt werden kann. Durch verschiedene Modelle, die im Folgenden dargestellt werden, werden die Farbanteile sowie die Zusammensetzung zwischen bunter und unbunter Druckfarbe gesteuert.

Würde die Druckfarbe alle optimalen Eigenschaften besitzen, die zur Herleitung einer Farbmatrik getroffen wurden, könnten RGB Farbwerte durch die eins-minus Beziehung zwischen dem additiven und subtraktiven Farbmodell wie folgt umgerechnet werden:

$$C = 1-R = [011]_{RGB}$$

$$M = 1-G = [101]_{RGB}$$

$$Y = 1-B = [110]_{RGB}$$

Die klassische Farbseparation ist der Buntaufbau. Bei dieser Separationstechnik wird die schwarze Druckfarbe lediglich für Text verwendet. Alle unbunten Bildbereiche oder dunkle Stellen, die so genannten Tiefen, werden durch Überlagerung von Cyan, Magenta und Gelb erzeugt. Alle Bildstellen werden also nur mit bunter Druckfarbe bedruckt, was einen maximalen Farbauftrag von 300% zur Folge hat. Ein hoher Farbauftrag bringt jedoch wieder Probleme mit sich: die Trockenzeit wird verlängert, der maximal zulässige Farbauftrag einer Papiersorte kann überschritten werden und die Materialeffizienz ist mit dieser Technik schlecht, da viel bunte Druckfarbe verbraucht wird und unbunt nicht mittels schwarzer Druckfarbe gedruckt wird.

Um vor allem den Problemen des hohen Farbauftrags entgegen zu wirken, hat sich eine Technik zur Reduzierung der Unbuntanteile, die durch Überlagerung von Cyan, Magenta und Gelb entstehen, durchgesetzt. Das Verfahren wird als Unterfarbenreduzierung (UCR) bezeichnet und ersetzt in den neutralen Dreivierteltönen bis hin zu Schwarz einen gleichen Anteil von Cyan, Magenta und Gelb durch die unbunte Druckfarbe Schwarz. Damit wird in den Tiefen der Gesamtfarbauftrag gesenkt.

Geht man vom farbmtrischen Modell aus, muss es auch möglich sein, über alle Tonwerte einen Gleichanteil von Cyan, Magenta und Gelb durch die Druckfarbe Schwarz zu ersetzen. Diese Idee wird beim so genannten Graukomponentenreduzierung (GCR) verwendet. Soll, wie im Beispiel gezeigt, ein GCR(25%) gedruckt werden, wird die Farbe mit dem niedrigsten Anteil um 25% erniedrigt. Dieser Wert wird bei den zwei weiteren bunten Druckfarben auch abgezogen und mit Schwarz aufgefüllt.

Wird das Verfahren maximal angewendet, wird die bunte Druckfarbe mit dem niedrigsten Anteil nicht gedruckt und alle weiteren Werte um den Anteil der nicht gedruckten Farbe erhöht. In diesem Fall spricht man auch vom Unbuntaufbau. Es können nur zwei bunte Druckfarben plus Schwarz vorkommen. Bild 2.10 verdeutlicht das Vorgehen grafisch für GCR(100%) und GCR(25%).

Die Separationstechnik nach GCR, die sich steigender Beliebtheit erfreut, hat in den Tiefen des Bildes noch mit einem weiteren Problem zu kämpfen. Die schwarze Druckfarbe ergibt in sehr dunklen Bildstellen oft keine ausreichende Tiefenwirkung. In diesen

2. Theoretische Grundlagen

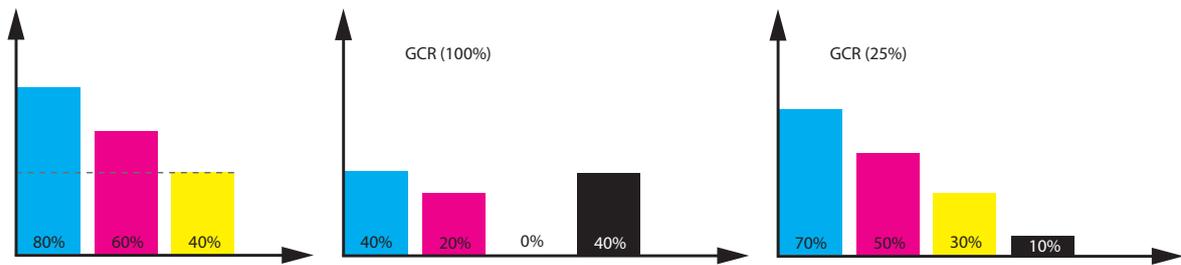


Bild 2.10: Substitution einer Druckfarbe durch Schwarz in der Farbseparation.
Original (links) - GCR(100%) (Mitte) - GCR(25%) (rechts)

Druckstellen wird wieder durch auffüllen mit Buntonfarben nachgeholfen. Es wird also an diesen Stellen mit gleichanteiligem Cyan, Magenta und Gelb zusätzlich gedruckt. Wegen des zusätzlichen Auffüllens wird die Technik als Buntfarbenaddition (UCA) bezeichnet. Sie ist im technischen Sinne keine Separationstechnik, sondern ein unterstützendes Verfahren für die GCR Technik.

Zur besseren Übersicht sind hier noch einmal die Techniken und Begrifflichkeiten zusammengefasst.

1. *Buntaufbau*

Alle Farbtöne werden durch Überlagerung der bunten Primärfarben Cyan, Magenta und Gelb gedruckt.

2. *Unterfarbenreduzierung (UCR)*

In dunklen Bildbereichen wird der Farbanteil von Cyan, Magenta und Gelb reduziert, der Anteil schwarzer Druckfarbe wird dafür angehoben.

3. *Graukomponentenreduzierung (GCR)*

In allen Bereichen wird Cyan, Magenta und Gelb gleichanteilig durch Schwarz ersetzt. Bei 100% GCR liegt ein Unbuntaufbau vor.

4. *Buntfarbenaddition (UCA)*

Wird unterstützend im GCR-Prozess eingesetzt. Da schwarze Druckfarbe teilweise keine ausreichende Tiefenwirkung gewährleistet, werden diese Stellen auch mit allen drei Primärfarben bedruckt.

2.6. Farbmessung

Die DIN 5033 unterscheidet zwischen drei Verfahren zur Farbmessung.

1. Spektralverfahren DIN 5033-4

2. Gleichheitsverfahren DIN 5033-5
3. Dreibereichsverfahren DIN 5033-6

Gleichheitsverfahren

Bei dem Gleichheitsverfahren handelt es sich um ein rein visuelles Verfahren. Mit standardisierten Farbmusterbögen wird die zu bestimmende Farbe direkt verglichen. Da das Auge ungefähr 10^6 Farbnuancen unterscheiden kann [2], ist dieses Verfahren von der Genauigkeit besser als man vermuten würde. In industrieller Messung ist das Verfahren allerdings nicht sehr verbreitet, da heute elektronische Messgeräte in ausreichender Qualität zu einem guten Preis angeboten werden. Für wissenschaftliche Aufgaben oder im Handwerk wird das Gleichheitsverfahren durchaus noch verwendet.

Dreibereichsverfahren

Bei der Farbmessung nach dem Dreibereichsverfahren werden die spektralen Empfindlichkeiten der Empfänger durch das Vorschalten geeigneter Empfänger angepasst. Meist werden die Empfänger an die Normspektralwert-Funktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ angepasst. Es können aber auch auf andere Primärvalenzen bezogene Anpassungen gemacht werden.

Das Dreibereichsverfahren ist ein sehr einfaches und schnelles Messverfahren. Nachteilig ist, dass das Verfahren bedingt eingeschränkt in der Flexibilität ist. Die Geräte sind jeweils auf die Parameter des verwendeten Beobachters (2° oder 10°) beschränkt.

Spektralverfahren

Ähnlich der Beurteilung im Auge wird beim Spektralverfahren die zu messende Farbvalenz als Summe spektraler Farbvalenzen bewertet. In einem ersten Schritt wird durch eine spektrale Messung des Reflexionsfaktors $\beta(\lambda)$ bestimmt. In einem zweiten Schritt werden die Messwerte unter Berücksichtigung der gewünschten Lichtart und des Beobachters ausgewertet. Dieser Schritt wird als valenzmetrische Auswertung bezeichnet. Die Normfarbwerte ergeben sich aus der Integration wie in Gleichung 2.5 bis 2.7 dargestellt.

Bei der Bestimmung der Farbreizfunktion $\phi(\lambda)$ ist darauf zu achten, dass die spektrale Bandbreite bei der Messung und valenzmetrischen Auswertung übereinstimmt.

Da die Strahlungsfunktionen für verschiedene Beobachter und Lichtarten gut tabelliert vorliegen, ist die valenzmetrische Auswertung sehr gut mit einem Rechner durchführbar. Das Verfahren ist demzufolge sehr flexibel und für heutigen Rechnern auch schnell. Es wird als das genaueste Verfahren zur Farbmessung angesehen. Der untere Teil von 2.3 eignet sich somit zur Verdeutlichung des Ablaufs einer valenzmetrischen Auswertung.

2.7. Programmierung

Das programmiertechnische Konzept der vorliegenden Arbeit ist in zwei Teile gegliedert. Für die Definition digitaler Prüfvorlagen wird die Programmiersprache Postscript benutzt. Postscript wurde im Jahre 1984 von Adobe vorgestellt und eignet sich besonders für die grafische Programmierung, da Farbräume explizit definiert werden können.

Für Berechnungen und Formatwandlungen der Ausgabedaten, die z.B. bei der Spektralmessung anfallen, kommt die Programmiersprache Tcl (Tool command language) zum Einsatz. Diese ist syntaxisch einfach aufgebaut und besitzt ein unkompliziertes Ein-/Ausgabe-Modul.

Durch die Kombination von Postscript und TCL/TK, die jedem UNIX Betriebssystem beiliegt, basiert die Programmierarbeit vollständig auf frei verfügbarer Software und kann von jedermann nachvollzogen werden.

2.7.1. Postscript

Postscript ist eine Programmiersprache, die sich sehr gut dazu eignet, Texte, vektorbasierte Grafikelemente und Farbelemente auszugeben. In der Druckindustrie gehört Postscript zum Standard. Postscript ist eine Interpreter Sprache, der Quelltext wird nicht kompiliert, sondern direkt vom Endgerät wie z.B. Drucker interpretiert. Die Syntax ist so aufgebaut, dass *on the fly* interpretiert werden kann. Es werden also keine Programmelemente benötigt, die erst später im Quelltext erscheinen. Dies hat bei Druckern den großen Vorteil, dass der Interpreter im Drucker sofort arbeiten kann, ohne dass die ganze Seite geladen ist.

Die Programmiersprache ist von der Struktur her *stack orientiert*, das heißt, dass alle Befehle so wie sie gelesen werden auf dem Stack abgelegt und direkt ausgeführt werden. Das Programmierkonzept beinhaltet alle wesentlichen Eigenschaften einer Pro-

grammiersprache wie Variablendefinition, Schleifen, bedingte Sprünge sowie Subroutinen. Im Vergleich zu anderen Programmiersprachen ist es in Postscript möglich, Farbbräume zu definieren. Dies geschieht z.B. mit den Operatoren *setcolorspace*, *setrgbcolor* und *setcmykcolor*. Graustufen können über *setgray* definiert werden.

Auch vektorielle Elemente lassen sich mit Postscript leicht erstellen. Mit dem Befehl *moveto* wird eine Linie von Punkt a nach b gezeichnet. Komplizierte Gebilde lassen sich über Bezierkurven mit dem Befehl *curveto* zeichnen.

Ein Postscript Programm kann in jedem beliebigen Texteditor, der reinen ASCII-Text generiert, geschrieben werden. Die Datei wird für die Ausgabe entweder direkt vom Ausgabegerät interpretiert, wenn dieses Postscriptfähig ist, oder muss über den Acrobat Distiller in ein PDF-Dokument umgewandelt werden. Als open source Variante steht hier Ghostview zur Verfügung.

2.7.2. TCL/TK

Die Wahl, Datensatzmanipulationen und Umrechnungen mit Hilfe von TCL zu programmieren, wurde vor allem dadurch begünstigt, dass die Programmiersprache zum einen jedem UNIX Betriebssystem kostenlos beiliegt und zum anderen eine einfache Ein-/Ausgabe von Daten ermöglicht. Da die Geschwindigkeit bei heutiger Rechenleistung nicht ausschlaggebend war, hat die einfache Ein-/Ausgabe im Vergleich zur Programmierung in C durchaus überzeugt. Die geschriebenen Programme sind alle Terminalbasiert, müssen also in einer Shell ausgeführt werden. Durch die TK (Tool Kit) Umgebung lassen sich die Programme bei Bedarf auch schnell mit einer GUI (Graphical User Interface) versehen.

2.8. Farbmanagement nach ICC Standard

Mit dem Wunsch, über verschiedene Schnittstellen und Geräte hinweg eine konsistente Farbwiedergabe zu erzielen, wurde 1993 von einem Zusammenschluss mehrerer Firmen das *International Color Consortium* gegründet. Durch neue Computertechnologien ist das Erzeugen druckbarer Ausgabedaten fast jedem Designer möglich. Dadurch steigt die Anzahl der Schnittstellen bis zur Ausgabe jedoch stark an. Die Geräte arbeiten wiederum alle mit unterschiedlichen Primärfarben und haben auch einen abweichenden Farbraum. In geschlossenen Systemen, wie sie früher in der Druckindustrie verwendet wurden, spielte das keine Rolle. Alle Geräte waren aufeinander abgestimmt und konnten die Farbbräume der nachfolgenden Stufe; eine konsistente Kalibrierung war kein

großes Problem.

Mit neuen Standards wurde nun versucht, dieses Problem zu lösen, in dem das Farbverhalten der Geräte in Profilen beschrieben und gespeichert wird.

Die Spezifikation nach ICC behandelt:

- Transformation zwischen Farbräumen
- Farbumfangsanpassung
- Profilbeschreibung
- Software Architektur

2.8.1. Aufbau und Funktionsweise

Der Kern des Farbmanagements nach ICC Vorgaben ist das Color Management Modul (CMM). In diesem Modul finden alle mathematischen Operationen statt, um Farbwerte in verschiedene Farbräume umzurechnen. Wird beispielsweise ein Dokument von einer Kamera aufgerufen, hat dieses normalerweise das Farbprofil der Kamera eingebettet. Das CMM rechnet nun die RGB Werte des Bildes in geräteunabhängige Lab-Werte um. Soll das Bild nach der Bearbeitung auf einem Fotobelichter ausgegeben werden, findet eine neue Profilierung mittels Ausgabeprofil des Fotobelichters statt. Das CMM versucht nun alle Lab-Werte auf die Äquivalenten RGB-Werte des Belichters zu setzen. Dieser Prozess wird als Gamut-Mapping bezeichnet, da die Farben auf den Gerätefarbraum (Gamut) abgebildet werden. Wie das System reagiert, wenn beispielsweise der Ausgabefarbraum kleiner ist, also nicht alle Farben wiedergegeben werden können, wird im Abschnitt Farbanpassungsmethoden gezeigt.

Die Umrechnung erfolgt mathematisch mittels folgender Konzepte:

1. Matrix zur Umrechnung
2. Kurven zur Umrechnung
3. Look Up Table

Bei der Verwendung eines Look Up Tables sind die Farbwerte über Tabellen verknüpft. Daher ist die Rechenzeit, wenn man überhaupt von rechnen sprechen kann, des CMM bei dieser Methode am kürzesten. Aber auch die ersten zwei Berechnungen werden *on the fly*, also ohne merkliche Verzögerungszeit für den Anwender, berechnet.

Eine sofort sichtbare Schwäche des Farbmanagements nach ICC Vorgaben ist die große Einschränkung des Gerätefarbraums. Durch den Versuch, sich auf den kleinsten gemeinsamen Nenner zu einigen, werden sämtliche Farbräume auf ihre gemeinsame Schnitt-

menge beschnitten.

2.8.2. Farbanpassungsmethoden (Rendering Intents)

Wird ein Dokument von einem Gerät zum nächsten transportiert, wird meist auch der Farbraum gewechselt, da dieser ja geräteabhängig ist. Der Benutzer hat nun die Möglichkeit, eine Farbanpassungsmethode zu wählen. Hierbei stehen vier Methoden zur Auswahl.

1. Perceptual (wahrnehmungsorientiert)
2. Absolut farbmetrisch
3. Relativ farbmetrisch
4. Sättigung

Die wahrnehmungsorientierte Farbanpassung verfolgt das Ziel, die Farbabstände relativ zueinander konstant zu halten. Auch der Weißpunkt wird an den Zielfarbraum angepasst.

Diese Farbanpassung entspricht am ehesten der menschlichen Wahrnehmung, die Farbabstände besser erfasst als absolute Farbwerte. Um dies zu erreichen, muss der Farbraum so weit komprimiert werden, bis alle Farben innerhalb des neuen Farbraums liegen. Durch die Komprimierung bleiben alle Abstände zwischen den Farben relativ zueinander erhalten. Ist jedoch z.B. nur eine Farbe weit außerhalb des darstellbaren Zielfarbraums, führt die Berechnung zu einer enormen Verkleinerung des Farbraums, so dass nur ein kleiner Bereich des möglichen Gerätefarbraums genutzt wird. Dies ist natürlich vom Benutzer nicht gewollt und auch eine enorme Verschwendung der Fähigkeiten eines Gerätes.

Durch Auswahl der Option "*relativ farbmetrisch*" wird der Weißpunkt des Quellfarbraums mit dem Weißpunkt des Zielfarbraums gleichgesetzt. Alle Farbwerte die nicht ausserhalb des Farbraums liegen, bleiben erhalten. Liegt der Farbwert außerhalb des darstellbaren Farbraums, wird der Wert auf den Rand abgebildet. Dadurch kommt es zu einer Farbkommprimierung in bestimmten Bereichen. Ist der Zielfarbraum allerdings größer als der Quellfarbraum, liefert das Verfahren gute Ergebnisse. Soll z.B. ein Firmenlogo genau den richtigen Farbton treffen, liefert diese Farbanpassungsmethode die sichersten Ergebnisse.

Die absolut farbmetrische Umrechnung funktioniert wie die relativ farbmetrische Umrechnung, nur dass der Weißpunkt dabei nicht verschoben wird.

Eine sättigungserhaltende Farbanpassung wird nur selten verwendet. Bei dieser Methode spielt der Farbwert an sich überhaupt keine Rolle. Es wird mit dem Ziel transformiert, dass die Ausgaben jeweils eine maximale Farbsättigung aufweisen. Heute mag es verwundern, weshalb diese Farbanpassungsmethode überhaupt Einzug in das ICC-Colormangement fand. Aber Bürodrucker mit Farboptionen waren anfänglich so schlecht, dass kein Anwender auf die Idee gekommen wäre Bilder damit zu drucken, sondern lediglich Geschäftsgrafiken und Diagramme farbig dargestellt wurden. Diese Grafiken sollten mit maximaler Farbsättigung aus dem Drucker kommen, der Farbton an sich war zweitrangig.

In der ICC Spezifikation gibt es keine Vorschrift, wie die Berechnung durchzuführen ist. Somit erhält man bei jedem Hersteller eines CMM unterschiedliche Ausgaben, trotz Verwendung der selben Methode. Daher sollte auf einem farbkonsistentem System nur ein CMM von einem Hersteller zum Einsatz kommen.

2.8.3. Profilklassen

Nach [8] sind ICC-Profile definiert als *standardisierte Dateien zur Beschreibung der farblichen Eigenschaften von Geräten, Bildern und Grafiken unter Verwendung von farbmtrischen Standards.*

Die vier wichtigsten Klassen sind:

- Eingabeprofile (Input Device Profile)
- Monitorprofile (Display Device Profile)
- Ausgabeprofile (Output Device Profile)
- Device link Profile

Eingabeprofile beschreiben Geräte wie Scanner oder Kameras mittels einer Transformation des Gerätefarbraums in den geräteunabhängigen Farbraum (PCS, Profile Connection Space).

Monitorprofile beschreiben selbstleuchtende Ausgabegeräte wie Monitore oder Projektoren durch eine Transformation vom PCS in den Gerätefarbraum des Ausgabegeräts.

Ausgabeprofile beschreiben Ausgabegeräte wie Tintendrucker oder Offsetdruckmaschinen durch eine Transformation vom PCS in den Gerätefarbraum des Ausgabegeräts.

Bei den Device Link Profilen findet eine Transformation vom ersten geräteabhängigen Farbraum direkt in einen zweiten geräteabhängigen Farbraum statt. Die Farbinformationen werden nicht über den PCS verknüpft. Damit unterscheiden sie sich grundlegend von allen anderen Profilklassen. Der Grund weshalb die Farbdaten nicht über den drei-

dimensionalen PCS gerechnet werden, liegt darin, dass unter Umständen Farbdaten wie z.B. der Farbaufbau, besonders die Verwendung von Schwarz, verloren gehen, wenn von einem CMYK-Profil der ersten Druckmaschine in ein anderes CMYK-Profil der zweiten Druckmaschine umgerechnet wird[8]. Device Link Profile sind daher nicht universell einsetzbar, sondern verknüpfen direkt zwei ganz bestimmte Geräte miteinander. Die Profile werden aus den Charakterisierungsdaten der zwei Prozesse berechnet.

Eingesetzt werden die Device Link Profile zur Prozesskonvertierung, Prozessanpassung und Farbeinsparung. Es ist auch möglich, Device Link Profile zur Begrenzung der Flächendeckung einzusetzen.

Für die vorliegende Arbeit ist die Möglichkeit von Interesse, Device Link Profile zur Farbeinsparung zu generieren. Die Transformation findet zwischen zwei gleichen Prozessen statt. Im Profil ist eine Rechenvorschrift für den Farbaufbau hinterlegt, so dass ein gewisser Anteil von Cyan, Magenta und Gelb durch schwarze Druckfarbe ersetzt wird.

3. Praktische Durchführung

Im folgenden Kapitel sind die einzelnen Werkzeuge, Materialien, Geräte und Programme beschrieben, die zur Durchführung der Arbeit verwendet oder erstellt wurden.

3.1. Aufbau der Prüfvorlagen

Die Durchführung basiert auf Prüfvorlagen, wie sie auch zur Linearisierung der Testvorlagen in DIN 33872 verwendet werden. Die Prüfvorlagen bestehen aus Postscript Dateien und sind kostenlos unter <http://www.ps.bam.de> zu beziehen. Bild 3.3 bis 3.7 zeigt die Vorlagen für die Erstausgabe. Die Erstausgabe ist so angelegt, dass möglichst viele Messdaten aufgenommen werden. Bei Ausgaben auf den Office-Druckern spielte dieser Aspekt keine große Rolle, da viele verschiedene Prüfvorlagen gedruckt werden können. Bei der Ausgabe auf den Offset-Maschinen konnten allerdings nur zwei Ausdrücke gemacht werden, da für jeden Ausdruck vier Platten belichtet werden müssen. Somit wurde dafür ein Testchart generiert wie in Abbildung 3.8 zu sehen. Mit diesem Testchart können vier Methoden gemessen werden. In der Zweitausgabe wurde ein Testchart, wie in Abbildung 3.9 zu sehen ist, verwendet. Das Testchart ist in Messfeld und Bunttondreiecke aufgeteilt. Die Bunttondreiecke dienen zur Beurteilung der visuellen Effizienz.

Der erste Block besteht aus $9 \times 9 \times 9$ Farbfeldern. Diese liefern 729 Farbwerte, die für den Algorithmus zur Linearisierung der Zweitausgabe benötigt wird. Die $9 \times 9 \times 9$ Farbfelder entsprechen der Aufteilung eines Farbwürfels. Auf den Ecken sind die 6 bunten Grundfarben sowie die unbunten Farben Schwarz und Weiß. Den Würfel kann man sich nun in neun Scheiben zerschnitten vorstellen. Von vorne betrachtet liegt auf der ersten Scheibe oben links Schwarz und auf der letzten Scheibe unten rechts Weiß. Die Grauchse verläuft in neun Stufen quer durch das Innere des Würfels. Die übrigen Grundfarben sind auf die weiteren sechs Ecken verteilt.

Auf weiteren drei Farbblocken sind die 6 bunten Grundfarben dargestellt. Die Reihe zeigt jeweils den Verlauf von maximaler Sättigung zu unbunt Schwarz und unbunt

3. Praktische Durchführung

Weiß. Durch diese Darstellung entsteht in der Diagonalen eine Graureihe von unbunt Weiß nach unbunt Schwarz.

Die verbleibende Reihe zeigt jeweils eine farbmetrisch identische Graureihe. Für die Darstellung wurde auf vier Darstellungsarten zurückgegriffen, die farbmetrisch zu identischen Ausgaben führen müssten. Die erste Reihe entsteht durch den Postscript Operator *setcmykcolor*, wobei nur der Wert für k variiert. In der zweiten Reihe wird der *setgray* Operator verwendet. Die dritte Reihe verwendet wieder *setcmykcolor* mit einer Variation der CMY-Werte und k=0. Die letzte Reihe wird schliesslich mittels *setrgbcolor* gesetzt, wobei diese Werte natürlich jeweils den gleichen Wert haben müssen. Setzt das Ausgabegerät die Vorlage farbmetrisch korrekt um, müssen die Graureihen alle identisch aussehen.

Für eine Zweitausgabe stehen die Prüfvorlagen in Bild 3.9 und 3.2 zur Verfügung. Das Bild 3.8 und Bild 3.9 ist für eine Ausgabe auf 70x100cm Bögen, wie sie im Offset-Druck verwendet werden, vorgesehen. Für die Ausgabe auf einer Offset-Druckmaschine stand spezielles Papier der Fa. Scheufelen zur Verfügung. Dieses wird ohne optische Aufheller produziert und erlaubt daher eine saubere und stabile Spektralmessung. Die Charts sind so aufgebaut, dass zum einen eine messtechnische Beurteilung der Ausgabe möglich ist und zum anderen, mittels des 5- und 16-stufigen Bunttendreiecks, eine Visuelle Beurteilung ermöglicht wird. Dies schafft wiederum eine Verknüpfung zu den Normvorgaben aus der DIN 33872.

Für eine Ausgabe auf einem A4 Bogen wäre allerdings die Darstellung zu klein, so dass bei A4-Ausgabe mit separaten Bunttendreiecken, wie in Bild 3.2 zu sehen ist, gearbeitet wird. Zur messtechnischen Beurteilung der Zweitausgabe wird wieder auf die A4 Bögen, die auch für die Erstaussgabe verwendet wurden, zurückgegriffen. Diese beinhalten für die Zweitausgabe einen Linearisierungsalgorithmus.

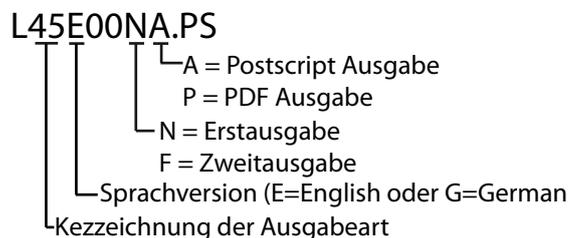


Bild 3.1: Kennzeichnung der Prüfvorlagen

Die Prüfvorlagen liegen, wie in den Bildern zu sehen ist, in verschiedenen Ausgabeformaten vor. Die RGB-Vorgaben sind jeweils gleich und werden, je nach Dokument,

in eine andere Farbdarstellung umgewandelt. So werden in L46E00NA.PS alle RGB-Werte über die eins-minus-Beziehung in CMY-Werte umgerechnet.

Gedruckt und gemessen wurde, je nach Druckprozess, das RGB-Chart, das CMYK-Chart und zwei CMYK-Separationen, die einen intelligenten Schwarzaufbau zur Farbdarstellung verwenden. Die CMYK-Separationen können innerhalb gewisser Grenzen über den Postscript Code gesteuert werden. Das Verhalten der Optionen wird später im Kapitel Auswertung näher erläutert.

Im Folgenden sind die verwendeten Prüfvorlagen zur Übersicht angeordnet, in der Bildunterschrift ist jeweils die Verwendung angegeben.

3. Praktische Durchführung

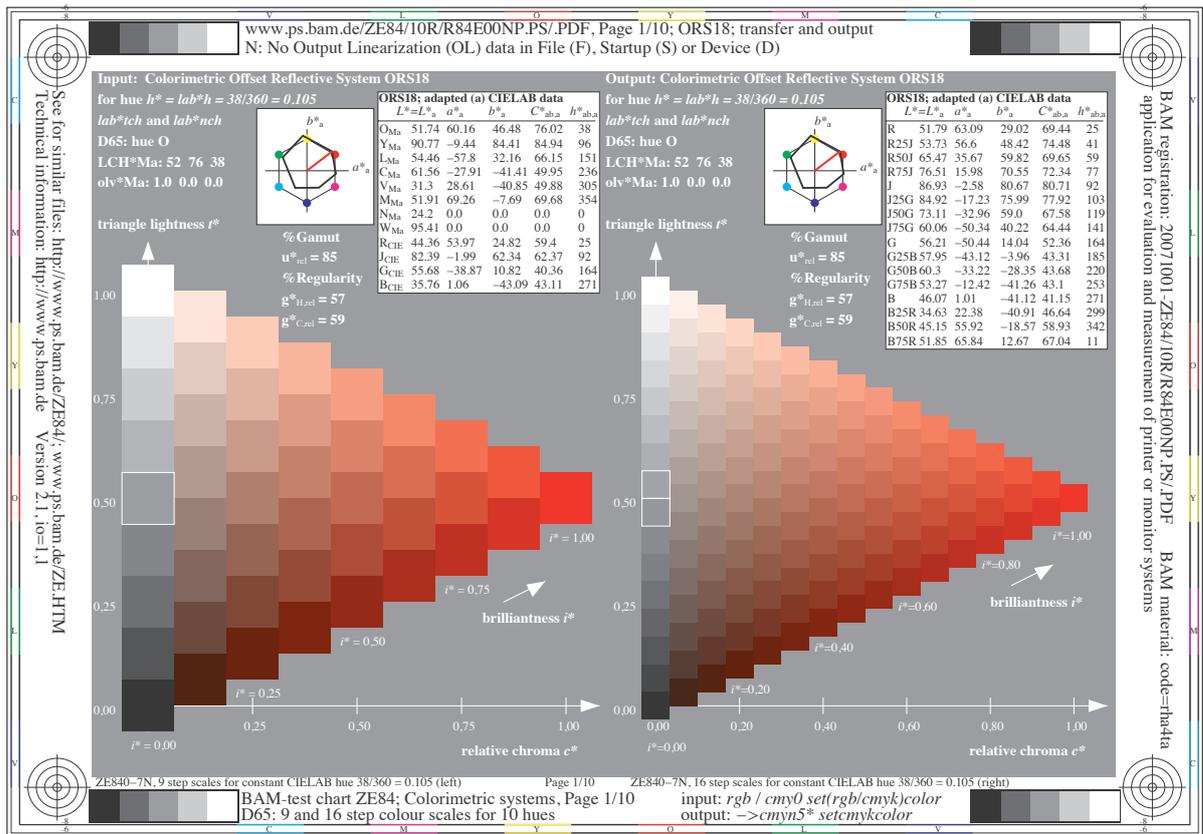


Bild 3.2: Testchart L84E00NP - Bunttendreiecke zur visuellen Beurteilung der Ausgabe

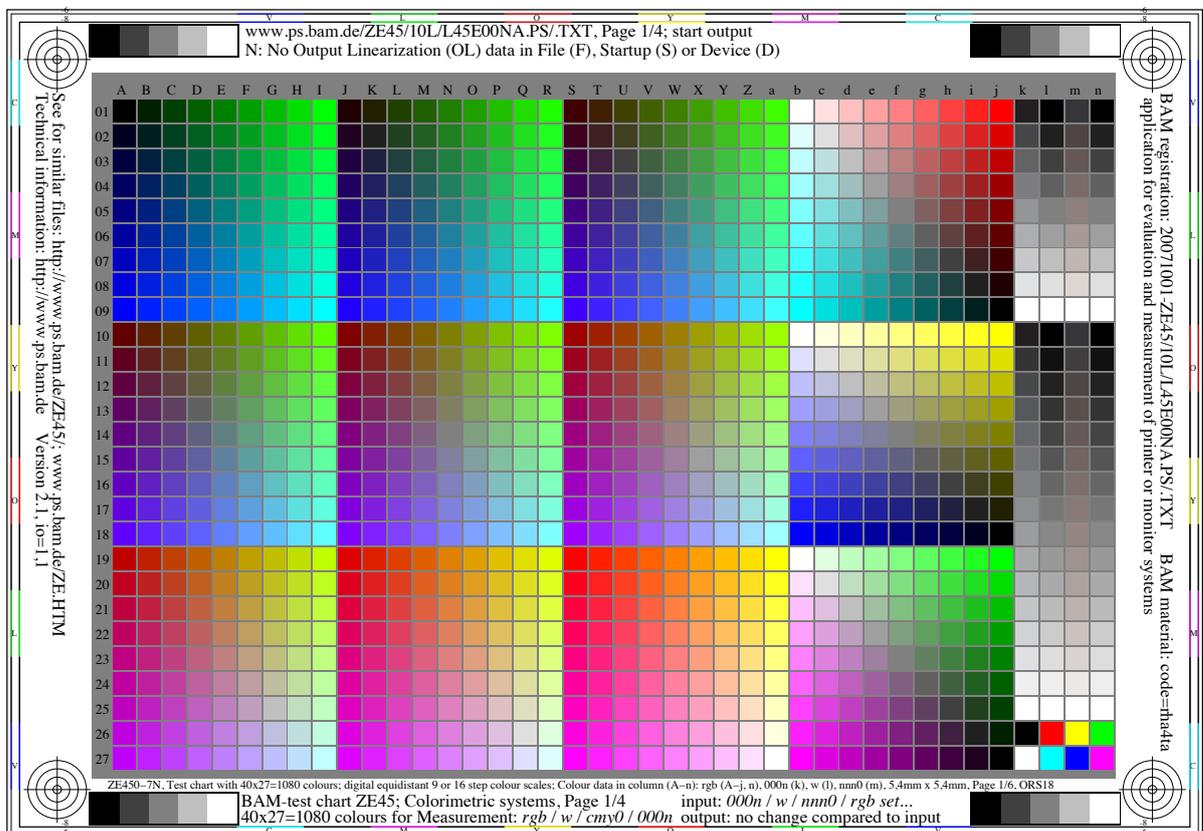


Bild 3.3: Testchart L45E00NA - Ausgabe von 729 RGB-Werten und 4 verschieden definierten Graureihen

3.1. Aufbau der Prüfvorlagen

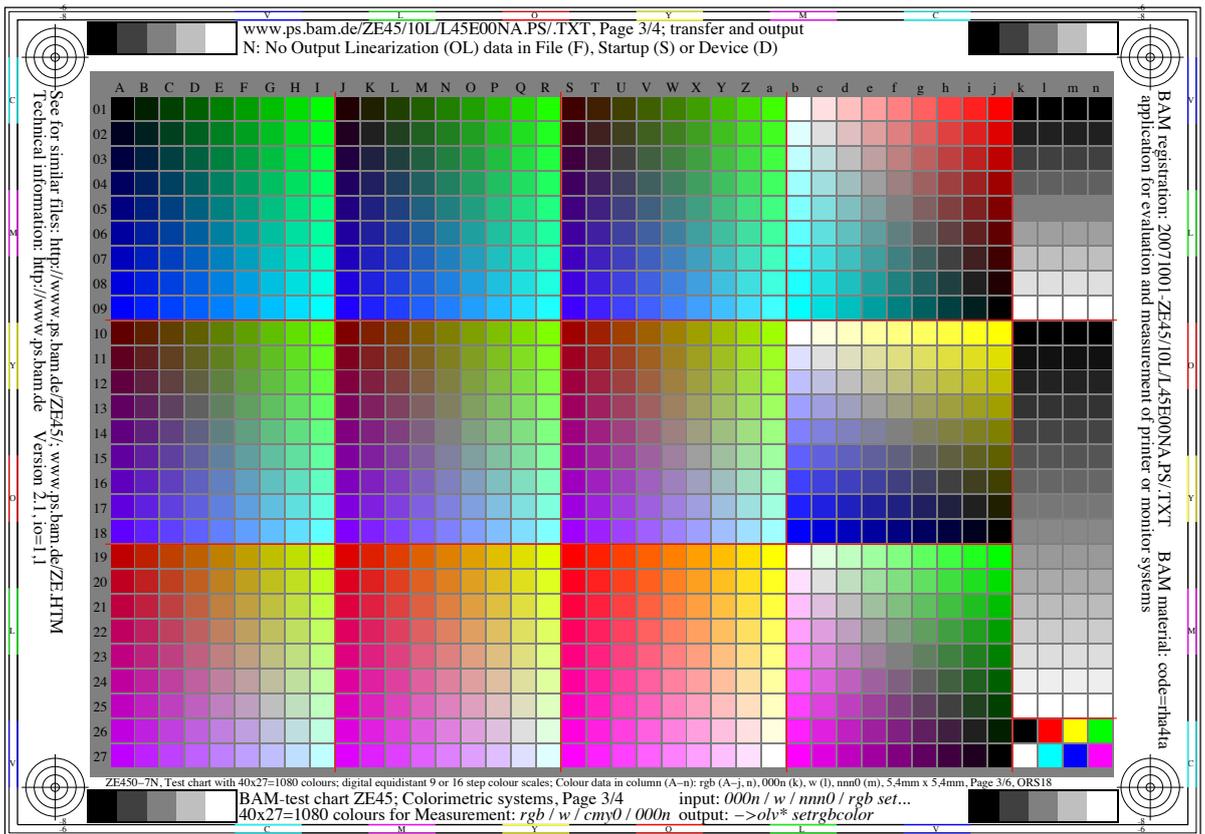


Bild 3.4: Testchart L45E00NA - Ausgabe der OLV*-Werte

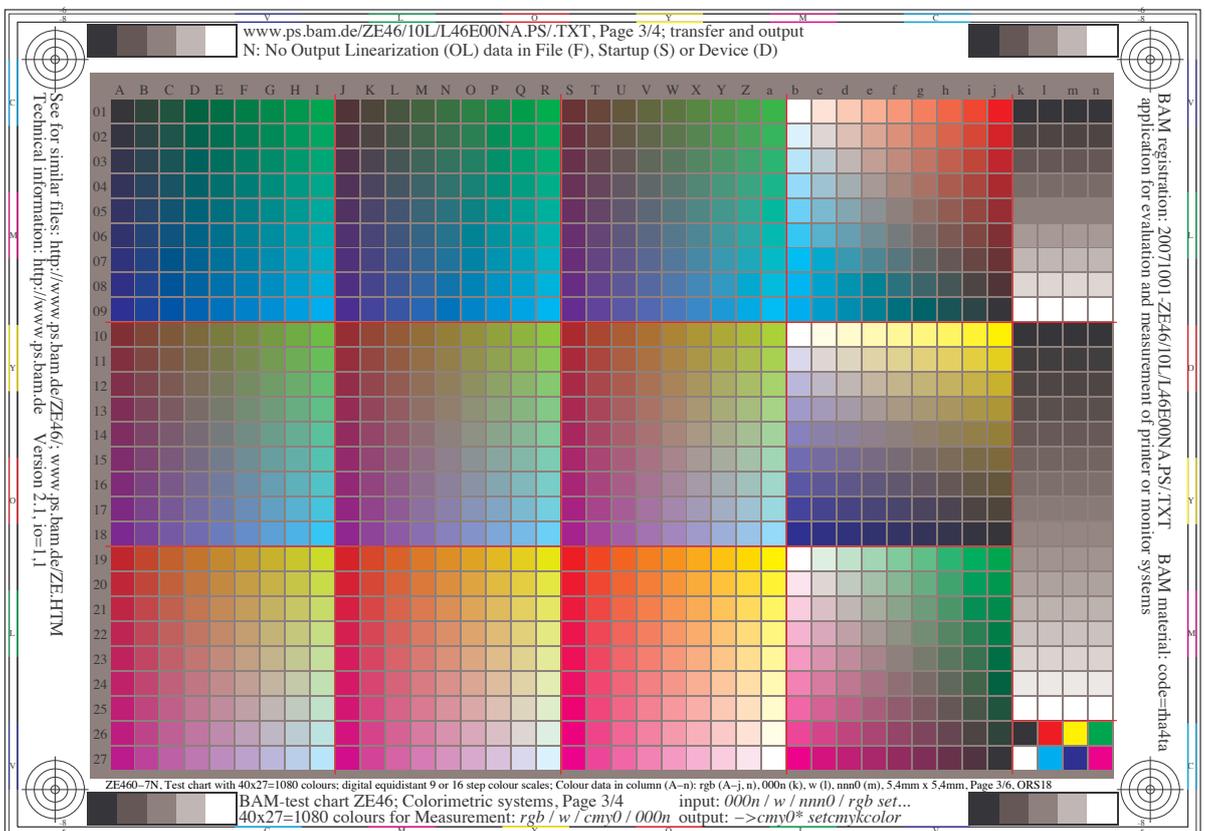


Bild 3.5: Testchart L46E00NA - Ausgabe der CMY0*-Werte

3. Praktische Durchführung

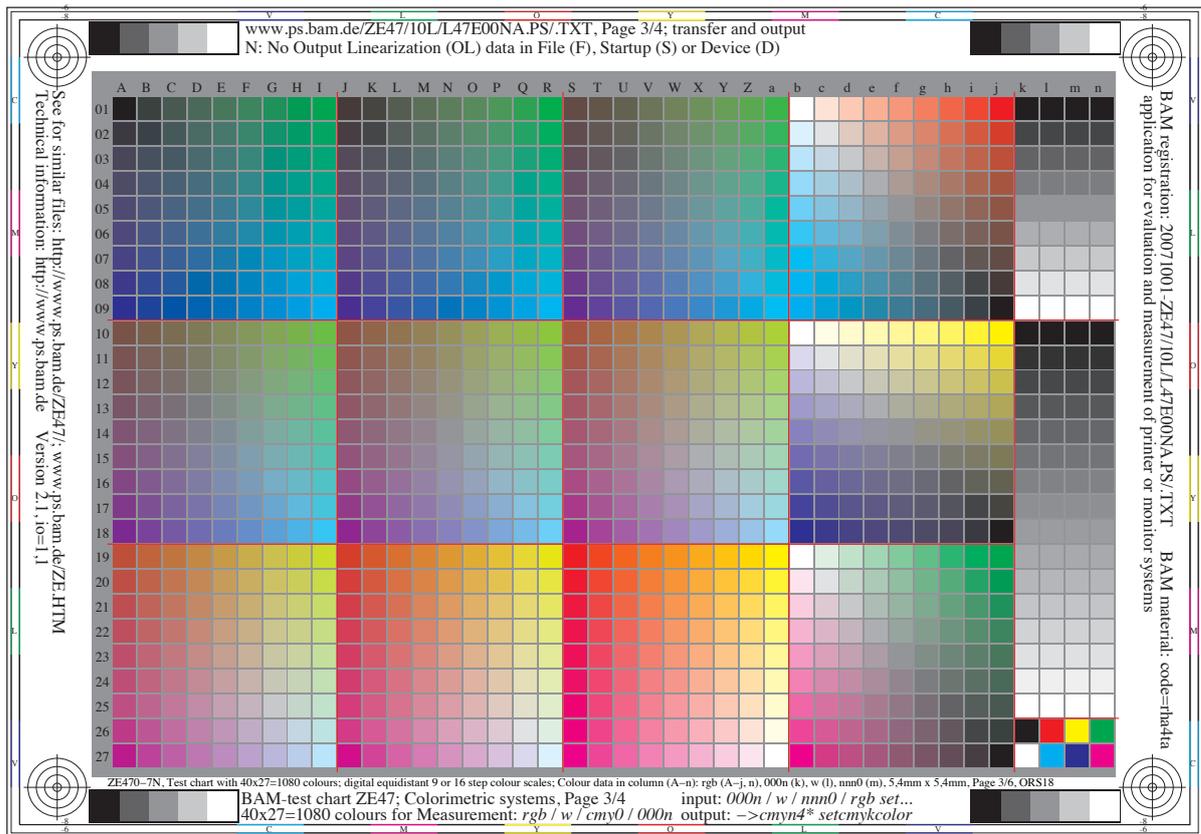
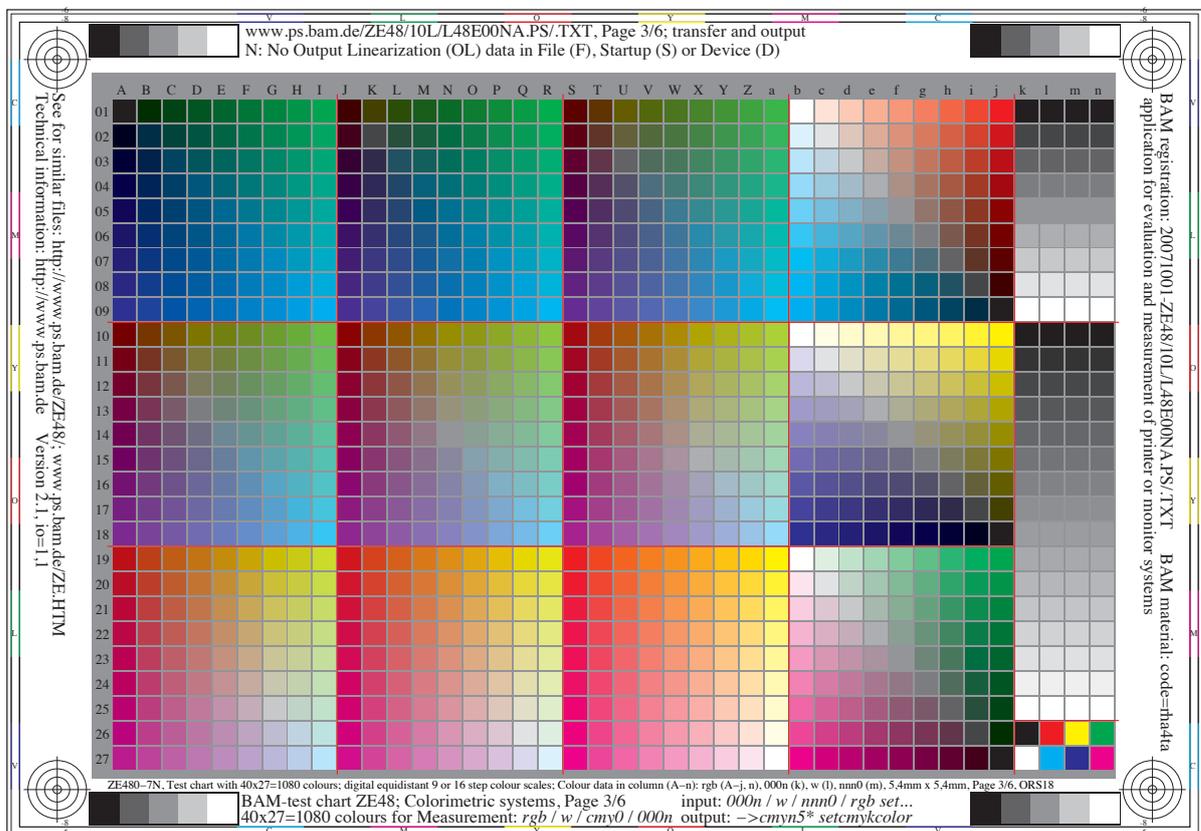


Bild 3.6: Testchart L47E00NA - Ausgabe der CMYn4* Zwischenseparation



40 Bild 3.7: Testchart L48E00NA - Ausgabe der intelligenten CMYn5* Separation

3.1. Aufbau der Prüfvorlagen

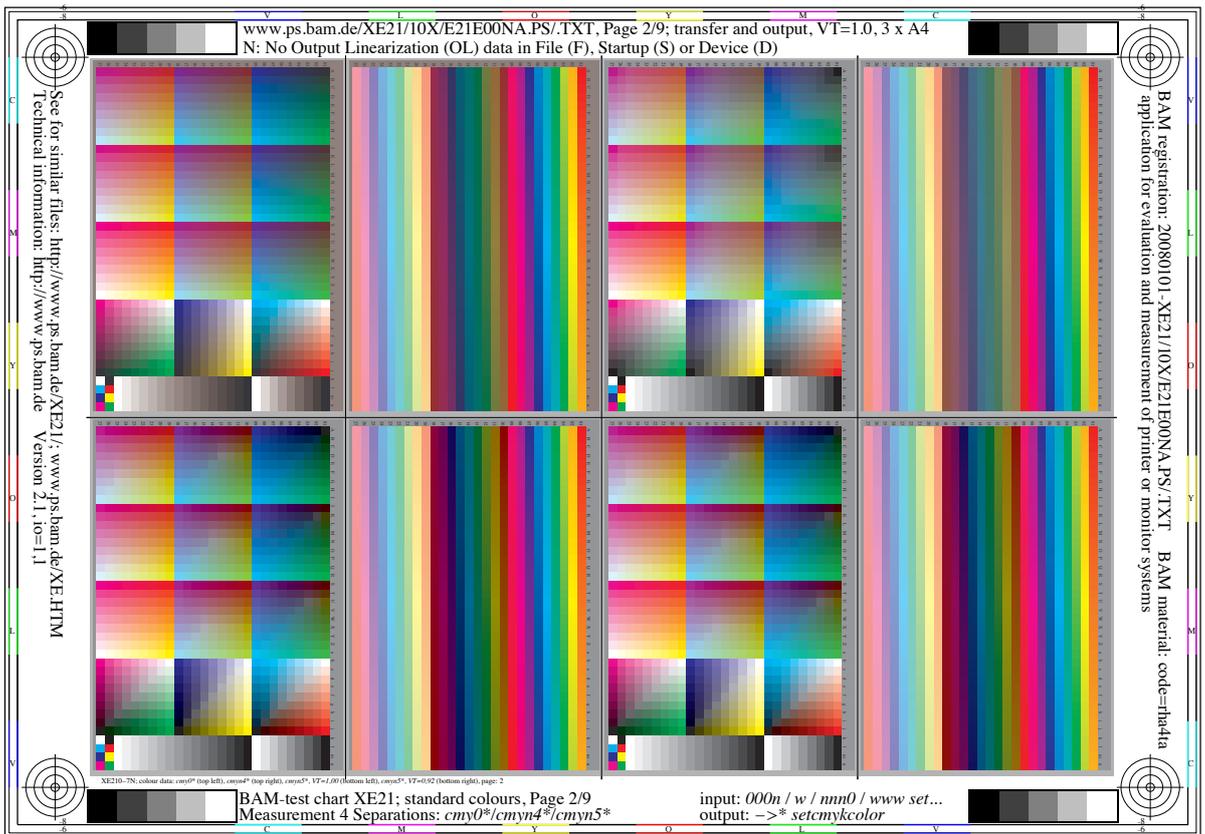


Bild 3.8: Testchart E21E00NP - Erstausgabe für den Offset-Druck

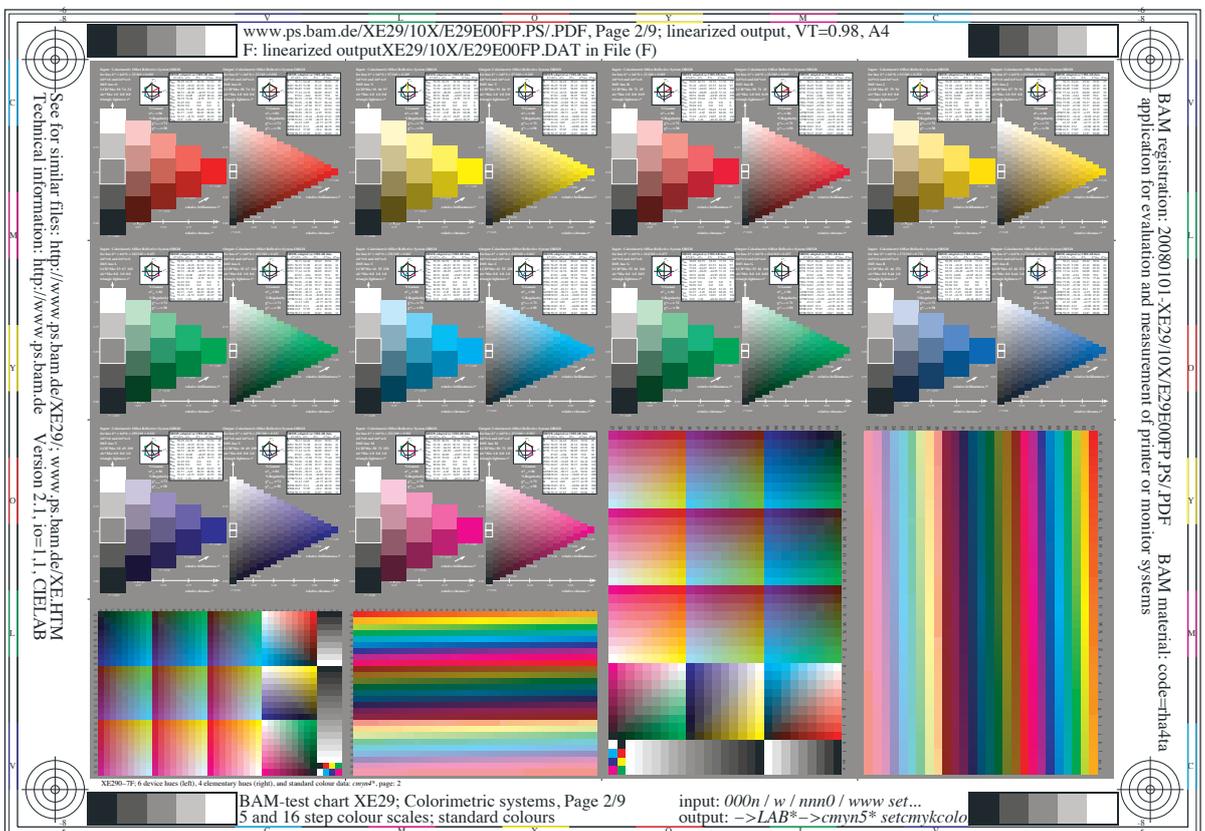


Bild 3.9: Testchart E29E00FP - Zweitausgabe für den Offset-Druck

3.2. Aufbau der Spektralmessung zur Ermittlung der Farbwerte

Nach der Ausgabe der Prüfvorlage auf dem zu charakterisierenden Ausgabegerät wird der Ausdruck für mindestens 12 Stunden gelagert. Der Ausdruck sollte nicht direktem Sonnenlicht bzw. anderen UV-Lichtquellen ausgesetzt werden. Die Lagerung sorgt für eine stabilere und besser reproduzierbare Messung, da der Farbauftrag Zeit hat, sich zu stabilisieren.

Anschließend werden die Farbfelder mit einem Spektralfotometer vermessen. Für diese Arbeit stand ein SpectroLino der Fa. Gretag-Macbeth zur Verfügung. In Tabelle 3.1 sind die technischen Daten des Gerätes angegeben.

Spektralmessung	Über holographisches Beugungsgitter
Spektraler Messbereich	380nm bis 730nm
Physikalisch Auflösung	10nm
Messgeometrie	45°/0° Ringoptik nach DIN 5033
Messblendendurchmesser	4mm
Lichtquelle	Wolfram, gasgefüllt, Normlichtart A
Physikalische Filterung	Angenähertes Tageslicht D65
Farbsysteme	CIE-XYZ, CIE-L*a*b*, CIE-L*u*v*, RxRyRz
Lichtarten der Farbmeterik	D50, D65, A, C, D30...D300, F1...F12
Beobachtungswinkel	2°, 10°
Weißbezug	absolut, relativ
Densitometrie	DIN 16536, DIN 16536 NB, ANSI STATUS A, ANSI STATUS T
Messzeiten	No-Filter ca. 1s, Pol-Filter ca. 2,5s, D65-Filter ca. 2s
Geräteübereinstimmung	Typisch 0,03 ΔE^* (Mittelwert über 12 Kacheln), maximal 0,8 ΔE^* (Mittelwert über 12 Kacheln)
Kurzzeit-Reproduzierbarkeit	0,03 ΔE^* (Mittelwert aus 10 Messungen im Abstand von 10s auf Weiß)

Tabelle 3.1: Technische Daten des Spektralfotometers SpectroLino

3. Praktische Durchführung

den. Hierfür wurde ein Programm in der Programmiersprache *TCL* geschrieben. Das Programm fragt nach der Datei mit den Spektralwerten und rechnet diese in Lab*-Werte unter Berücksichtigung der Normlichtart D65 um. Die Berechnungsmethode entspricht der Norm DIN 5033-3. Es wurden die Datensätze für einen 2° CIE Standardbeobachter und die Normlichtart D65 verwendet.

Bei der automatischen Aufbereitung der Messdaten durch die Software musste berücksichtigt werden, dass der Messtisch die Daten spaltenweise erfasst. Die Tabelle in der Postscript Datei, die den Linearisierungsalgorithmus mit Messwerten versorgt, arbeitet allerdings die Daten als 9x9 Blöcke ab. Um die Verwendung der Software vielseitig und einfach anpassbar zu gestalten, habe ich mich dazu entschieden, die Daten in eine 27x36 Matrix zu schreiben und per Subroutine jeweils die gewünschten Elemente abzuholen. In der 27x36 Matrix sind alle Werte als Lab*-Werte gespeichert. Die Speicherung der Lab*-Werte in einer Matrix hat sich auch für weitere Darstellungsformen der Messwerte wie Bunttondreieck oder zur Beurteilung der Grauchse als sehr vorteilhaft erwiesen.

Die Spektralmessung bildet somit die Grundlage an Messdaten. Alle weiteren Verarbeitungsprogramme bedienen sich aus diesem Pool von Messdaten. Die Anpassung an die Normlichtart und den Beobachter (2° oder 10°) entscheidet sich erst in der Programmierung. Somit sind die Messdaten auch bei späteren Änderungen der Umgebungsbedingungen vollständig verwendbar.

3.3. Erzeugung der Ein-/Ausgabedaten

Der Workflow zur Gewinnung der Eingabe- und Ausgabedaten ist in Bild 3.11 dargestellt. Um die Funktionalität des Workflows zu überprüfen und einen Einstieg in die verwendete Messtechnik und Programmierung zu bekommen, wurde ein Probendurchlauf mit einem FujiX Pictography 3000 gedruckt. Da dieses Gerät extrem stabile und reproduzierbare Ergebnisse liefert, ist es für einen Referenzdurchlauf gut geeignet. Nach Ausdruck der Prüfvorlagen wurden die 729 Farbfelder vermessen und die Werte in die Ausgabedatei mit Linearisierungsalgorithmus geschrieben. Die Linearisierung berechnet nun aus den gemessenen Lab*-Werten die zugehörigen Farbwerte, um eine möglichst gleichabständige Zweitausgabe zu bekommen. Der Rechenalgorithmus basiert auf einer linearen Interpolation der Farbwerte. Durch die Wertepaare ist eine eindeutige Verbindung zwischen den Farbwerten der Ausgabe und den Lab*-Werten gegeben.

Daraufhin wird eine Zweitausgabe unter gleichen Bedingungen gedruckt und, wie auch bei der Erstausgabe, spektral vermessen. Unter dem Begriff *Gleiche Bedingungen* für die Erst- und Zweitausgabe sind folgende Punkte zu beachten.

- Gleiches Datenformat für die Erst- und Zweitausgabe, so dass nicht die Erstausgabe Postscript Daten bekommt und die Zweitausgabe mit PDF Daten gedruckt wird
- Verwendung der selben Software bei der Erst- und Zweitausgabe
- Keine Versionsunterschiede in der Software und bei Treibern
- Gleichen Papiersorte für Erst- und Zweitausgabe

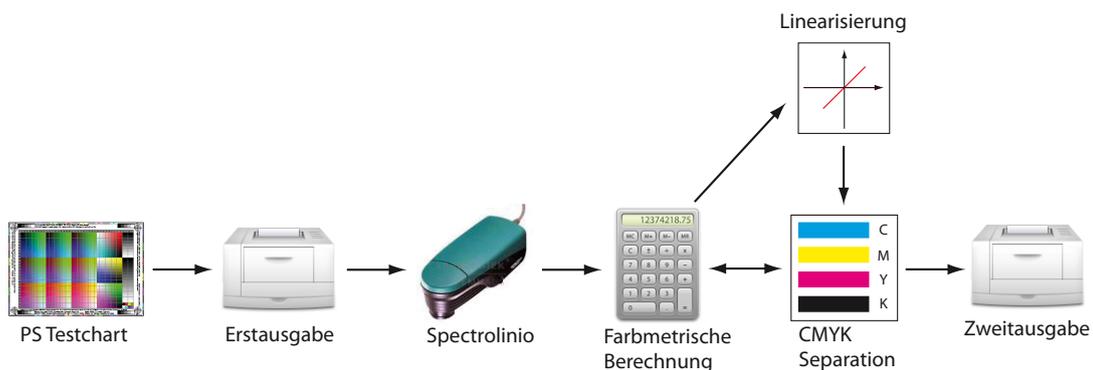


Bild 3.11: Prozesskette zur Ermittlung der Reflexionsfaktoren und CIELAB-Daten

Der Workflow ist so angelegt, dass möglichst viele Daten zur Auswertung vorliegen.

3. Praktische Durchführung

Die Schwierigkeit bestand darin, die Datenflut für die Auswertung zu komprimieren, so dass Informationen wie die Gleichmäßigkeit einer Farbreihe ersichtlich werden. Die Prüfvorlagen der Erstausgabe erfüllen diese Kriterien. Wie oben beschrieben lagen diese mit verschiedenen Separationsmechanismen vor.

Um generelle Probleme in der Farbausgabe aufzuspüren, wurden auch Ausdrücke durchgeführt, die vom obigen Workflow abweichen. So wurde z.B. getestet, wie sich Geräte verhalten, wenn Farbmanagement an bzw. aus geschaltet ist. Auch bei den anderen Geräten wurden verschiedene Einstellungen wie Druckertreiberversionen, Drucken über Treiber oder direktes Kopieren der Postscriptdaten an den Druckern untersucht. Diese Untersuchungen sollen den Anwender dafür sensibilisieren, dass kleine Änderungen im Workflow die Ausgabe leicht bis drastisch verändern können. Es wird damit auch gezeigt, dass angewendetes Colormanagement nach ICC nicht automatisch zu besseren Ergebnissen führt.

Gerät Nr.	Drucktechnik	Technologie	Verwendungszweck
0	Silberhalogenid	Postscript	Foto/Referenz Professional
1	Offset	PDF	Auflagendruck
2	Offset	PDF	Auflagendruck
4	Tinte	Postscript	Professional Proof
5	Tinte	PDF	Professional Proof
6	Tinte	GDI	Home/Office
7	Laser	Postscript	Office
9	Laser	GDI	Home/Office

Tabelle 3.2: Liste der verwendeten Ausgabegeräte

In der Tabelle 3.2 sind die untersuchten Geräte aufgelistet. Bei der Auswahl der Geräte wurde darauf geachtet, ein Spektrum durch die verwendete Druckerlandschaft zu repräsentieren und möglichst alle Einsatzgebiete abzudecken. Um den Eindruck zu vermeiden, dass es sich bei den Ergebnissen um Eigenschaften eines bestimmten Produkts eines Herstellers handelt, wurden die Hersteller bewusst nicht aufgelistet. Vielmehr soll jedes Gerät für einen Typ von Gerät, einer Geräteklasse, stehen.

Im Text werden die Geräte jeweils eindeutig über die Gerätenummer referenziert.

Für die Korrelation mit dem Normentwurf DIN 33872 sind vor allem die Office-Geräte von Interesse. Im Massenmarkt dominieren derzeit die tintenbasierten Farbdrucker.

Daher sollte auch hier ein Gerät zur Verfügung stehen. Im Bürobereich finden derzeit Farblaserdrucker immer häufiger Verwendung. Daher ist es schön auch hier Geräte im Test zu haben. Bei den Laser- und Tintendruckern wurde versucht, jeweils ein postscriptfähiges Gerät und eine GDI-Version zu testen. Bei GDI-Druckern sind die Einstellmöglichkeiten schlechter, da alle Verarbeitungen vom Druckertreiber gesteuert werden. Bei dieser Technik steht dem Drucker kein eigenes grafisches Interface zur Verfügung. Die Druckdaten werden vom Rechner aufgebaut und ein Bitmap der Darstellung, die auch an den Monitor gesendet wird, an den Drucker geschickt. Der Druckertreiber setzt die Daten in Farbwerte um. Da der Drucker kein eigenes grafisches Interface besitzt, sind diese Geräte deutlich günstiger in der Herstellung und somit auch im Verkaufspreis. Bei GDI Druckern ist es durch das fehlende grafische Interface daher nie möglich, Druckdaten direkt als Postscript Code zum Drucker zu schicken. Der Drucker kann nur vom Treiber aufbereitete Daten empfangen und drucken. Ausdrücke die auf einer Offset-Druckmaschine entstanden sind, eignen sich gut zur Kontrolle der ermittelten Daten. Da im Offset-Prozess für jeden Farbauszug eine separate Druckplatte belichtet wird, die dann direkt den Farbauftrag einer Primärfarbe steuert, werden die farbmetrischen Vorgaben bei diesem Prozess kontrollierbar umgesetzt. Nachteil bei dieser Technik sind die hohen Einmalkosten. Somit stand für jeden Ausdruck im Offset Druck nur ein Versuch für Erstaussgabe und Zweitaussgabe zur Verfügung.

3.4. Verfahren zur Ermittlung der Materialeffizienz

Zur Beurteilung der Materialeffizienz werden im Idealfall die Einzelauszüge der Separation bewertet. Setzt das Ausgabegerät die Farbwerte der Vorlage korrekt um, werden die Anteile der im Druckprozess verwendeten Primärfarben anteilig nach den Vorgaben gesetzt. Genau diese Anteile werden in den Separationsauszügen ermittelt. Die Farbauszüge haben einen Tonwertumfang, der mit 8 Bit kodiert ist. Somit sind 256 Tonwerte pro Pixel möglich.

Für die Auswertung wurde ein Programm geschrieben, das den Tonwert jedes Pixels einliest. Die gesammelten Tonwerte werden im Abrasterungsprozess aufsummiert. Anschließend werden die Werte in ein Verhältnis zum gesamten Blatt gesetzt. Ist der Farbauszug vollkommen weiß, es wird also kein Anteil der Farbe gedruckt, entspricht dies einer Bedeckung von null. Ist das Blatt vollkommen schwarz, das heißt an jeder Bildstelle ist die Farbe voll ausgeprägt, entspricht dies einer Bedeckung von eins. Das Programm bewertet den Tonwert 255 als *Druckpunkt vollkommen ausgeprägt* und null als *Druckpunkt nicht vorhanden*. Die Programmdaten liefern somit einen Wert für

die Überdeckung jeder einzelnen Druckfarbe. Geht man nun davon aus, dass schwarze Druckfarbe ungefähr dreimal günstiger in der Beschaffung ist als bunte Druckfarbe, kann ein Zahlenwert für die Materialeffizienz bestimmt werden. Dieser wird im Weiteren als Kosten zusammengefasst.

Die Überprüfung der Materialeffizienz ist bei den Ausgaben mittels Tinten und Laserdrucker deutlich schwieriger, da bei diesen Druckverfahren viele Parameter vom Druckertreiber gesteuert werden.

Eine Lösungsmöglichkeit wäre, die Tintenpatrone vor und nach dem Ausdruck zu wiegen und damit den Tintenverbrauch zu ermitteln. Schwierigkeiten bereitet hier der unvorhersehbare Reinigungsautomatismus der Tintendrucker. Dieser schaltet sich oft schon automatisch nach dem Öffnen des Frontdeckels ein und dauert nicht immer gleich lange. Es ist somit schwierig festzustellen, wie viel Tinte durch den Reinigungsautomatismus verloren geht. Daher ist bei der Messung sicherzustellen, dass kein Reinigungsvorgang zwischen den Messungen stattfindet.

Ein weiteres Verfahren, das in dieser Arbeit verwendet wurde, ist die Überprüfung der Ausgabe mit dem Lichtmikroskop. Durch die vergrößerte Darstellung kann überprüft werden, wie die Farben zusammengesetzt sind. Am besten ist hierfür ein heller Grauton geeignet. In der CMY0*-Separation sollte das Grau aus allen drei Farben gemischt sein. Wird festgestellt, dass in den intelligenteren Separationen das Grau auch aus bunter Farbe gemischt wird, macht eine weitere Untersuchung keinen Sinn. Der Drucker setzt in diesem Fall nicht die vom Testchart geforderten Farbwerte um.

3.5. Verfahren zur Ermittlung der visuellen Effizienz

Die visuelle Effizienz der Ausgaben wird über die visuelle Beurteilung und die farbmetrische Kennzeichnung beschrieben.

Für die messtechnische Kennzeichnung der visuellen Effizienz werden die Messdaten der Erst- und Zweitausgabe ausgewertet. Daraus wird z.B. die Gleichmäßigkeit g^* berechnet. Diese ist definiert als das Verhältnis des kleinsten zum größten Abstand einer Farbreihe multipliziert mit 100. Die Gleichmäßigkeit ist somit 100, wenn alle Felder in der Reihe den gleichen Abstand haben bzw. null, wenn zwei Felder die gleiche Farbe haben. Wird die Gleichmäßigkeit aus den Messwerten berechnet, kommen die Extremwerte 0 und 100 aufgrund von Messtoleranzen nicht vor.

Auch der Farbabstand zwischen idealem Soll-Wert und Ist-Wert gibt Aufschluss darüber, ob sich eine Reihe verbessert. Bei dieser Beurteilung wird aus den Messdaten

einer Reihe von z.B. Weiß nach Orangerot der gemessene Lab*-Wert für Weiß und der für Orangerot genommen und geometrisch die idealen Zwischenwerte berechnet. Aufgrund dieser Messwerte kann nun der Farbabstand von Soll- zu Ist-Wert berechnet werden. Die mittlere Abweichung einer Reihe von den Soll-Werten ist auch hier wieder ein Güte Merkmal der visuellen Effizienz bei der Farbausgabe.

Im nächsten Schritt wird die Korrelation der zuvor messtechnisch ermittelten Ergebnisse mit denen eines visuellen Beobachters untersucht. Hier werden die Reihen rein visuell begutachtet. In einem ersten Schritt muss mit einem Ja/Nein-Kriterium festgestellt werden, ob alle Felder in einer Reihe unterscheidbar sind. Ja/Nein-Kriterien werden auch im Normentwurf zur DIN 33872 verwendet, um effektiv und übersichtlich zu einem Beurteilungsergebnis zu kommen. Wird die Frage mit Nein beantwortet, ist dies gleichwertig mit einer Gleichmäßigkeit g^* von null. Außerdem soll das Feld mit dem größten und das mit dem kleinsten Abstand zum Nachbarfeld ermittelt werden. Für den Abstand soll ein Zahlenwert niedergeschrieben werden. Dafür wird die Annahme getroffen, dass die Summe aller Abstände in der Reihe auf eins normiert wird. In den verwendeten Prüfvorlagen sind die Reihen neunstufig. Somit ergibt sich ein rechnerischer Abstand von 0,125 zwischen jedem Feld. Der Beobachter kann nun den kleinsten und größten Abstand zu dieser Referenz beurteilen.

Für die visuelle Beurteilung der Prüfvorlagen steht eine Abmusterungskabine an der Bundesanstalt für Materialforschung (BAM) zur Verfügung. Die Beleuchtung der Kabine kann auf Normlichtart D65 (Tageslicht 6500°K) eingestellt werden und ermöglicht damit eine Beurteilung unter standardisierten Lichtverhältnissen. Mit Normlichtart D65 ist auch die Korrelation zu den gemessenen Werten gegeben, da diese auch unter Verwendung von Normlichtart D65 berechnet wurden. Die Anbringung der Vorlage in der Kabine entspricht der CIE-Standard 45°/0°-Geometrie, so dass das Licht unter 45° auf das Testchart trifft und der Beobachter unter einem Winkel von 0° auf das Testchart blickt.

Um den Beobachter nicht durch die umliegenden Farbfelder zu verwirren und/oder zu beeinflussen, werden diese abgedeckt. Hierfür wurde eine Schablone angefertigt, die den Rest der Testseite verdeckt. Da das Auge für Mittelgrau relativ unempfindlich ist, wurden diese aus mittelgrauem Karton geschnitten. Die Prüfvorlagen für Officedrucker, Proofdrucker und Offset-Maschinen hatten leider nicht die gleiche Größe, so dass die Schablone drei mal angefertigt werden musste.

4. Auswertung der Messdaten

Im folgenden werden die Ausgabefarben spektralphotometrisch gemessen und die Messdaten ausgewertet. Hierbei wird zum einen die visuelle Effizienz und zum anderen die Material-Effizienz untersucht. Für die Untersuchung der visuellen Effizienz sind die Messdaten mit Hilfe farbmetrischer Beschreibungen aufgearbeitet und in eine möglichst übersichtliche Ausgabedarstellung gebracht. Des weiteren sind die Druckprozesse auf ihre Güte und Stabilität bezüglich genormter Vorgaben untersucht. Zur Auswertung der Messdaten hinsichtlich der Material-Effizienz wurden vor allem die Separationsauszüge bewertet. Zusätzlich wurde untersucht, in wie weit die tatsächliche Ausgabe mit den Separationsauszügen übereinstimmt. Letztendlich ist für die Material-Effizienz ein Kostenfaktor berechnet. Dem Kostenfaktor liegt zugrunde, dass bunte Druckfarbe dreifach höhere Kosten produziert als unbunte Druckfarbe.

4.1. Stabilität des Druckprozesses

Für eine erste Beurteilung der Ausgaben wurden die gemessenen Farbwerte mit den Standard-CIE-Werten für Offset-Druckfarben nach ISO 2846-1:1997 verglichen. Berücksichtigt ist die Normlichtart D65 und der 2°-Beobachter. Gemessen wurden eine Separation im Unbuntaufbau, im weiteren CMYn5* genannt. Lediglich bei den GDI-Geräten (Gerät Nr. 6 und Nr. 9) wurde die OLV*-Ausgabe gemessen, da diese Geräte nur mit RGB-basierten Daten umgehen konnten.

In Tabelle 4.1 sind die Messwerte der Erstaussgabe und in 4.2 die Messwerte der linearisierten Zweitaussgabe aufgelistet. Die Farbwerte der Erstaussgabe zeigen, dass die Prozesse für die Primärfarben des Offset-Drucks auf den Offset-Geräten Nr. 1 und Nr. 2 sehr eng an der Vorgabe liegen. Lediglich die gelbe Druckfarbe zeigt hier eine etwas größere Abweichung. Wie auch in den folgenden Untersuchungen gezeigt wird, scheint die Druckfarbe Gelb schon von *Haus aus* eine gewisse Sonderstellung zu haben und zeigt daher in allen farbmetrischen Bewertungen ein von Cyan und Magenta abweichendes Verhalten. Die Qualität der schwarzen Druckfarbe ist bei allen *hochwertigen*

4. Auswertung der Messdaten

Ausgabegerät Nr.		O	L	V	C	M	Y	W	N
ISO 2846-1	L*	47,94	50,90	25,72	58,62	48,13	90,37	95,41	18,01
	a*	65,31	-62,96	31,35	-30,63	75,20	-11,16	-0,98	0,5
	b*	52,07	36,71	-44,36	-42,75	-11,16	96,17	4,76	-0,46
1	L*	48,7	52,0	28,6	59,8	49,6	90,9	96,9	18,0
	a*	64,41	-66,0	23,4	-29,4	74,0	-10,7	-0,6	0,5
	b*	40,08	21,4	-43,7	-44,5	-8,3	88,7	2,2	0,5
	ΔE	12	15,7	8,4	2,5	2,4	7,5	3	1
2	L*	46,2	54,9	25,6	61,2	47,9	90,4	96,9	17,2
	a*	64,77	-68,8	32,6	-30,5	74,1	-10,5	-0,7	-0,2
	b*	43,62	35,2	-44,7	-44,2	-9,4	90,5	2,3	1,4
	ΔE	8,6	7,3	1,3	3	2,8	5,7	2,9	2,1
4	L*	42,1	45,7	17,0	54,0	43,2	87,6	94,9	13,3
	a*	68,88	-76,5	31,6	-24,2	77,1	-6,6	0,2	9,6
	b*	48,56	31,1	-44,6	-54,0	-3,5	99,2	-5,7	0,4
	ΔE	7,7	15,6	8,8	13,8	6,2	6,1	10,5	10,2
5	L*	47,3	53,8	25,6	58,3	47,7	90,5	96,7	18,6
	a*	70,2	-73,0	30,9	-28,3	78,5	-12,6	1,2	0,2
	b*	44,5	31,7	-47,9	-49,4	-6,2	100,0	-2,3	-0,5
	ΔE	9	11,6	3,6	7,1	3,4	4,1	7,5	0,7
6	L*	46,3	53,8	24,2	63,1	49,9	86,8	94,7	16,2
	a*	58,0	-60,9	32,9	-26,7	68,4	-2,8	2,7	3,4
	b*	41,0	38,8	-58,6	-42,2	-25,1	92,7	-6,2	-11,1
	ΔE	13,4	4,1	14,4	6	19,6	9,8	11,5	11,2
7	L*	48,0	52,2	26,1	58,2	49,5	90,4	94,9	23,9
	a*	57,08	-57,7	21,3	-17,3	67,0	-14,6	3,2	-0,1
	b*	42,26	33,5	-41,7	-48,8	-8,8	81,9	-10,0	-0,4
	ΔE	12,8	6,3	10,4	14,6	8,5	14,7	15,3	5,9
9	L*	52,7	67,3	39,9	68,3	67,9	86,6	93,2	28,2
	a*	38,3	-30,7	3,7	-9,6	30,1	-7,8	4,8	2,6
	b*	43,0	39,5	-47,4	-38,5	-19,0	58,7	-12,0	2,8
	ΔE	28,9	36,3	31,2	23,6	50,7	37,8	17,8	10,9

Tabelle 4.1: Vergleich der Standard-CIE-Werte für die Offset-Druckfarben nach ISO 2846-1:1997 mit den Ist-Werten der Erstausgabe.

Drucksystemen als sehr gut zu beurteilen. Lediglich Gerät Nr. 4 schneidet im Schwarzen mit einem ΔE von 10,2 hier etwas schlechter ab als die anderen hochwertigen Drucksysteme (Ausgabegerät 1 bis 5 und 7).

Die Bürogeräte Nr. 6 bis Nr. 9 schneiden beim Vergleichstest Ausgabefarben zu Offset-Farben nach ISO 2846 schlechter ab als die Proof-Drucker Nr. 4 und 5. Dies hängt wohl damit zusammen, dass die Geräte nicht hinsichtlich Standards entwickelt wurden, die aus der Offset-basierten Druckbranche kommen. Prinzipiell ist es ja auch keine Maßzahl von absoluter Güte, ob genau die in der Norm festgehaltenen Werte eingehalten werden, da der absolute Farbwert kein Qualitätskriterium an sich sein kann. Interessant ist der Vergleich aber dahingehend, dass jeder Hersteller und jede Branche hier mit anderen Absolutfarbwerten für die Primärfarben arbeitet. So kommen bei gleichem Mischungsverhältnis auch zwangsläufig andere Ergebnisse in der Farbausgabe zustande. Sicherlich wäre es einfacher, alle Hersteller würden sich für die Farbwerte der primären Prozessfarben auf einen einheitlichen Standard einigen.

In der Zweitausgabe ist zu erkennen, dass Schwarz bei den sonst sehr stabilen Ausgaben von Gerät Nr. 2 und Nr. 5 zu hell dargestellt wird. Dies liegt nicht am Druckprozess, sondern an der Ausgabesteuerung. Werden normalerweise für die Berechnungen der Separation die Endwerte, also die Primär- und Sekundärfarben, nicht verändert, ist das für die Druckfarbe Schwarz anders. Hier wurde mit einem Parameter gearbeitet, der den Schwarzpunkt auf der Unbuntachse nach oben verschiebt. Durch die Verschiebung des Schwarzpunkts wird ein Verhalten begünstigt, so dass alle interpolierten Werte im Inneren des druckbaren Farbraums liegen.

Ein weiterer, interessanter Versuch, der bei den Offset-Ausgaben möglich war, kann mittels Messung des am Rand aufgedruckten Medienkeils durchgeführt werden. Der Medienkeil wird bei der Steuerung und Überwachung des Druckprozesses als Referenz verwendet und damit der Farbauftrag der Maschine im Andruck eingestellt. Da die Farbwerte des Medienkeils unabhängig von den Farbwerten des Prüfvorlagen sind, geben Differenzen Aufschluss über mögliche und ungewünschte Farbmanagementstellungen. In Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 wurden die Messwerte der Erstaussgabe und der Zweitausgabe mit denen des Medienkeils verglichen. Eine Abweichung von bis zu fünf CIELAB-Einheiten kann dabei problemlos toleriert werden.

Die Messwerte zeigen, dass eine gute Übereinstimmungen vorhanden ist. Lediglich im Gelb zeigt sich auch hier wieder eine leicht überhöhte Abweichung. Auch die Primärfarben zeigen wieder eine bessere Übereinstimmung von Medienkeil zu Testchart. Vor allem die Gelb-Komponente ist für die Abweichung im Laubgrün verantwortlich. Die Farbwerte für Gelb in 4.3 und 4.4 zeigen eine messbare Schwäche der b^* -Komponente

4. Auswertung der Messdaten

Ausgabegerät Nr.		O	L	V	C	M	Y	W	N
ISO 2846-1	L*	47,94	50,90	25,72	58,62	48,13	90,37	95,41	18,01
	a*	65,31	-62,96	31,35	-30,63	75,20	-11,16	-0,98	0,5
	b*	52,07	36,71	-44,36	-42,75	-11,16	96,17	4,76	-0,46
1	L*	47,7	48,8	27,9	57,0	48,8	90,5	97,0	20,4
	a*	65,9	-68,6	19,2	-29,0	74,3	-10,4	-0,6	-1,8
	b*	42,15	16,9	-45,6	-46,7	-6,7	92,1	2,1	-1,6
	ΔE	9,9	20,7	12,4	4,5	1,2	4,1	3,1	3,6
2	L*	48,5	56,5	30,9	64,4	49,4	90,9	97,0	25,7
	a*	61,44	-62,8	28,7	-28,2	70,5	-10,6	-0,6	-1,4
	b*	40,36	31,9	-40,6	-39,8	-8,8	86,0	2,2	1,4
	ΔE	12,3	7,4	6,8	6,9	5,2	10,2	3,1	8,1
4	L*	47,4	50,7	21,9	57,9	47,9	88,1	95,0	23,1
	a*	61,91	-71,2	33,0	-23,6	70,8	-8,0	0,3	10,2
	b*	44,37	28,8	-45,2	-49,2	-5,2	88,7	-5,7	-0,6
	ΔE	8,4	11,5	4,3	9,6	4,7	8,5	10,6	10,9
5	L*	48,7	56,1	29,3	59,9	49,6	90,3	96,8	26,0
	a*	67,2	-66,8	31,1	-28,0	75,9	-11,8	1,3	-1,0
	b*	41,8	31,1	-44,8	-47,9	-9,5	93,8	-2,8	-3,1
	ΔE	10,5	8,5	3,5	5,9	3,1	2,5	8	8,5
6	L*	49,5	54,7	28,5	63,1	60,9	83,2	94,8	16,9
	a*	55,4	-49,7	22,8	-26,7	49,0	4,1	2,6	3,1
	b*	36,7	37,4	-57,7	-40,8	-27,6	82,0	-6,2	-11,5
	ΔE	18,4	13,8	16,1	6,3	35,8	22	11,5	11,4
7	L*	45,6	46,1	21,1	54,0	47,1	89,9	95,0	20,7
	a*	60,14	-63,0	22,5	-17,1	69,8	-14,1	3,2	0,6
	b*	44,16	29,9	-40,9	-51,9	-6,4	89,8	-10,3	-2,5
	ΔE	9,7	8,3	10,6	17	5,6	7,1	15,6	3,4
9	L*	46,8	60,9	35,1	65,9	60,4	83,9	94,4	23,5
	a*	49,3	-35,1	7,4	-12,8	37,4	-6,0	3,3	2,8
	b*	46,2	47,8	-48,6	-39,3	-21,2	75,7	-10,3	5,0
	ΔE	17,1	31,6	26	19,5	42,3	22,1	15,7	8,1

Tabelle 4.2: Vergleich der Standard-CIE-Werte für die Offset-Druckfarben nach ISO 2846-1:1997 mit den Ist-Werten der Zweitausgabe.

für die Druckfarbe Gelb. Drückt man die Sekundärfarbe Orangerot, gleicht sich der Fehler durch die Mischung mit der Druckfarbe Magenta in etwa aus. Wird dagegen ein Laubgrün mit Gelb und Cyan gemischt, kommt der fehlende Anteil der b*-Komponente voll zum tragen und erzeugt eine relativ hohe Farbabweichung.

Die Messungen zeigen aber deutlich, dass die Werte von Medienkeil und Testchart eng genug zusammen liegen und demzufolge nicht vom Einsatz eines ungewollten Farbmanagements ausgegangen werden muss. Dies gilt natürlich nur unter der Annahme, dass der Medienkeil ohne Anpassung mittels Farbmanagement auf den Druckbogen gebracht wird.

	Medienkeil			Testchart			ΔE
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
N	17,12	0,46	0,59	17,98	0,34	0,41	1
C	58,69	-29,77	-45,93	60,31	-29,10	-43,97	3
M	48,46	75,8	-6,43	49,34	74,11	-7,70	2
Y	90,74	-10,14	95,73	90,97	-10,88	88,65	7
O	48,26	66,51	43,76	48,37	65,07	40,36	4
L	50,87	-68,91	25,85	51,77	-65,91	20,36	6
V	26,64	22,77	-44,6	28,54	22,89	-44,27	2

Tabelle 4.3: Messwerte des Medienkeils im Vergleich zu den Feldern auf dem Testchart der Erstaussgabe auf Gerät Nr. 1

	Medienkeil			Testchart			ΔE
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
N	13,86	0,56	0,61	19,90	-1,80	-1,30	7
C	55,46	-28,78	-47,89	57,00	-29,00	-47,00	2
M	47,57	76,97	-5,57	48,80	74,30	-6,70	3
Y	90,16	-9,41	99,56	90,50	-10,00	92,10	8
O	47,43	67,27	45,81	47,70	65,90	42,20	4
L	47,66	-69,75	23,28	48,80	-69,00	16,90	7
V	25,33	20,39	-45,95	27,90	19,20	-46,00	3

Tabelle 4.4: Messwerte des Medienkeils im Vergleich zu den Feldern auf dem Testchart der Zweitaussgabe auf Gerät Nr. 1

Auch der Vergleich von Erstaussgabe und Zweitaussgabe, wie in Tabelle 4.5 zu sehen ist, zeigt eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Druckbedingungen. Alle Werte liegen in einem Toleranzbereich von 5 ΔE und deutlich darunter. Damit ist sichergestellt, dass die Druckbedingungen bei Erstaussgabe und Zweitaussgabe in etwa gleich waren und die Ergebnisse in Bezug auf Druckbedingungen vergleichbar sind. Auch ein Farbmanagement

4. Auswertung der Messdaten

in der Druckvorstufe von Erstaussgabe und Zweitaussgabe ist mit diesen Messwerten als sehr unwahrscheinlich zu beurteilen.

	Erstaussgabe			Zweitaussgabe			ΔE
N	17,98	0,34	0,41	19,91	-1,76	-1,32	3
C	60,31	-29,1	-43,97	57,00	-28,97	-46,66	4
M	49,34	74,11	-7,70	48,84	74,25	-6,73	1
Y	90,97	-10,88	88,65	90,45	-10,39	92,1	4
O	48,37	65,07	40,36	47,72	65,9	42,15	2
L	51,77	-65,91	20,36	48,79	-68,56	16,89	5
V	28,54	22,89	-44,27	27,92	19,21	-45,55	4

Tabelle 4.5: Vergleich von Erstaussgabe und Zweitaussgabe im Offset-Druck mit Gerät Nr. 1

Der Vergleich zwischen Erstaussgabe und Zweitaussgabe war bei allen Ausgaben möglich. Tabelle 4.6 zeigt die Werte wie sie mit Ausgaben von Gerät Nr. 7 gemessen wurden. Hierbei handelt es sich um einen Postscript-fähigen, hochwertigen Laserdrucker für Büroanwendungen. Die Prozessstabilität ist hier nicht ganz so hoch wie im Offset-Druck, bringt aber dennoch gut reproduzierbare Ergebnisse. Die Reproduzierbarkeit von Gelb und Grün zeigt auch bei dieser Ausgabe die höchste Farbabweichung.

	Erstaussgabe			Zweitaussgabe			ΔE
N	23,87	-0,08	-0,37	20,73	0,58	-2,48	4
C	58,22	-17,31	-48,77	53,97	-17,07	-51,89	5
M	49,49	67,01	-8,81	47,12	69,75	-6,35	4
Y	90,38	-14,59	81,87	89,92	-14,1	89,77	8
O	48,04	57,08	42,26	45,64	60,14	44,16	4
L	52,22	-57,73	33,5	46,12	-62,98	29,88	9
V	26,09	21,28	-41,7	21,11	22,53	-40,9	5

Tabelle 4.6: Vergleich von Erstaussgabe und Zweitaussgabe im Laserdruck mit Gerät Nr. 7

Die Messwerte der Primär- und Sekundärfarben des Offset-Druckprozesses werfen die durchaus berechtigte Frage auf, wie es zur Wahl genau dieser Farben kommt. Die Messwerte im Offset-Prozess weichen ja von denen des Laserdruckers deutlich ab. In [3] wird vom Standpunkt der Druckindustrie auf dieses Thema eingegangen. Der Offset Prozess arbeitet mit der *autotypischen Farbmischung*, so dass die Primärfarben, hier Cyan, Magenta und Gelb direkt auf das Papier gebracht werden. Die Sekundärfarben Rot, Grün und Blau entstehen durch Überlagerung der Primärfarben. Alle weiteren Far-

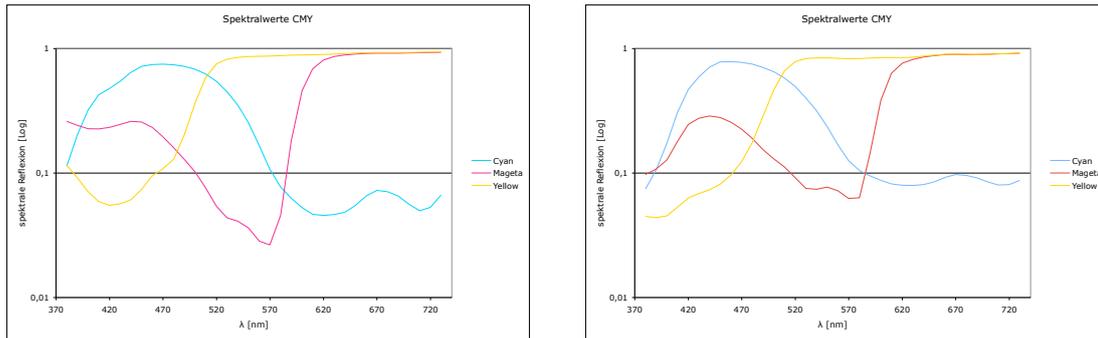


Bild 4.1: Spektrale Reflexion der Primär-Druckfarben im Offset-Druck (links) und Laser-Druck (rechts)

ben entstehen dadurch, dass das gewählte Raster klein genug ist, um benachbarte Farbpunkte der Primär- und Sekundärfarben im Auge des Betrachters additiv verschmelzen zu lassen. Diese Methode der Farbmischung hat weitreichende Folgen, da sich additive und subtraktive Mischprozesse überlagern und jeweils zur selben Mischfarbe führen müssen. Diese Anforderungen sind nach [3] vollständig erfüllt, wenn die Prozessfarben Optimalfarben sind, die bezüglich ihrer Sprungstelle so angepasst wurden, dass sich ein möglichst großer Farbraum aufspannt. In Bild 4.2 sind diese Forderungen und der Zusammenhang zwischen Primär- und Sekundärfarben gut illustriert. In Bild 4.1 sind die Spektralkurven zweier verwendeter Drucker zu sehen. Anhand der Spektralwerte ist zu erkennen, dass sich die Primärfarben nicht optimal verhalten.

Eine Berechnung der Zielfarbwerte für eine Ausgabe wäre unter den oben beschriebenen optimalen Bedingungen sehr einfach durchzuführen. Als Druckfarbe steht Cyan, Magenta und Gelb zur Verfügung. Durch Überdrucken zweier Primärfarben entstehen die Sekundärfarben Orangerot, Laubgrün und Violettblau. Die Primärfarben liegen auf der Verbindungslinie der Sekundärfarben. Der Unbuntpunkt liegt so, dass ein neutrales Grau durch Mischen gleicher Primärfarbenverhältnisse entsteht. In diesem System sind die RGB-Werte mit den CMY-Werten durch die farbmétrisch richtige eins-minus-Beziehung verknüpft und problemlos ineinander umrechenbar. Leider ist in der Druckindustrie diese Bedingung nicht erfüllt und durch gleiche Anteile der Primärfarben entsteht kein Grau bzw. Schwarz. Im Offset-Druck entsteht beispielsweise ein dunkles Grau durch Mischung von: Cyan 70%, Magenta 50% und Gelb 60%.

Dies ist ein sehr großes Problem bei der Farbdarstellung. In grafisch orientierten Programmen, wie z.B. Adobe Photoshop wurde früher die farbmétrisch korrekte eins-minus-Relation zwischen dem RGB-Farbraum und CMY-Farbraum benutzt. Um sich einem bestimmten Kundenkreis, der grafischen Druckindustrie, anzupassen, ist heute die Umrechnung nach den obigen Verhältnissen in der Software realisiert. Dies hat zur

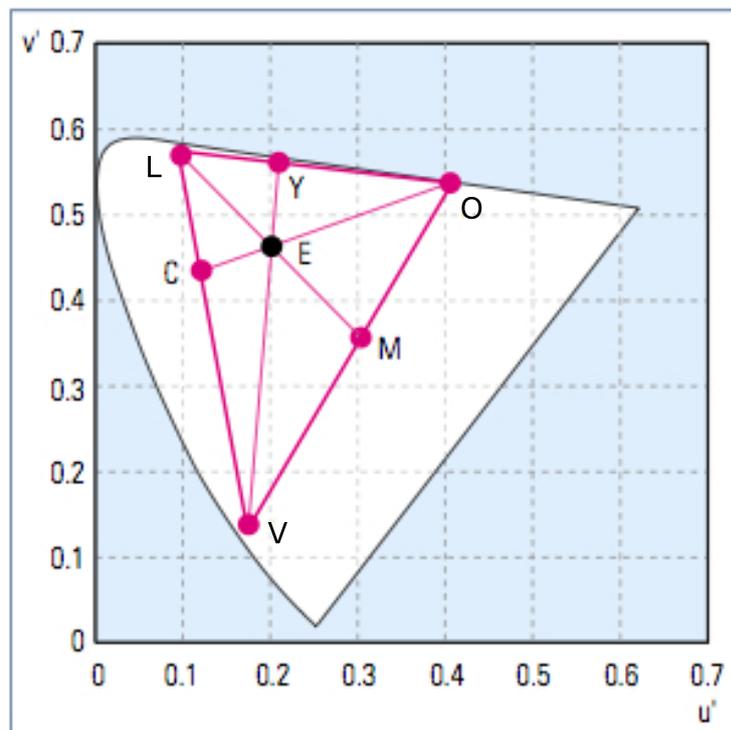


Bild 4.2: Farborte der Grund- und Mischfarben für den Standard Mehrfarbendruck[3]

Folge, dass die Software nicht auf einem wissenschaftlich korrekten Modell basiert, sondern sich einem spezifischen Prozess aus der Industrie anpasst. Dass diese Methode nicht als allgemein anwenderfreundlich gelten kann, versteht sich von selbst. Auch müsste wieder umgedacht werden, wenn sich die Eigenschaften der Druckfarbe ändern. Ein derartiges Vorgehen kann durchaus als innovationshemmend bezeichnet werden. Es kommt nämlich gar nicht zu dem Bestreben, eine möglichst optimale Druckfarbe zu entwickeln, da alle gewachsenen und durch Versuch und Irrtum entstandenen Standards wieder neu definiert werden müssten.

Zusammenfassen können nach [3] folgende Bedingungen für eine optimale Druckfarbe gefordert werden:

- Die Spektrale Remissions- und Absorbtionseigenschaft der Primärfarbe muss möglichst nahe an denen der Optimalfarbe liegen.
- Die Farborte der Primärfarben ist so gewählt, dass sich ein möglichst grosser Farbraum ergibt.
- Gleiche Anteile der Primärfarben sollen im Übereinander- und Nebeneinander-Druck einen Unbunnton ergeben, der möglichst nahe bei Grau liegt.

- Die sich ergebenden Mischfarben erster Ordnung, die Sekundärfarben, müssen im Farbkreis in der Mitte zwischen den Primärfarben liegen.

In der Auswertung der Messergebnisse in der a^*b^* -Ebene wird näher darauf eingegangen, wie sich die Farborte der Primärfarben bei den verschiedenen Ausgabegeräten unterscheiden und welche Auswirkungen dies zur Folge hat.

4.2. Visuelle Effizienz

Im folgenden Abschnitt werden die Messwerte in Bezug auf visuelle Effizienz ausgewertet und diskutiert. Die visuelle Effizienz wird zum einen farbmetrisch, vor allem durch Darstellungsformen im CIELAB-System, beschrieben und zum anderen mittels einer visuellen Beurteilung durch Testpersonen.

Die Visualisierung der Messwerte basiert vor allem auf der Darstellung im Bunttondreieck und durch Eintragung der Messwerte in die a^*b^* -Ebene des CIELAB-Diagramms. Beide Darstellungsformen sind sowohl im CIELAB-, CIELUV- und LABHNU-Farbsystem möglich. Verwendet wurde hauptsächlich die Darstellung im CIELAB-System. Lediglich für die Korrelation der Messwerte mit den Daten der visuellen Beobachter wurden auch Vergleiche von CIELAB abweichenden Farbsystemen gemacht.

Die Darstellung der Messwerte in der a^*b^* -Ebene sowie im Bunttondreieck haben das Problem, dass die Unbuntachse bei Verwendung der realen Messwerte leicht gekippt erscheint. Dadurch ist der Weißpunkt und der Schwarzpunkt in der a^*b^* -Ebene nicht im Zentrum bzw. beide liegen bei der Darstellung im Bunttondreieck nicht auf der L^* -Achse. Im Gegensatz dazu, wird das weiße oder schwarze Farbfeld von einem Beobachter als vollkommen weiß oder schwarz identifiziert. Das Auge des Betrachters adaptiert sich an den leichten Farbstich und akzeptiert dies als Weiß oder Schwarz, da eine Referenz zum Vergleichen fehlt. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, werden die Messwerte meist in das adaptierten CIELAB-System, genannt Lab_a , transformiert. Die Transformation ist eindeutig und alle Werte können jederzeit zurücktransformiert werden.

Die Transformation fordert, dass die a_a^* und b_a^* Komponenten für Weiß und Schwarz gleich Null sein müssen. Die L^* -Werte für die Helligkeit werden nicht transformiert. Für die Anwendung der Transformation wird eine relative Helligkeit l^*_{rel} wie folgt definiert:

$$l^*_{rel} = \frac{L^* - L_N^*}{L_W^* - L_N^*} \quad (4.1)$$

Die Transformationsvorschrift vom CIELAB-Farbsystem zum adaptierten CIELAB-Farbsystem ist definiert als:

$$\begin{aligned}L_a^* &= L^* \\ a_a^* &= a^* - [a_W^* \cdot l_{rel}^* + a_N^* (1 - l_{rel}^*)] \\ b_a^* &= b^* - [b_W^* \cdot l_{rel}^* + b_N^* (1 - l_{rel}^*)]\end{aligned}\tag{4.2}$$

Die Rücktransformation ist definiert als:

$$\begin{aligned}L^* &= L_a^* \\ a^* &= a_a^* + [a_W^* \cdot l_{rel}^* + a_N^* (1 - l_{rel}^*)] \\ b^* &= b_a^* + [b_W^* \cdot l_{rel}^* + b_N^* (1 - l_{rel}^*)]\end{aligned}\tag{4.3}$$

4.2.1. Farbmétrische Beschreibung de Messdaten in der $a_a^*b_a^*$ -Ebene

Das Eintragen der Messwerte in die $a_a^*b_a^*$ -Ebene eines visuell gleichabstándigen Systems, wie z.B. das CIELAB-System, erlaubt eine úbersichtliche Darstellung des Farbumfangs, auch Gamut genannt, eines Ausgabegeráts. Auch der Weg vom Papierweíß zur Volltonfarbe lásst sich gut mittels einer Darstellung in der $a_a^*b_a^*$ -Ebene visualisieren.

Zur Untersuchung der Auswirkung von Farbmanagemeinstellungen auf den Ausgabefarbraum wurde auf Ausgabegerát Nr. 0, welches sehr gut reproduzierbare Ergebnisse liefert, das selbe Testchart zweimal gedruckt. Im ersten Druck waren alle Einstellungen des Farbmanagements ausgeschaltet. Für den zweiten Ausdruck wurden die Farbmanagement-Einstellungen eingeschaltet. Bild 4.3 zeigt die daraus resultierende Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm. Die Darstellung zeigt, dass durch das eingeschaltete Farbmanagement der Farbraum im Gelb und Violettblau deutlich reduziert wird. Im Violettblau fällt auf, dass ein anderer Weg zur Volltonfarbe eingeschlagen wird. Dies ist besonders kritisch, da sich hierdurch andere Mischfarben ergeben, wenn eine Zielfarbe mit Violettblau gemischt wird. Der gleiche Effekt zeigt sich in abgeschwächer

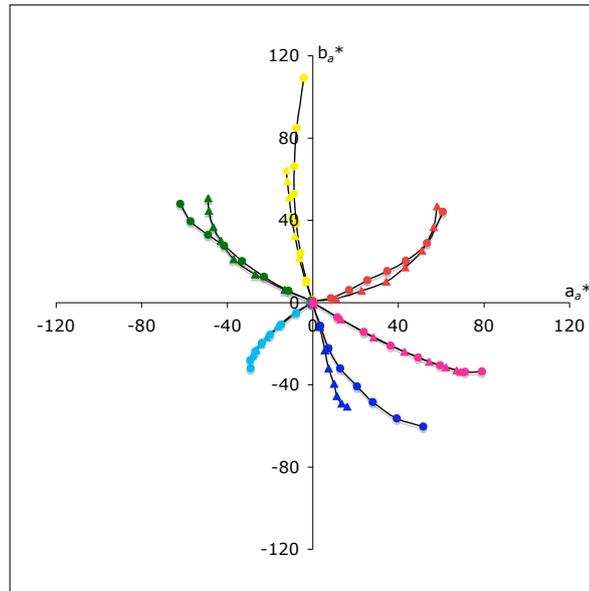


Bild 4.3: Reduzierung des Farbumfangs durch eingeschaltetes Farbmanagement.

● - CMM=off, △ - CMM=on

Form, und nur für hohe Buntwerte C_{ab}^* , im Laubgrün.

Durch die Beschneidung des Farbraums wird erreicht, dass die hohen Buntheitswerte im Gelb, welche der Drucker abweichend vom Computermonitor ausgibt, einfach abgeschnitten werden. Nicht berücksichtigt wird die Transformation von Farbnuancen, welche das Ausgabegerät nicht erreichen kann, da eine Vergrößerung des Farbraums durch Farbmanagementeinstellungen nicht möglich ist. Viel schwerwiegender wirkt sich jedoch die Tatsache aus, dass durch die Einstellungen nicht der gleiche Weg zur Volltonfarbe durchlaufen wird und sich dadurch beteiligte Mischfarben ändern.

Über den sinnvollen Einsatz von Farbmanagementeinstellungen lässt sich sicherlich sehr kontrovers diskutieren. Eine globale Einstellung am Ausgabegerät scheint aber wenig sinnvoll, da kein Informationsaustausch über Art und Herkunft der Daten stattfindet. Lediglich für ein geschlossenes System, beispielsweise der Anschluss einer Digitalkamera direkt an einen Drucker über ein standardisiertes Protokoll, welches Art und Herkunft der Farbwerte genau spezifiziert, kann diese Art der Einstellung sinnvoll verwendet werden. Ob in diesem Fall die Einstellung mit Farbmanagement *An/Aus* richtig bezeichnet ist, kann diskutiert werden.

Unterschiedliche Separationsmechanismen wirken sich zwangsläufig unterschiedlich auf den Farbumfang des Ausgabegerätes aus. Im Bild 4.4 ist dies anhand einer Ausgabe, die im Offset-Druckprozess entstand, dargestellt. Die mit einem Kreis markierte

4. Auswertung der Messdaten

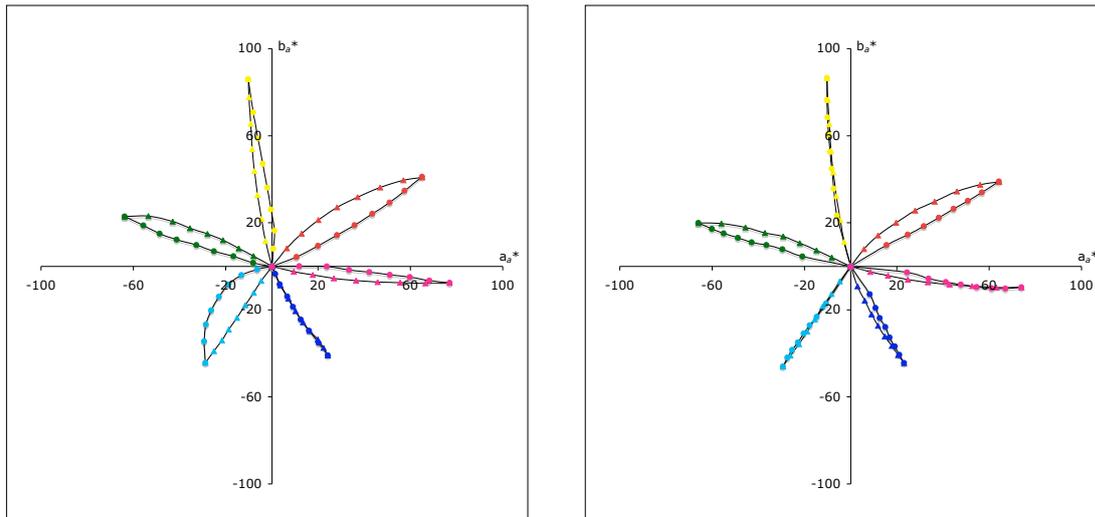


Bild 4.4: Farbortverlauf im CIELAB-System bei Veränderung der Rastertonwerte von Primär- und Sekundärfarben im Offset-Prozess. Links im Bild mittels CMY0*-Separation und rechts mittels CMYn5*-Separation

Linie zeigt die Rastertonwerte von Unbunt-Schwarz zur darzustellenden Volltonfarbe. Die mit einem Dreieck markierte Linie zeigt die Rastertonwerte von Unbunt-Weiß zur darzustellenden Volltonfarbe. An den gemessenen Ausgaben ist deutlich zu erkennen, dass sich durch eine intelligente Separation (rechts im Bild) im Vergleich zur einfachen CMY0*-Separation (links im Bild) die Rastertonwerte deutlich verbessern lassen. Durch einen sehr krummlinigen Verlauf, wie er im Bild rechts bei Schwarz nach Cyan auftritt, kommt es zu Farbverschiebungen, wenn ein dunkles Cyan mit unterschiedlichen Rastertonwerten im Mischungsprozess der Farbe vorhanden ist. Idealerweise sollten die Rastertonwerte auf einer Geraden liegen. Außerdem sollte es keine Rolle spielen, ob die Volltonfarbe von Unbunt-Schwarz oder Unbunt-Weiß angefahren wird. Bezüglich dieser Forderungen zeigt die CMYn5*-Separation eine deutliche Verbesserung.

Um die nach DIN 33872 geforderte, relative Gleichabständigkeit zu erreichen, wurden die Messwerte der Erstaussgabe zur Linearisierung der Zweitaussgabe verwendet. Hierbei wurde ein Linearisierungsalgorithmus verwendet, den Dr. Ing. Jens Witt in seiner Dissertation *"Farbmetrische Methoden zur Herstellung von Prüfvorlagen für Farbkopierer, Farbscanner und Farbmonitore"* entwickelt hat [11]. Untersucht wird, wie die Ausgaben der verschiedenen Ausgabegeräte auf den Linearisierungsalgorithmus reagieren. Bild 4.5 zeigt ein intelligent mittels CMYn5*-Separation separiertes Testchart vor und nach der Linearisierung. Die gemessene Erstaussgabe zeigt schon hier einen sauberen Verlauf der Rastertonwerte zur Volltonfarbe. Der Verlauf zeigt keine signifikante

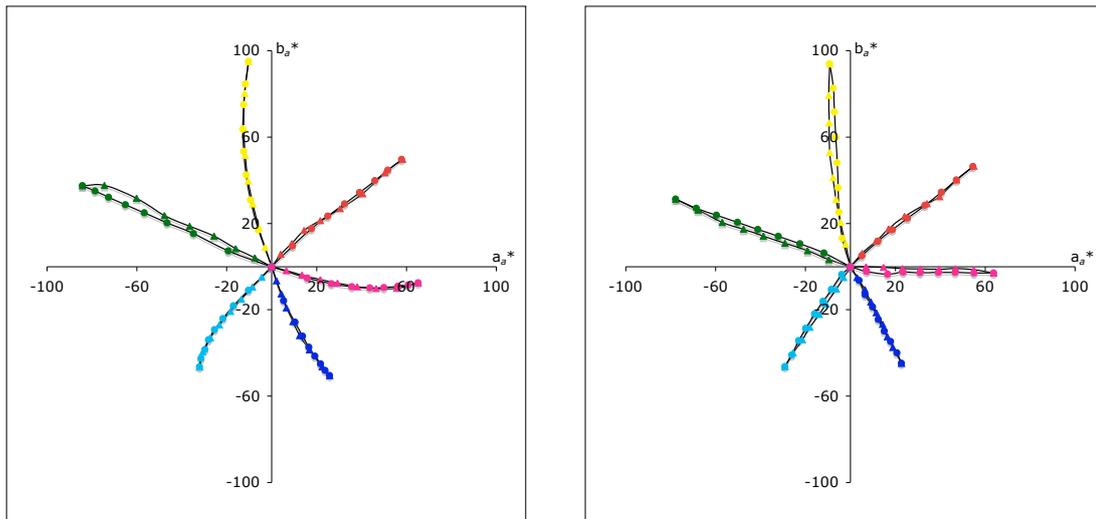


Bild 4.5: Farbortverlauf im CIELAB-System bei Veränderung der Rastertonwerte einer intelligent Separierten Ausgabe vor der Linearisierung (links) und nach der Linearisierung (rechts). Ausgegeben auf Gerät Nr. 4 (Tintenbasierter Proof-Plotter)

Änderungen, ob die Volltonfarbe vom Schwarzpunkt oder vom Weißpunkt angefahren wird. Durch die Linearisierung wird jedoch die Krümmung im Farbortverlauf bei Zunahme der Rastertonwerte weitestgehend behoben. Dieser Aspekt wirkt sich wiederum positiv auf die Mischfarben aus, die aus unterschiedlichen Gradiationen der Primär- und Sekundärfarben gemischt werden.

Das eingangs schon erwähnte Problem, dass verschiedene Druckprozesse verschiedene Primär- und Sekundärfarben verwenden, wurde mittels Darstellung in Bild 4.6 noch einmal deutlich herausgearbeitet. An der Grafik ist sehr schön zu erkennen, dass die Farborte der primären Volltonfarbe deutlich von den beiden Druckprozessen abweicht. Lediglich im Violettblau stimmen die Farben der zwei Druckprozesse weitestgehend überein. Es ist leicht nachzuvollziehen, dass es bei einer Ausgabe der gleichen digitalen Vorlage hier zu unterschiedlichen Ergebnissen in den Mischfarben kommt. In der Anwendung wird dieses zwangsläufig vorhandene Fehlverhalten teilweise durch Farbtransformationen korrigiert. Die Vorgehensweise, ein Fehlverhalten in der Auswirkung und nicht in der Ursache zu korrigieren, fällt in der Farbausgabe häufig auf. Das Bestreben müsste auch hier sein, in allen Prozessen eine Druckfarbe zu finden, deren Eigenschaft optimal an die farbmetrischen Anforderungen angepasst ist.

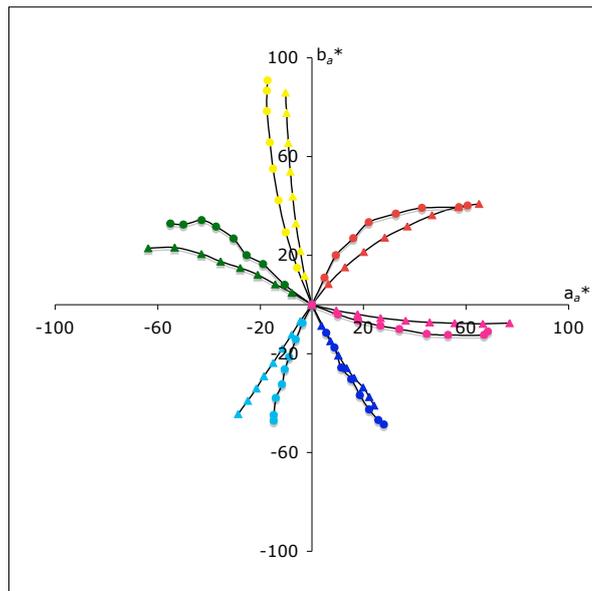


Bild 4.6: Farbtortverlauf im CIELAB-System der Primär und Sekundärfarben zweier verschiedener Druckprozesse: ●-Laserdrucker, △-Offset-Druck

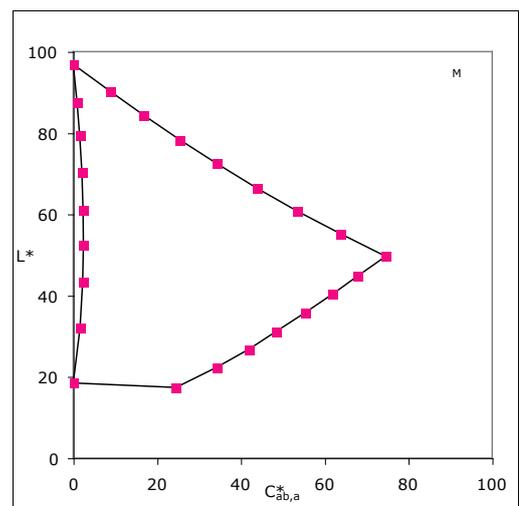
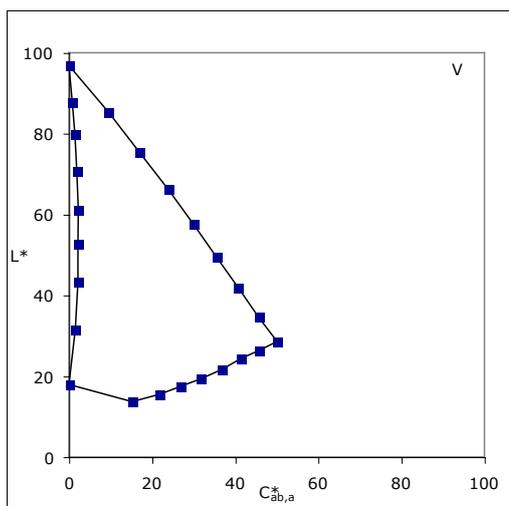
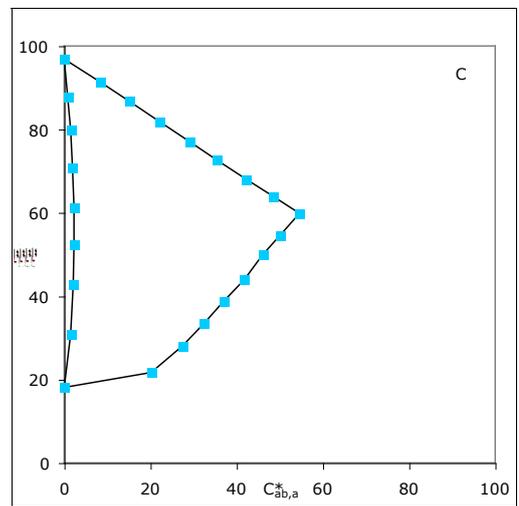
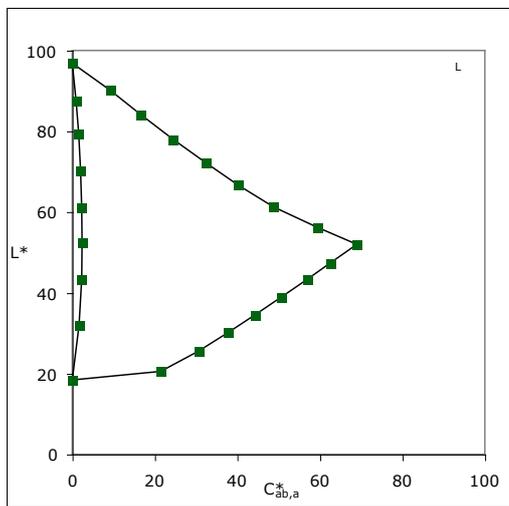
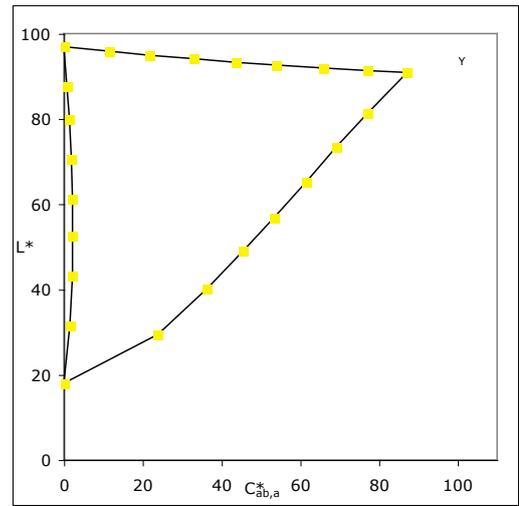
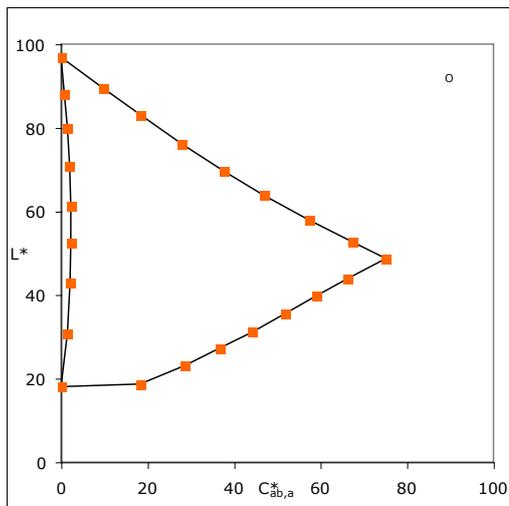
4.2.2. Farbmétrische Beschreibung de Messdaten im Bunttendreieck

Eine sehr gute Darstellungsmöglichkeit, um die Ausprägung einer Farbnuance von der Unbuntachse aus zu analysieren, bietet das Bunttendreieck. In dieser Darstellung wird der Farbkörper an der Unbuntachse aufgetrennt und der Schnitt eines Bunttonwinkels dargestellt. Erforderlich ist auch hier, mit den adaptierten CIELAB-Werten zu rechnen. Für die Darstellung im Bunttendreieck wird auf der Ordinate der Helligkeit L^* aufgetragen. Auf der Abszisse wird die Buntheit C_{ab}^* aufgetragen. Diese berechnet sich nach:

$$C_{ab,a}^* = \sqrt{a_a^{*2} + b_a^{*2}} \quad (4.4)$$

Mit der Darstellung im Bunttendreieck ist beispielsweise die relative, visuelle CIELAB-Gleichabständigkeit sehr gut zu visualisieren. Eine Schwäche der Darstellung im Bunttendreieck sind Farbstiche auf der Unbuntachse. Da die Unbuntachse viele Informationen über die Qualität des Druckprozesses preisgibt, wird dieser Sachverhalt im nächsten Kapitel näher untersucht.

In Bild 4.2.2 sind die Bunttendreiecke der Primärfarben des Offset-Prozesses Cyan, Magenta und Gelb sowie die Sekundärfarben Orangerot, Laubgrün und Violettblau dar-



Bunttdreiecke für die Primär- und Sekundärfarben OLVCMY, gedruckt im Offset-Prozess und ausgewertet im CIELAB-Farbsystem.

4. Auswertung der Messdaten

gestellt. Das Testchart wurde mit einer intelligenten CMYn5*-Separation hergestellt, die Farbwerte aber nicht durch eine vorherige Erstaussgabe linearisiert. Für die Darstellung wurde das visuell gleichabständige CIELAB-System gewählt. Die Ausgabe zeigt schon in der nicht linearisierten Erstaussgabe ein relativ gleichabständiges Verhalten. Auffällig ist die Lage der Volltonfarbe Gelb und Violettblau. Während bei Gelb die Helligkeit der Volltonfarbe fast nicht abnimmt, ist die Helligkeit der Farbe Violettblau sogar kleiner als die Helligkeit von unbuntem Schwarz. Inwieweit diese Darstellung mit dem visuellen Empfinden korreliert oder ein Darstellungsproblem des verwendeten Farbsystems ist, wird in Abschnitt 4.2.6 näher untersucht.

Auffällig in der Darstellung in Bild 4.2.2 ist, dass sich der Weißpunkt nah an seinem idealen Punkt von 100 befindet, während der Schwarzpunkt deutlich von Null abweicht. Analysiert man damit das Verhalten der Separation näher, zeigt sich, dass der Mechanismus von einem idealen Schwarz ausgeht. Daher auch der Knick im letzten Farbsprung zur Unbuntachse. Verlängert man den Weg von der Volltonfarbe mit maximaler Bunttheit zur Grauachse wie in Bild 4.7 links zu sehen, zeigt sich, dass die Tangente bei den Primärfarben jeweils fast durch den Nullpunkt geht. Dass der Schwarzpunkt die Null nicht erreichen kann, ist allerdings nicht ungewöhnlich. Die Transformation von Y nach L^* berücksichtigt nämlich die Tatsache, dass eine Zunahme der Helligkeit nicht linear vom Auge erfasst wird, sondern einem kubikwurzelförmigen Verlauf gleicht. In allgemeiner Form ist der Zusammenhang zwischen physikalischem Reiz und daraus resultierendem Sinneseindruck als Weber-Fechner Gesetz bekannt.

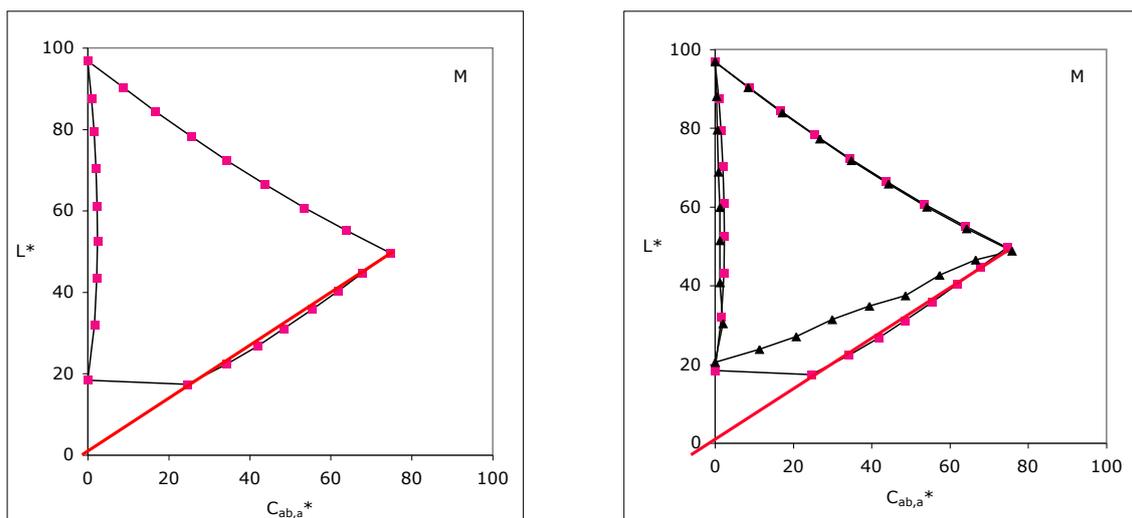


Bild 4.7: Bunttendreieck ausgegeben auf Gerät Nr. 1 für die Offset-Primärfarbe Magenta und Anlegen einer Tangente an die Farbreihe von der Volltonfarbe zum Schwarzpunkt (links). Vergleich zwischen Erstaussgabe und Zweitaussgabe (rechts).

Wird der Linearisierungsalgorithmus auf die Separation angewendet, werden die Farbdaten so korrigiert, dass der Knick zum Schwarzpunkt hin verschwindet. Im Bild 4.7 rechts ist die linearisierte Zweitausgabe im Vergleich zur Erstausgabe zu sehen. In der Grafik ist sehr schön zu erkennen, dass durch die Linearisierung eine Verbindung vom Farbwert mit maximaler Buntheit zum Schwarz- und Weißpunkt gesucht und verbunden wird. Der Preis dafür ist eine geringfügige Verkleinerung des Farbraums in den dunklen Farbtönen.

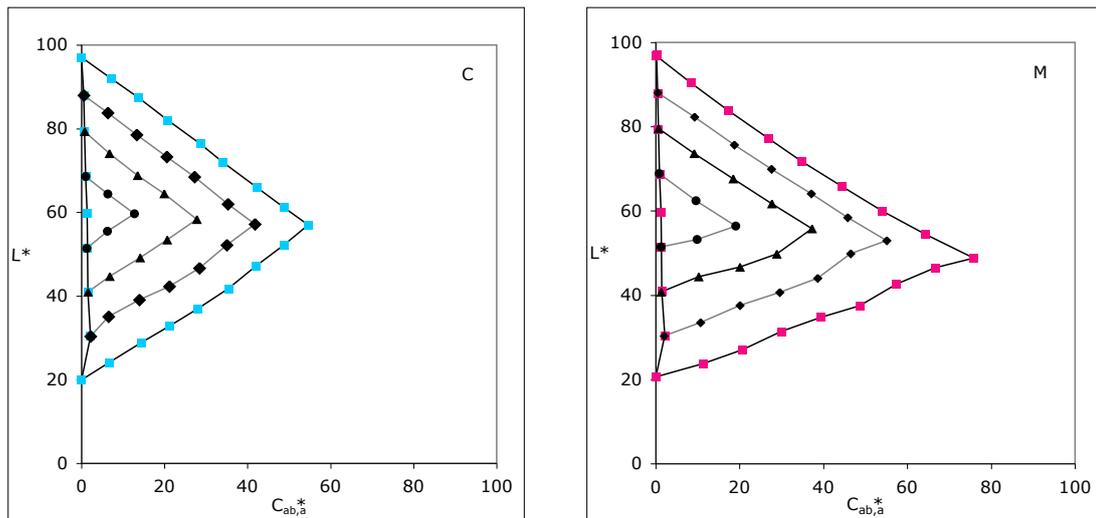


Bild 4.8: Bunttendreieck mit allen gemessenen Zwischenwerten für den Buntton Cyan (links) und Magenta (rechts).

Alle bisher gezeigten Bunttendreiecke zeigen jeweils nur den Rand des Farbkörpers. Dies berechtigt natürlich zu der Frage, ob die Darstellung auch gilt, wenn man Werte weiter innen im Farbkörper betrachtet. In Bild 4.8 wurden alle Messwerte ausgewertet und in das Bunttendreieck für den Buntton Cyan und Magenta eingetragen. Die Messwerte stammen aus einem, im Offset-Druck intelligent separierten, Testchart ohne Linearisierung. Die Auswertung zeigt, dass für den Buntton Cyan symmetrische Dreiecke entstehen, die nach innen einfach nur kleiner skaliert sind. Für den Buntton Magenta zeigt sich eine leichte Komprimierung zu den helleren Farbtönen, so dass die Linien für die verdunkelten Farbreihen Weiß - Magenta noch parallel verlaufen, aber enger zusammenliegen. Die Farbe maximaler Buntheit wird in jeder Farbreihe etwas zum Weißpunkt verschoben. Wertet man die Helligkeitsverschiebung zahlenmäßig aus, stellt man fest, dass im Cyan der Helligkeitswert L^* um zwei CIELAB-Einheiten nach oben verschoben wird. Bei der Auswertung für Magenta ergibt sich eine Helligkeitsverschiebung ΔL^* von sieben CIELAB-Einheiten.

Eine weitere Beobachtung, die mittels Darstellung im Bunttendreieck gut visualisiert

4. Auswertung der Messdaten

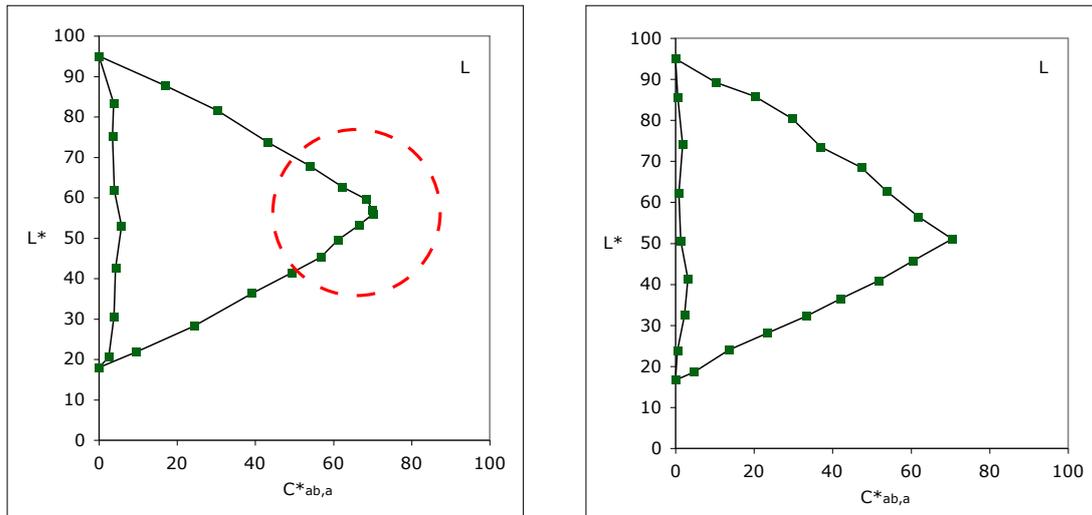


Bild 4.9: Komprimierung der Farbwerte zu höherer Buntheit bei Ausgabe auf einem Büro Laserdruck-System. Links im Bild die nicht linearisierte Erstaussgabe und rechts die linearisierte Zweitaussgabe

werden kann, ist die Komprimierung der Farbabstände zu höherer Buntheit. Dieser Effekt tritt häufig bei Büro- und Consumer-Geräten auf und lässt für den Betrachter die Farben bunter erscheinen. Durch die Verdichtung der Farbwerte zu höherer Buntheit entstehen aber auch Nachteile. So ist es beispielsweise nicht mehr möglich, Farbnuancen mit hoher Buntheit zu unterscheiden. Informationen, die in den Farbwerten gespeichert waren, gehen durch die Ausgabe unwiederbringlich verloren. Auch die Forderung nach einer gleichabständigen Ausgabe, wie sie im Normentwurf DIN 33872 gefordert wird, kann damit nicht erfüllt werden.

Durch die Verschiebung der Farbwerte zur höheren Buntheit ergibt sich auch in Bezug auf die Materialeffizienz ein höherer Verbrauch der bunten Druckfarbe. Dies ist für den Anwender eher ungewollt, da sich die Druckkosten erhöhen. Für den Hersteller kann der höhere Verbrauch an Toner ein Pluspunkt sein, da automatisch mehr Umsatz mit Verbrauchsmaterial erzielt wird.

Die technische Realisierung einer solchen Verstärkung der Bunttonwerte ist einfach im Druckertreiber zu implementieren. Wird beispielsweise jeder Farbwert mit einem Exponent kleiner Eins belegt, bleibt die Null für minimal und die Eins für maximal erhalten. Alle Zwischenwerte transformieren sich in Richtung Bunt. Das folgende Postscript Beispiel soll diesen Sachverhalt verdeutlichen. Mit dem Postscript-Operator `0,5 0 0,5 0 setmykcolor` wird ein mittleres Grün gedruckt. Durch Belegung der Farbwerte mit dem Exponent 0,5 bleiben die Nullwerte erhalten und die Zwischenwerte werden zu 0,7 transformiert. Somit entsteht ein satteres Grün.

4.2.3. Genauere Betrachtung der Unbuntachse

Durch die Art und Weise wie die Grauchse gedruckt wird, können viele Informationen über den Druckprozess gewonnen werden. Jede intelligente Separation benötigt höchstens zwei bunte Druckfarben und Schwarz zur Erzeugung beliebiger Farben. Wird beispielsweise Grau aus drei bunten Druckfarben gedruckt liegt keine intelligente Separation vor. Durch eine Analyse der Graureihen lässt sich somit ermitteln, wie das Ausgabegerät die Farbdefinitionen umsetzt.

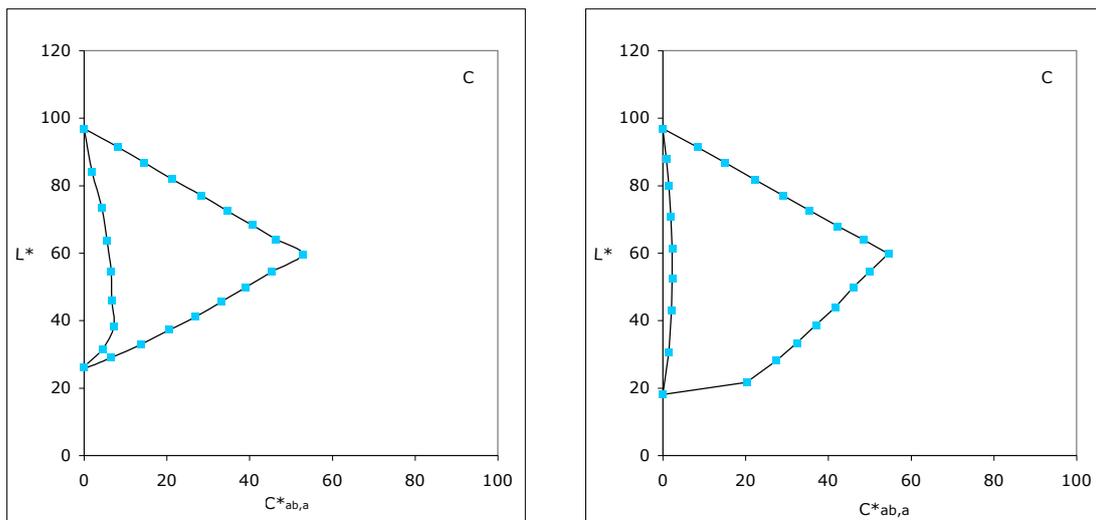


Bild 4.10: Verschiedene Separationen und die Auswirkung auf die Graubalance, dargestellt im Bunttondreieck (CMY0*-Separation links und CMYn5*-Separation rechts) für die Farbe Cyan.

In Bild 4.10 ist ein Bunttondreieck für die Prozessfarbe Cyan aus dem Offset-Druck dargestellt. Das Bunttondreieck links im Bild, entstand aus Messwerten eines in CMY0* separierten Prüfvorlagen. Das rechts im Bild aus den Messdaten eines in CMYn5* separierten Prüfvorlagen. Deutlich ist zu erkennen, dass die intelligente CMYn5*-Separation eine stabilere Grauchse produziert. Die CMY0*-Separation hingegen weist einen deutlichen Farbstich auf. Durch die Darstellungsweise im Bunttondreieck ist unglücklicherweise nicht ersichtlich, zu welchem Farbton der Farbstich verläuft. Es ist lediglich zu erkennen, dass die Farbwerte eine Buntheit verschieden von Null aufweisen.

Werden alle Rastertonwerte, die zur Grauchse beitragen, in die a^*b^* -Ebene des CIELAB-Diagramms eingetragen, ist eine nähere Untersuchung des Farbstiches möglich. In Bild 4.11 wurde dies für zwei Druckprozesse und zwei Separationsmethoden durchgeführt.

Bild 4.11 (unten links) Zeigt einen Verlauf für die Graureihe, wie er zu erwarten ist.

4. Auswertung der Messdaten

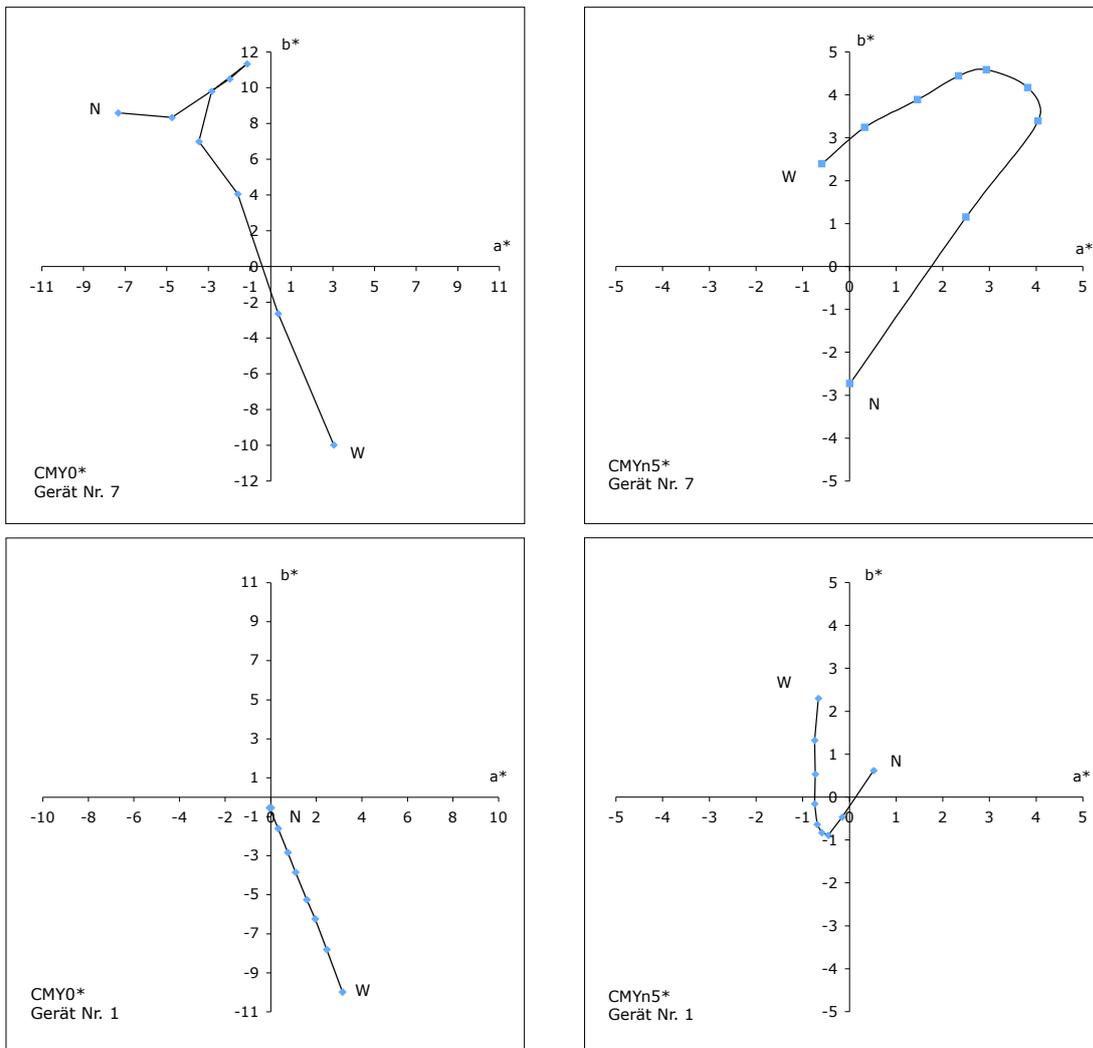


Bild 4.11: Darstellung des Farbstiches der Graureihe in der a^*b^* -Ebene des CIELAB-Systems.

Der erste Farbwert, welcher das weiße Feld der Graureihe repräsentiert, liegt im vierten Quadranten der a^*b^* -Ebene. Daraus ergibt sich ein bläulich bis rötlicher Farbstich für das fluoreszierende weiße Papier. Für die weiteren Rastertonwerte kommt immer mehr schwarze Druckfarbe auf das Papier und deckt den Farbstich des Papiers immer weiter ab. Das Schwarz liegt ideal im Zentrum, hat also keinen Farbstich. Der Verlauf stammt aus einer Ausgabe auf einem Laserdruck-System unter Verwendung einer intelligent separierten Prüfvorlagen. Die Graureihe wurde nur mit schwarzer Druckfarbe, welche optimale Druckeigenschaften besitzt, gedruckt. Die Messwerte im Bild oben links stammen vom selben Drucker, das Testchart wurde aber mittels CMY0* separiert. Während sich der Weißpunkt natürlich nicht ändert, wandert der Schwarzpunkt deutlich aus dem Zentrum der a^*b^* -Ebene. Das gedruckte Schwarz weist nun einen gelb/grün-Farbstich auf. Dass bei Verwendung einer CMY0*-Separation die Chance eines Farbstiches in der Grauchse steigt, verwundert nicht, da jeder Grauwert nun mittels bunter Druckfarbe gedruckt wird.

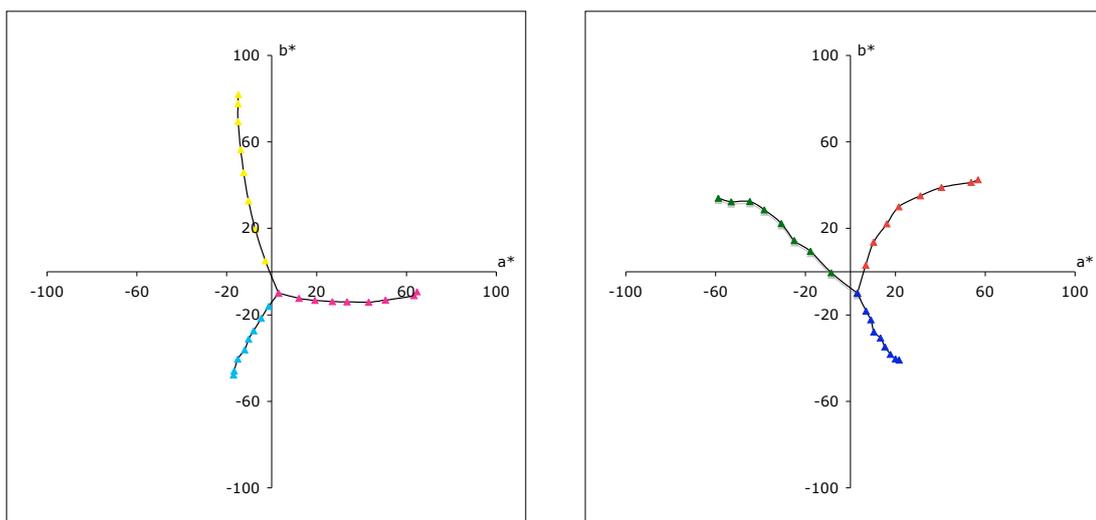


Bild 4.12: Gradation für zunehmende Rastertonwerte der Primär- und Sekundär- Prozessfarben (Laserdrucker Nr. 7)

Bild 4.12 zeigt den Verlauf von Papierweiß zur Volltonfarbe, der einzelnen Primärfarben, des Druckprozesses. Der Verlauf zeigt ein nichtlineares Verhalten, daher ist eine optimale Graubalance mit einer CMY0*-Separation nicht möglich. Deutlich besser fällt die Graubalance im Druck aus, wenn die Grauchse nur mit schwarzer Druckfarbe aufs Papier gebracht wird. Bei einer intelligenten Separation wie CMYn5* ist dies der Fall.

Wird nur die Farbe des Papiers gemessen, ist Vorsicht bei der Interpretation der Messwerte geboten, da das Testchart auf normalem Farbkopierpapier (in diesem Fall Mondi

Color Copy 100 g/m²) ausgedruckt wurde. Handelsübliches Papier ist mit optischen Aufhellern versehen, die das kurzwellige Spektrum (300-400nm) zum langwelligen (330-240nm) hin transformieren. Für die Offset-Ausgabe wurde ein spezielles Papier der Fa. Scheufelen verwendet, welches ohne optische Aufheller produziert wird. Durch die Verwendung dieser Papiersorte, weicht der Weißpunkt in Bild 4.11 rechts (Offset Druck mit Papier ohne optische Aufheller) deutlich vom Weißpunkt links (Laserdruck mit Papier, die optische Aufheller enthalten) ab.

Die a*b*-Werte der Graureihe, gedruckt im Offset-Prozess (Bild 4.11 rechts), zeigt in beiden Separationen eine etwas merkwürdige Form. In der CMY0*-Separation macht der Farbstich einen Bogen vom Weißpunkt über ein gelbliches Rot zu einem bläulichen Schwarz. Wie oben schon gezeigt, ist ein Farbstich für die CMY0* separierte Graureihe erst einmal nicht ungewöhnlich. Der Verlauf kann in dieser Form durch die autotypische Farbmischung zustande kommen. Im Weißpunkt ist nur der Farbstich des Papiers vorhanden. Mit steigender Gradation überlagern sich immer mehr Primärfarben zu Sekundärfarben und verursachen einen anderen Buntton des Farbstichs. Es gleichen sich sozusagen zwei Prozesse zu einem Gleichgewicht hin aus und bilden damit einen bogenförmigen Verlauf in der a*b*-Ebene.

Der Kurvenverlauf der Graureihe, gedruckt im Offset-Druck, die theoretisch nur aus schwarzer Druckfarbe besteht, ist in Bild 4.11 unten rechts zu sehen. Da bei dieser Ausgabe nur schwarze Druckfarbe verwendet werden sollte, ist der Knick in den letzten zwei Rastertonwerten nur schwer zu interpretieren. Um der Ursache näher zu kommen, wurden die Spektralwerte der Graureihe direkt untersucht.

Für eine ideale schwarze Druckfarbe sollte das Spektrum horizontal verlaufen, da alle Wellenlängen gleichwertig absorbiert werden. Das Spektrum in Bild 4.13 oben zeigt näherungsweise diesen optimalen Verlauf. Die ersten zwei bis drei Reflexionskurven zeigen eine schwächere Absorption im Gelben und daher einen Farbstich nach Violett-blau. N100 steht in der Grafik für 100% Schwarz, der Zahlenwert gibt also die Gradation nach Schwarz an.

Von 380nm bis 470nm ist sehr schön der Effekt zu sehen, der durch optische Aufheller im Papier entsteht. Im kurzwelligen Spektralbereich wird Energie entzogen und zu einem Maximum bei 430nm transformiert. Daher ergibt sich für 430nm eine spektrale Reflexion größer Eins. Durch die Reflexion, die scheinbar größer als 100% ist, wirkt das Papier für den Betrachter viel bläulicher und zugleich heller und weißer.

Das in Bild 4.11 unten rechts zu sehende Verhalten der Graureihe, ausgegeben im Offset-Druck, ist anhand farbmischer Darstellungsmethoden nur schwer zu erklären. Daher wurde für die Graureihe, die nur mit schwarzer Druckfarbe gedruckt wurde,

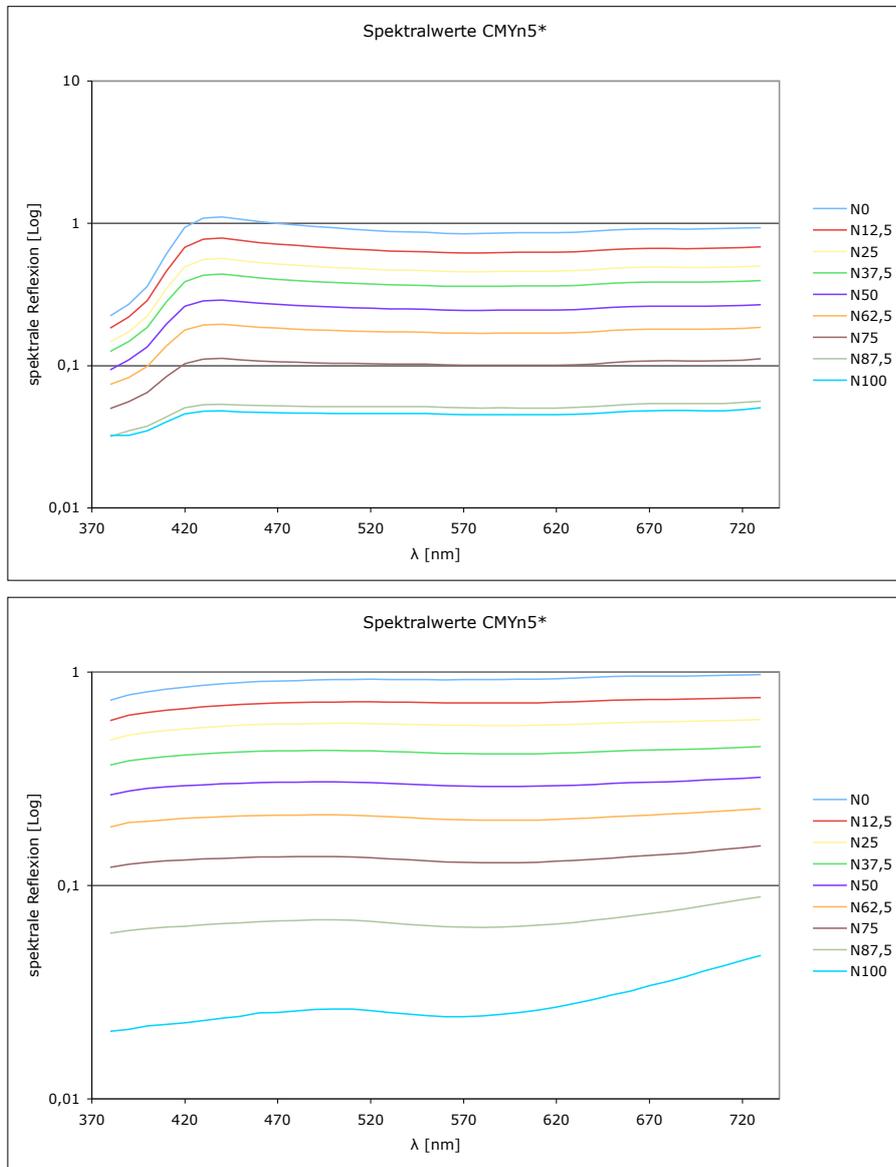


Bild 4.13: Spektralwerte der Graureihe (Laser-Druck oben und Offset-Druck unten).

die Spektralwerte aufgezeichnet und in Bild 4.13 unten dargestellt. Am Spektrum lässt sich erkennen, dass das Papier etwas blau absorbiert und daher die Papierfarbe für den Betrachter leicht gelblich erscheint. Das reine Schwarz (N100) hat eine deutlich höhere Reflexion im rötlichen Spektralbereich. Das Gleichgewicht liegt ungefähr in der Mitte bei 50% Schwärzung. Somit arbeiten zwei Prozesse gegeneinander, der gelbliche Farbstich des Papiers und der rötliche Farbstich der schwarzen Druckfarbe. Bei einer Gradation von etwa 90% gleichen sich die zwei Prozesse aus und es entsteht ein Unbuntwert, der nahe am Zentrum der a^*b^* -Ebene liegt (vgl. Bild 4.11 unten links).

4.2.4. Farbabstände im Soll/Ist-Vergleich

Eine mögliche Methode, festzustellen, in wie weit sich der Linearisierungsalgorithmus auf die Farbe des Druckprozesses auswirkt, ist der Vergleich zwischen den gemessenen CIELAB-Werten aus der Ausgabe und den angestrebten CIELAB-Werten. Zur Ermittlung der angestrebten CIELAB-Werte wird je eine Verbindung vom Weiß- und Schwarzpunkt zur Maximalfarbe der Messwerte gezogen. Diese werden im CIELAB-Farbraum gleichabständig aufgeteilt. Damit entstehen die folgenden drei Farbreihen:

- Weiß zur Maximalfarbe
- Schwarz zur Maximalfarbe
- Schwarz zu Weiß

Jede dieser drei Farbreihen bildet einen Schenkel des Bunttendreiecks. Werden im folgenden mittlere Farbabstände einer Farbe angegeben beziehen sich diese auf das vollständige Bunttendreieck, also alle drei Farbreihen. Mathematisch besteht zwischen den Farbfeldern der folgende lineare Zusammenhang:

$$F_Z = F_A + x(F_E - F_A) \quad (4.5)$$

Dabei steht F_Z für die Farbmaßzahl der Zielfarbe, hier L^* , a^* und b^* . F_A steht für die Farbe am Anfang der Reihe und F_E für die Farbe am Ende der Reihe. Das x steht für den jeweiligen Anteil des Farbfeldes. In dieser Arbeit waren alle Farbreihen 9-stufig, so dass sich ein x von 0.000, 0.125, 0.25 bis 0.875, 1.000 ergibt.

Im Bild 4.14 ist die mittlere Farbabweichung in ΔE zwischen Erstaussgabe und linearisierter Zweitaussgabe zu sehen. In beiden Druckprozessen konnte in der Zweitaussgabe jeweils eine Farbreihe erzeugt werden, deren Farbfelder näher am angestrebten CIE-

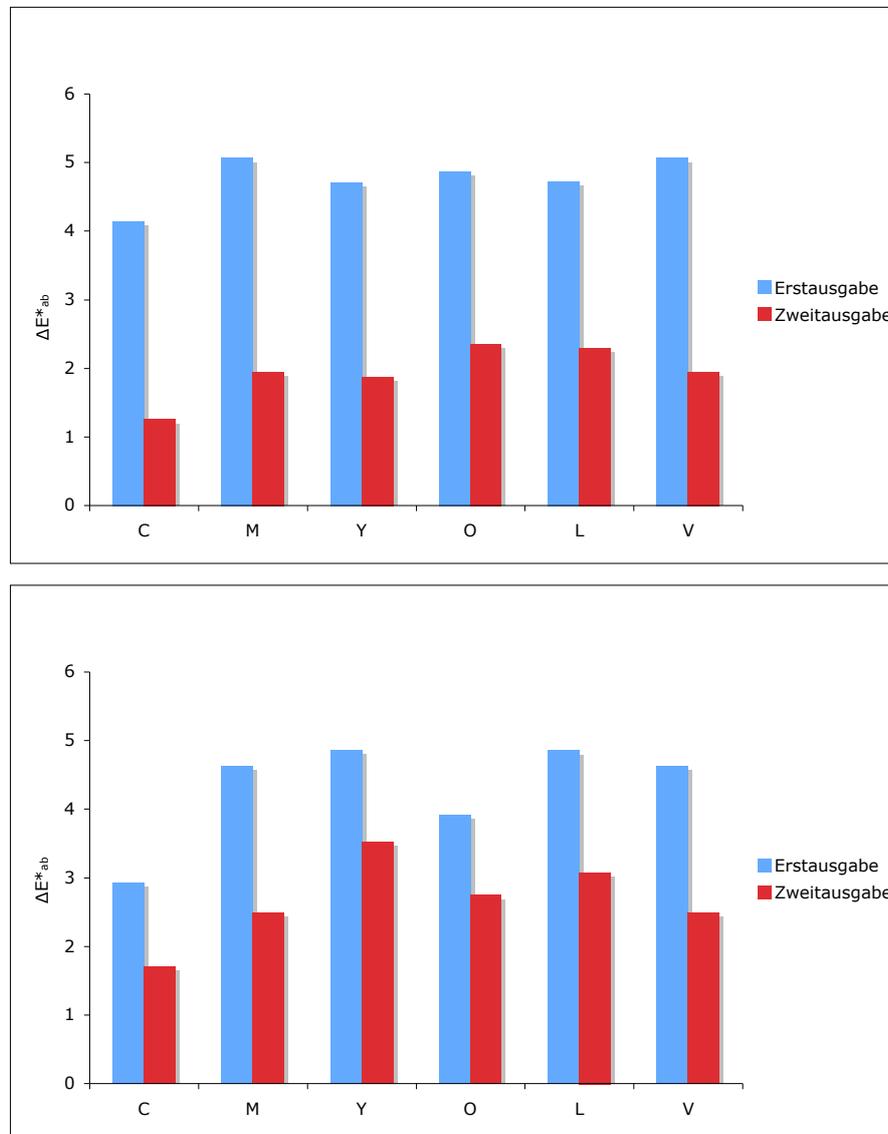


Bild 4.14: Mittlere Farbabweichung bei Erstausgabe und CMYn5*-Zweitausgabe von den theoretischen Soll-Werten zu den gemessenen Ist-Werten im CIELAB Farbsystem, ausgegeben auf zwei verschiedenen Offset Druckmaschinen (Nr. 1 oben und Nr. 2 unten).

LAB Wert liegen. Während im ersten Druckprozess die Werte im statistischen Mittel um das zwei bis dreifache verbessert werden konnten, fällt im zweiten Druckprozess die Verbesserung eher gering aus. In der Auswertung hat sich gezeigt, dass im ersten Offset-Druck (links im Bild) die Farbwerte wie in der Vorgabe gedruckt wurden, während im zweiten Offset-Druck (rechts im Bild) mit einer Korrekturkurve für den Tonwertzuwachs gearbeitet wurde. Die Auswertung der Messdaten kann so interpretiert werden, dass die Linearisierung im ersten Prozess den Tonwertzuwachs erkennt und diesen korrigiert. Der Linearisierungsalgorithmus hatte dadurch im ersten Druckprozess mehr Spielraum zur Verbesserung und daher auch bessere Werte in der Auswertung.

In Bild 4.15 sind die Abweichungen von den Idealwerten im CIELAB-Farbsystem für einen tintenbasierten Proof-Drucker (Ausgabegerät Nr. 4) und einem hochwertigen Büro-Laserdrucker (Ausgabegerät Nr. 7) aufgetragen. Auch bei diesen Geräten zeigt sich eine deutliche Annäherung an die Idealwerte für die linearisierte Zweitausgabe. In der Summe konnten die Farbabstände durch die Linearisierung um den Faktor zwei bis drei verbessert werden.

4.2.5. Beurteilung der farbmétrisch beschriebenen Gleichmäßigkeit g^*

Eine weitere farbmétrische Beschreibung, mit der sich die Güte einer Ausgabe beurteilen lässt, ist die farbmétrische Gleichmäßigkeit g^* . Die Gleichmäßigkeit ist definiert als:

$$g^* = \frac{\text{Kleinsten Abstand}}{\text{groesster Abstand}} * 100 \quad (4.6)$$

Ist der Abstand aller 9 Farben einer Reihe gleich, die Reihe also vollkommen gleichmäßig, ist $g^*=100$. Sind zwei Farben der Reihe identisch, es ist also kein Unterschied zwischen zwei benachbarten Feldern zu erkennen, ist die Gleichmäßigkeit $g^*=0$. Wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, eignet sich die Gleichmäßigkeit gut zum Vergleich farbmétrischer Daten mit denen, eines visuellen Beobachters.

In der Tabelle 4.7 ist die mittlere Gleichmäßigkeit für je zwei Offset- und zwei Tintendruck-Prozesse festgehalten. Die linearisierte Zweitausgabe zeigt hier in allen Ausgaben eine verbesserte Gleichmäßigkeit in der Ausgabe. Die einfache CMY0*-Separation zeigt ohne Linearisierung eine bessere Gleichmäßigkeit in den Bunttönen als eine intelligente separierte Ausgabe. Dies wird allerdings durch einen deutlich höheren Materialverbrauch an Druckfarbe erkauft. Interessant ist auch die Tatsache, dass die CMYn4*-

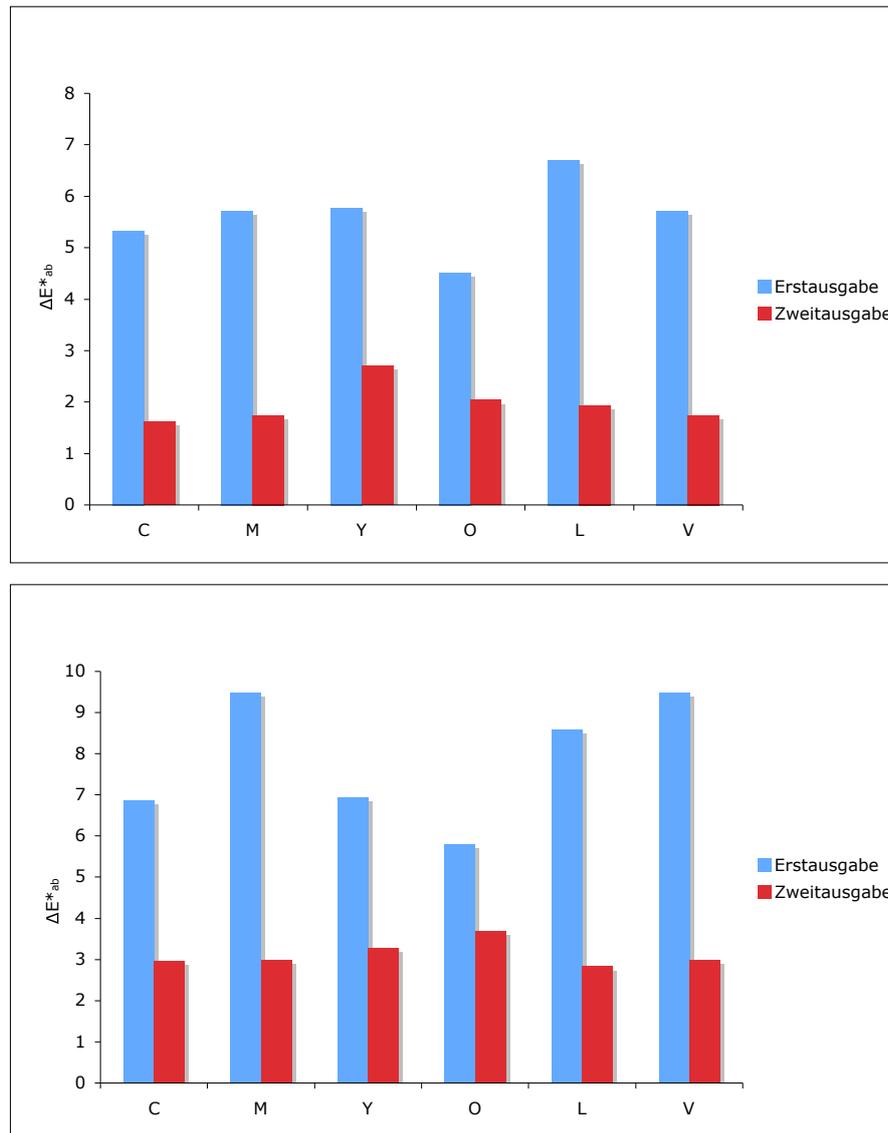


Bild 4.15: Mittlere Farbabweichung bei Erstausgabe und CMYn5*-Zweitausgabe von den theoretischen Soll-Werten zu den gemessenen Ist-Werten im CIELAB Farbsystem. Die Messwerte, oben im Bild, stammen von einer Ausgabe, die auf dem Proof-Drucker Nr. 4 ausgegeben wurde. Unten im Bild sind die Messwerte einer Ausgabe, die auf dem Laserdrucksystem Nr. 7 ausgegeben wurde.

Gerät Nr.	CMY0*	CMYn4*	CMYn5*	CMYn5* <i>linearisiert</i>
1	63	62	55	76
2	62	62	55	76
4	66	50	49	65
5	58	49	40	69

Tabelle 4.7: Mittlere Gleichmäßigkeit g^* für verschiedene Ausgabegeräte und Separationsmethoden

4. Auswertung der Messdaten

Separation durchaus gute Werte in der farbmetrischen Beurteilung liefert und dabei deutlich Druckfarbe einspart. Der subjektive Farbeindruck einer CMYn4*-separierten Ausgabe wirkt auf den Betrachter allerdings etwas *fad*. Wichtige Eigenschaften wie die Unterscheidbarkeit von Farbnuancen sind allerdings mit dieser Technik durchaus gewährleistet. Es geht also nur wenig bis keine Information durch die Ausgabe verloren.

Gerät Nr.	OLV*	OLV* (lin)	CMY0*	CMY0* (lin)	CMYn5*	CMYn5* (lin)
6	44	59	49	69	48	36
7	22	57	29	58	33	60

Tabelle 4.8: Mittlere Gleichmäßigkeit g^* für vier Ausgabegeräte und Separationsmethoden

Die Gleichmäßigkeit einer Farbreihe kann auch mit anderen Farbsystemen als dem CIELAB-System berechnet werden. Durch die unterschiedlichen Transformationen, die zum Farbkörper des Zielsystems führen, unterscheiden sich auch die Werte für die farbmetrische Gleichmäßigkeit g^* . So verwendet das LABHNU-System beispielsweise eine andere Transformation im Gelb, so dass die Buntheit hier reduziert ist.

4.2.6. Korrelation der farbmetrisch und visuell ermittelten Daten

In den obigen Kapiteln wurden die verschiedenen Ausgaben mit Hilfe farbmetrischer Beschreibungen analysiert. Es wurde jeweils davon ausgegangen, dass eine geometrische Gleichabständigkeit in der farbmetrischen Beschreibung auch eine visuelle Gleichabständigkeit der Ausgabe zur Folge hat. Inwieweit die Messdaten wirklich mit einer visuellen Beobachtung korrelieren, wird im folgenden Abschnitt untersucht. Hierfür wurde eine linearisierte Zweitausgabe eines intelligent separierten Prüfvorlagen auf einem Offset- und einem Laser-Drucker verwendet. Untersucht wird jeweils die Gleichmäßigkeit g^* der Farbreihe. In Tabelle 4.9 und 4.10 ist die mittlere farbmetrische Gleichmäßigkeit jeweils in unterschiedlichen Farbsystemen berechnet und dargestellt.

Ein erster Vergleich von farbmetrischer Beschreibung und visueller Beobachtung mag zu der Erkenntnis verleiten, dass nur wenig bis keine Korrelation ableitbar ist. So wurde beispielsweise für die Laserdruck-Ausgaben in nur 33 von 130 Fällen überhaupt das richtige Farbfeld mit maximalem oder minimalem Farbabstand richtig identifiziert. Bei den Offset-Ausgaben war die Ausbeute mit 19 von 130 richtig erkannten Feldern

Farbreihe	g_{LAB}^*	g_{HNU}^*	g_{LUV}^*	g_{00}^*
Weiß - Orangerot	78	82	66	61
Orangerot - Schwarz	73	74	72	25
Weiß - Cyan	70	70	65	51
Cyan - Schwarz	83	84	68	68
Weiß - Gelb	66	65	40	27
Gelb - Schwarz	84	79	79	46
Weiß - Violettblau	76	78	57	72
Violettblau - Schwarz	60	60	65	21
Weiß - Laubgrün	79	82	76	47
Laubgrün - Schwarz	80	82	74	40
Weiß - Magenta	75	72	64	39
Magenta - Schwarz	81	84	73	24
Schwarz - Weiß	78	78	78	52

Tabelle 4.9: Farbmtrische Kennzeichnung der mittlere Gleichmäßigkeit g^* in vier Farbräumen. Ausgegeben im Offset-Druck auf Gerät Nr. 1.

Farbreihe	g_{LAB}^*	g_{HNU}^*	g_{LUV}^*	g_{00}^*
Weiß - Orangerot	61	55	53	33
Orangerot - Schwarz	67	71	50	34
Weiß - Cyan	61	62	54	60
Cyan - Schwarz	72	71	56	62
Weiß - Gelb	55	41	26	14
Gelb - Schwarz	64	69	67	49
Weiß - Violettblau	49	50	43	59
Violettblau - Schwarz	66	67	56	36
Weiß - Laubgrün	55	49	33	27
Laubgrün - Schwarz	65	66	70	30
Weiß - Magenta	60	63	63	37
Magenta - Schwarz	60	58	49	31
Schwarz - Weiß	59	59	58	61

Tabelle 4.10: Mittlere Gleichmäßigkeit g^* der Farbreihen, die mit einem Laserdrucker Nr. 4 ausgegeben wurden, dargestellt in verschiedenen farbmtrischen Beschreibungen.

4. Auswertung der Messdaten

noch geringer. Eine mögliche Ursache der schlechten Korrelation könnte darin zu suchen sein, dass der Betrachtungswinkel aufgrund der kleinen Messfelder nur $0,8^\circ$ beträgt. Das Farbmimetrische System aber von einem Betrachtungswinkel von 2° ausgeht. Aufgrund der begrenzten Fläche und Druckmöglichkeiten im Offset Prozess war eine Vergrößerung der Messfelder allerdings nicht möglich.

Doch lassen sich auch aus diesen Ergebnissen gewisse Aussagen bezüglich der Farbkorrelation treffen. Die visuellen Ergebnisse zeigen, dass die Farbsysteme für die Reihen von Gelb zu Weiß und Violettblau zu Schwarz ein großes Problem aufweisen. So konnte eigentlich jede Testperson in der Farbreihe von Violettblau zu Schwarz einen Farbunterschied zum nächsten Feld nicht mehr differenzieren und stellte damit eine Gleichmäßigkeit von Null in der Farbreihe fest. In der farbmimetrischen Beschreibung schneidet aber diese Farbreihe mit einer Gleichmäßigkeit von 60 bis 66 nicht besonders schlecht ab. Ähnliche Ergebnisse erhält man bei der Beurteilung der Farbreihe von Weiß nach Gelb. Benutzt man zur Analyse des Fehlers die Farbdefinition nach DIN 5033, nämlich *die Möglichkeit, zwei Felder nicht aufgrund von deren Struktur, sondern nur durch die Farbe zu unterscheiden*, kommt man zu dem Ergebnis, dass in den farbmimetrischen Beschreibungen der Farbe Gelb und Violettblau zu viel Raum gegeben wird, und zwar der Farbe Gelb nach Weiß und Violettblau nach Schwarz. Die Tatsache, dass (Maximal)-Gelb bei sehr hohen Helligkeitswerten und (Maximal)-Violettblau bei sehr niedrigen Helligkeitswerten liegen verkürzt zwar die Länge des Schenkels im Buntondreieck, allerdings scheint diese Verkürzung nicht ausreichend zu sein. Das Farbsystem LABHNU geht hier noch einen Schritt weiter und nähert sich den visuellen Ergebnissen dadurch etwas an (Siehe Bild 4.16).

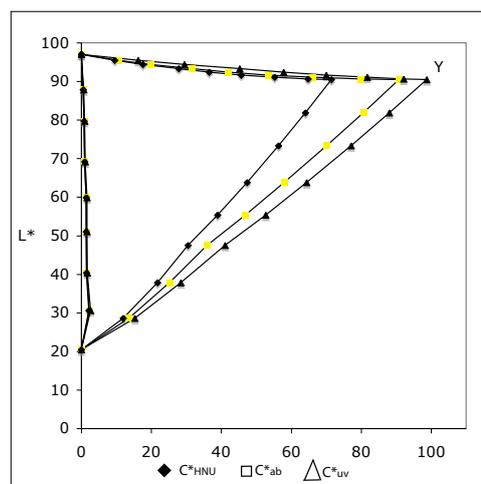


Bild 4.16: Buntondreieck für Gelb in LABHNU, CIELAB und CIELUV

Die Bewertung des Farbabstandes mittels CIEDE2000-Berechnung brachte in dieser Untersuchung durchgehend die schlechtesten Ergebnisse. Dies ist auch nicht weiter verwunderlich, da der CIELAB-Farbabstand der einzelnen Felder bei etwa 10 CIELAB-Einheiten lag. Die Farbabstandsformel nach CIEDE2000 wird nur für kleine Farbabstände im Bereich von 0 bis 5 CIELAB-Einheiten empfohlen. Eine Formel für kleine Farbabstände zu optimieren, ist in der Anwendung durchaus praktisch, da Farbabstandsmessungen meist durchgeführt werden, um eine Abweichung von einer Soll-Farbe zu einer Ist-Farbe zu ermitteln. In einer praxisnahen Messung werden diese eher um den Messwerte schwanken und eine angepasste Formel für kleine Farbabstände ist von Vorteil. Für die Beurteilung von 9-Stufigen Farbreihen, bei denen die Farbabstände von einer Farbe zur nächsten groß sind (anderenfalls wäre ja kein Unterschied von einem Feld zum nächsten zu erkennen) ist die farbmtrische Beschreibung und Auswertung mittels CIEDE2000-Formel nicht empfehlenswert.

	g_{vis}^*	g_{Lab}^*	$\Delta g_{vis/Lab}^*$	g_{HNU}^*	$\Delta g_{vis/HNU}^*$	g_{00}^*	$\Delta g_{vis/00}^*$
Weiß - Orangerot	84	61	23	55	29	33	51
Orangerot - Schwarz	86	67	19	71	15	34	52
Weiß - Cyan	92	61	31	62	30	60	32
Cyan - Schwarz	74	72	2	71	3	62	12
Weiß - Gelb	29	55	-26	41	-12	14	15
Gelb - Schwarz	84	64	20	69	15	49	35
Weiß - Violettblau	79	49	30	50	29	59	20
Violettblau - Schwarz	8	66	-58	67	-59	36	-28
Weiß - Laubgrün	79	55	24	49	30	27	52
Laubgrün - Schwarz	78	65	13	66	12	30	48
Weiß - Magenta	89	60	28	63	26	37	52
Magenta - Schwarz	76	60	16	58	18	31	45
Schwarz - Weiß	84	59	25	59	25	61	23

Tabelle 4.11: Vergleich zwischen visueller Beschreibung und farbmtrischer Kennzeichnung mittels Gleichmässigkeit g^* für die Farbreihen ausgegeben mit Laserdrucker Nr. 7

Ein weiteres Problem bei dem Vergleich von Messwerten mit visuell ermittelten Werten sind Mess- und Rundungs-Fehler. Durch Mess- und Rundungs-Fehler kommt ein g^* von Null oder 100 in einer farbmtrischen Beschreibung nie vor. In erster Näherung könnte man vermuten, dass ein Schwellwert bestimmt werden kann, ab dem der Betrachter die Ausgabe als vollkommen gleichmäßig ($g^*=100$) oder zwei Felder verschmelzen ($g^*=0$) ansieht. In der Auswertung konnte diese These nicht bestätigt werden. So wird bei der visuellen Beurteilung die Farbreihe Weiß-Cyan und Weiß-Magenta

4. Auswertung der Messdaten

	g_{vis}^*	g_{Lab}^*	$\Delta g_{vis/Lab}^*$	g_{HNU}^*	$\Delta g_{vis/HNU}^*$	g_{00}^*	$\Delta g_{vis/00}^*$
Weiß - Orangerot	89	78	11	82	7	61	28
Orangerot - Schwarz	81	73	8	74	7	25	56
Weiß - Cyan	91	70	22	70	21	51	41
Cyan - Schwarz	73	83	-10	84	-11	68	5
Weiß - Gelb	15	66	-51	79	-64	27	-12
Gelb - Schwarz	73	84	-11	79	-6	46	27
Weiß - Violettblau	83	76	7	78	5	72	12
Violettblau - Schwarz	14	60	-46	60	-46	21	-7
Weiß - Laubgrün	76	79	-3	82	-6	47	28
Laubgrün - Schwarz	64	80	-16	82	-18	40	23
Weiß - Magenta	83	75	8	72	11	39	45
Magenta - Schwarz	75	81	-6	84	-9	24	51
Schwarz - Weiß	100	78	22	78	22	52	48

Tabelle 4.12: Offset

von den Testpersonen meist als völlig gleichmäßig bewertet. In der farbmtrischen Beschreibung fallen die zwei Farbreihen überhaupt nicht durch eine hohe Gleichmäßigkeit auf.

Ein weiteres Problem bei der Korrelation von visuellen und farbmtrischen Daten ist die Art der Bewertung. So fällt es der Testperson meist sehr schwer, den Abstand einzuordnen und vor allem einen Zahlenwert zuzuordnen. Während die Aussage, ob ein Abstand erkennbar ist oder nicht von allen Testperson als einfach empfunden wird, ist die zahlenmäßige Einordnung für große Farbreihen mit neun Feldern als zu schwierig einzustufen. Der Sehapparat des Menschen ist darauf nicht trainiert. Daher ist es empfehlenswert für die visuelle Beurteilung mit Ja/Nein-Kriterien zu arbeiten, wie es beispielsweise im Normentwurf DIN 33872 für die farbmtrische Bewertung von Ausgabegeräten gemacht wird.

Aus den Ergebnissen der visuellen Beurteilung beider Ausgaben kann geschlossen werden, dass ein Betrachter die Zweitausgaben als gleichmäßig beurteilt und Farbsprünge, die sich in der farbmtrischen Beschreibung ergeben, nicht zuverlässig erkannt werden können. So ist beispielsweise in der Farbreihe Weiß-Laubgrün in der farbmtrischen Beschreibung zwischen dem weißen Feld und der ersten Stufe Laubgrün ein relativ großer Sprung von 0,18 (bei auf Eins normierter 9-stufiger Farbreihe), während alle weiteren Felder einen relativen Sprung von etwa 0,12 aufweisen und damit nahe am Idealwert von 0,125 liegen. Dieser, in der farbmtrischen Beschreibung signifikante Farbsprung, wurde aber von keiner Testperson visuell an dieser Stelle wahrgenom-

men.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die beurteilte Zweitausgabe jeweils gleichmäßig war und daher visuell keine signifikanten Farbsprünge zu erkennen waren. Lediglich die Farbreihe Weiß-Gelb und Violettblau-Schwarz weichen von dieser These ab. Um diese zwei Farbreihen farbmetrisch richtig mit den visuellen Beobachtungen zu beschreiben, müsste die Buntheit nochmals um den Faktor zwei bis drei reduziert werden. Das Problem im blauen Spektrum wird auch durch die kleine Feldgröße verstärkt. Da die S-Rezeptoren für kurze Wellenlängen in einer geringeren Dichte im Auge vorhanden sind, treffen durch das kleine Messfeld nur wenig Blauinformationen auf das Auge. Daher wird für die visuelle Auswertung ein grösseres Messfeld dringend empfohlen.

4.3. Material-Effizienz

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse zur Ermittlung der Material-Effizienz zusammengestellt. Untersucht wurden die Separationsauszüge und der Verbrauch an Tinte mittels Messung des Gewichtsverlusts der Tintenpatrone. Des Weiteren wurde mit dem Lichtmikroskop untersucht, inwieweit die Messung der Separationsauszüge mit den Daten des realen Drucks übereinstimmen.

4.3.1. Berechnung anhand der Separationsauszüge

Tabelle 4.13 zeigt die Bedeckung bei den verschiedenen Separationen und die daraus resultierenden Kosten. Für die Berechnung der Kosten wurden die Annahmen aus Abschnitt 3.4 zugrunde gelegt, dass die bunte Druckfarbe drei mal teurer in der Beschaffung ist als die unbunte Druckfarbe. Da die Ergebnisse mit einer einfachen CMY0*-Separation verglichen werden, sind die Kosten der CMY0*-Separation auf 100% normiert.

Die Auswertung zeigt, dass die Kosten für Druckfarbe durch eine geeignete Separation auf weniger als die Hälfte gegenüber der einfachen CMY0*-Separation gesenkt werden können. Da der Algorithmus bei der Linearisierung der Zweitausgabe Farbwerte produziert, die nicht mehr exakt der Vorschrift für die intelligente Separation entsprechen, kommt es zu einer geringfügigen Korrektur der Kostenfunktion. Diese fällt mit maximal drei Prozentpunkten allerdings gering aus. Im Mittel kann gut von einer Halbierung der Farbmaterialkosten ausgegangen werden. Durch die Verwendung einer sparsamen Separation, hier CMYn4* genannt, können die Kosten sogar auf unter 40% gegenüber

4. Auswertung der Messdaten

	Cyan	Magenta	Yellow	Schwarz	Σ CMYK	Kosten[%]
CMY0*						
Bedeckung	0,409	0,408	0,408	0,000	1,225	100
CMYn4*						
Bedeckung	0,140	0,140	0,139	0,157	0,576	38
CMYn5* Erstaussgabe (VT=1.0)						
Bedeckung	0,177	0,177	0,176	0,176	0,707	48
CMYn5* Erstaussgabe (VT=0.98)						
Bedeckung	0,178	0,186	0,176	0,143	0,683	48
Erstaussgabe (VT=0.95)						
Bedeckung	0,177	0,177	0,176	0,154	0,685	48
CMYn5* Erstaussgabe (VT=0.92)						
Bedeckung	0,177	0,177	0,183	0,154	0,692	48
CMYn5* Zweitaussgabe (VT=0.98)						
Bedeckung	0,146	0,217	0,185	0,154	0,701	49
CMYn5* Zweitaussgabe (VT=0.95)						
Bedeckung	0,171	0,179	0,182	0,180	0,711	48
CMYn5* Zweitaussgabe (VT=0.92)						
Bedeckung	0,172	0,196	0,202	0,170	0,740	51

Tabelle 4.13: Berechnung von Bedeckung und Druckkosten anhand der Separationsauszüge. Bewertet sind die 972 Farbfelder wie sie beispielsweise in 3.3 A bis j und 1 bis 27 zu sehen sind.

einer CMY0*-Separation gesenkt werden. Eine derart hohe Einsparung ist allerdings mit optischen Abstrichen in der Ausgabe verbunden. Geht es nur um einen Erstaussdruck, wie er oft gedruckt wird, um Kunden das Gesamtbild der Seite und deren Aufbau zu zeigen, ist diese Separationsmethode durchaus gerechtfertigt und spart dabei Geld und schont die Umwelt durch einen sparsamen Umgang mit Materialressourcen.

Ein weiterer Vorteil ist die niedrigere Gesamtbedeckung von Druckfarbe. Wie sich aus der Spaltsumme ablesen lässt, sinkt die Gesamtbedeckung deutlich gegenüber einer CMY0*-Separation. Dies hat wiederum den Vorteil, dass die Farbe besser vom Papier angenommen wird und das Papier nach dem Druck schneller trocknet. Dadurch kann zum einen ein leichteres Papier verwendet werden und zum anderen sinkt die Gefahr, dass die Druckbögen nach dem Ablegen zusammenkleben.

Die Werte in Tabelle 4.13 basieren auf dem Auslesen eines Prüfvorgangs, wie es z.B. in Abbildung 3.3 zu sehen ist. Da in den Messfeldern alle Buntarten vertreten sind, ist ein guter statistischer Mittelwert für einen üblichen Farbausdruck gegeben. Wird in der Praxis ein Bild gedruckt, das viele Bereiche enthält, in denen alle drei Druckfarben mit hoher Deckung übereinander gedruckt werden, verbessert sich der Wirkungsgrad der Separation noch weiter. Bei hohen Buntheiten, die mit zwei Druckfarben gedruckt werden können, sinkt die Effizienz durch eine intelligente Separation. Dies hängt damit zusammen, dass der Unbuntanteil, der ja durch gleiches Mischungsverhältnis der drei Druckfarben repräsentiert wird, dabei geringer wird. In der Summe bieten die Prüfvorgänge allerdings einen guten Durchschnitt der normalen Druckgewohnheiten und daher ein repräsentatives Ergebnis für Farbbilder. Werden Balkendiagramme, wie sie in Geschäftsgrafiken häufig vorkommen, gedruckt, lässt sich die Material-Effizienz durch die richtige Wahl der Farbe deutlich steigern. Durch die Verwendung einer Druckfarbe, die nahe an einer der Gerätefarben CMY liegt, kann zusätzlich Material eingespart werden. Ein großer deutscher Telekommunikationskonzern verwendet für sein Logo die Farbe Magenta und spart damit deutlich Druckfarbe ein.

4.3.2. Messung des Farbverbrauchs durch wiegen

Mit dieser Versuchsreihe wurde überprüft, wie viel Gewicht die Patronen bei einem Ausdruck der Testseite verlieren. Es wurde die gleiche Testseite gedruckt, die auch bei der Untersuchung der Separationsauszüge verwendet wurde. In Tabelle 4.14 sind die Messwerte von Ausgabegerät Nr. 6 zu sehen. Da eine hinreichend genaue Waage nur ortsfest zur Verfügung stand, war es nur möglich, mit einem nicht ortsfesten Drucker zu arbeiten.

		C [g]	M [g]	Y [g]	K [g]	Σ [g]
OLV*	vor	21,315	23,392	23,739	48,088	
	nach	21,208	23,300	23,620	48,054	
	Verbrauch	0,107	0,092	0,119	0,034	0,353
CMY0*	vor	21,107	23,209	23,512	48,041	
	nach	21,019	23,122	23,408	48,029	
	Verbrauch	0,089	0,086	0,104	0,012	0,291
CMYn4*	vor	21,019	23,122	23,408	48,029	
	nach	20,937	23,047	23,318	48,018	
	Verbrauch	0,082	0,075	0,090	0,011	0,257
CMYn5*	vor	21,208	23,300	23,620	48,054	
	nach	21,107	23,209	23,512	48,041	
	Verbrauch	0,100	0,092	0,109	0,013	0,314

Tabelle 4.14: Gemessener Tintenverbrauch bei Ausgabe der Prüfvorlagen auf Gerät Nr. 6

Die Messwerte zeigen, dass das Ausgabegerät nicht auf den Separationsmechanismus anspricht. Der höchste Tintenverbrauch wird bei der Ausgabe von einem OLV*-Testchart erreicht. Diese Ausgabe zeigte auch das beste Druckbild und hat die wenigsten Farbsprünge in den 729 Farbfeldern des ausgegebenen Farbwürfels.

In Spalte drei und vier ist deutlich zu sehen, dass die Farbseparation mittels Unbuntaufbau bei diesem Gerät komplett ignoriert wird. Die Separation nach CMYn4* hat zwar einen niedrigeren Gesamtfarbauftrag, setzt aber trotzdem auf eine Separation mittels Buntaufbau. Auch die CMY0*-Separation wird nicht korrekt umgesetzt. Eigentlich dürfte mit dieser Ansteuerung keine schwarze Druckfarbe verbraucht werden. In der Realität wird aber annähernd die gleiche Menge verbraucht, wie beim Druck mittels CMYn4*- und CMYn5*-Separation.

Verwunderlich und gleichzeitig schwer zu erklären ist die Tatsache, dass der Farbverbrauch bei allen Separationen annähernd gleich ist, der Verbrauch an schwarzer Druckfarbe bei der OLV*-Ausgabe jedoch deutlich höher ist als bei den CMY*-Separationen.

Auch verwundert es, dass die OLV*-Ausgabe deutlich leuchtendere Farben zeigt als die CMY*-Ausgabe, obwohl bei dieser ja deutlich weniger schwarze Druckfarbe verbraucht wird. Betrachtet man das Verhältnis von unbunt zu bunt definierter Farbfelder, ist dies mit Rand und Beschriftung in etwa Eins zu Acht. Dies entspricht ungefähr dem Verhältnis der Summe bunter Druckfarbe zu unbunter Druckfarbe bei der OLV*-Ausgabe mit Eins zu Neun. Bei der Ausgabe mittels CMY*-Separation ist das Verhältnis bunter zu unbunter Druckfarbe mit 1:23 deutlich geringer. Somit ist bei der OLV*-Ausgabe eine gewisse Korrelation von Druckfarbe zu definierten Farbfeldern zu erkennen, bei der CMY*-Separation allerdings nicht. Möglich wäre, dass bei der CMY0*-Separation nur der Text mittels schwarzer Druckfarbe gedruckt wird und eine geringe aber konstante Menge bunter Druckfarbe zu allen Unbuntwerten gemischt wird. Der Mechanismus, der die schwarze Druckfarbe steuert, ist ja bei den CMY0*-Ausgaben in etwa gleich.

In Tabelle 4.15 ist der Verbrauch auf die OLV*-Ausgabe normiert dargestellt. Durch die Normierung der OLV*-Ausgabe auf 100% sieht man sehr schön die hohe Abweichung im Verbrauch der schwarzen Druckfarbe zur Bunten.

	C[%]	M[%]	Y[%]	K[%]	$\frac{K}{\sum CMY}$
OLV*	100	100	100	100	1:9
CMYn0*	83	94	87	34	1:23
CMYn4*	76	81	75	33	1:22
CMYn5*	93	99	91	39	1:23

Tabelle 4.15: Auf OLV*-Ausgabe normierte Verbrauchswerte bei Gerät Nr. 6.

Diese Messergebnisse lassen den Schluss zu, dass der Drucker nicht die vorgegebenen Farbwerte umsetzt, sondern im Druckertreiber alle Farbwerte vollständig umgerechnet, neu bewertet und daraufhin die Mengenverhältnisse der Druckfarben an die Ausgabeinheit sendet. Die Material-Effizienz schneidet hierbei sehr schlecht ab und kann vor allem nicht gesteuert werden. Interessanterweise war die Ausgabesteuerung zur Verbesserung der Gleichabständigkeit einer Farbreihe möglich.

4.3.3. Beurteilung mittels Lichtmikroskop

Zu Beginn der Arbeit wurde das Konzept ausgearbeitet, den Farbauftrag und dadurch den Verbrauch an Druckfarbe mittels Beurteilung der Separationsauszüge zu ermitteln. Da erste Testdrucke auf verschiedenen Ausgabegeräten beim Druck von Graustufen-Bildern immer wieder Farbpigmente erkennen ließen, entstand die Idee, mit dem Lichtmikroskop zu arbeiten. Mit dieser Methode wird untersucht, inwieweit eine Korrelation zwischen den vorgegebenen Farbwerten und den gedruckten Farbwerten vorhanden ist. Wird beispielsweise mit dem Postscript-Befehl *setgray 0.5* die Information an den Drucker gesendet, ein Mittelgrau zu drucken, in der Ausgabe aber festgestellt, dass Farbpigmente auf der Ausgabe vorhanden sind, ist die Korrelation zwischen Ausgabesteuerung und tatsächlicher Ausgabe schlecht. Auch bei der Vorgabe *setcmykcolor 0.5 0.5 0.5 0* wäre die Korrelation schlecht, wenn das Ausgabegerät hier nur Graustufen druckt, obwohl die Material-Effizienz als gut zu beurteilen wäre. Überprüft wird also, inwieweit das Ausgabegerät die vorgegebenen Farbwerte umsetzt, ohne diese näher zu interpretieren. Gerade die einfachen Geräte, die für den Massenmarkt hergestellt werden, zeigen meist das Verhalten, dass die vorgegebenen Farbwerte komplett neu interpretiert werden und damit keine Steuerung der Materialeffizienz ermöglichen.

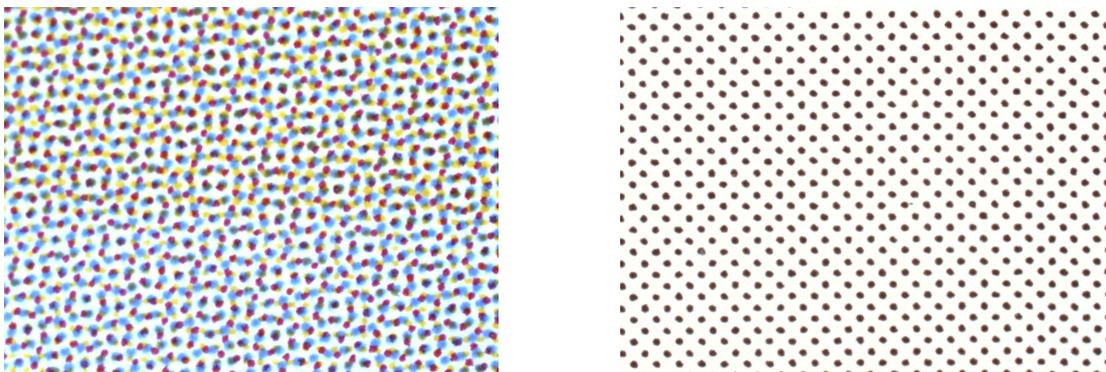


Bild 4.17: Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 1. CMY0*-Separation (links) und CMYn5*-Separation (rechts)

Bild 4.17 zeigt eine Vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, die auf einer Offset-Druckmaschine ausgegeben wurde. Im linken Bild ist ein helles Grau zu sehen, welches mittels Buntaufbau gedruckt wurde. Dass alle drei bunten Druckfarben gleichanteilig gedruckt wurden, ist auch sehr schön an der Rasterung zu erkennen. Durch das Aufrastern der Farbpunkte mit Yellow=0°, Cyan=15° und Magenta=75° entstehen die kreisförmigen Inselstrukturen. Im Bild rechts, ist die selbe Graustufe mittels Unbuntaufbau gedruckt. Die schwarze Druckfarbe wird mit einem Raster von 45° gedruckt. Bild 4.17 zeigt sehr schön, dass beim Offset Druck eine vollständige Steuerung der Ausgabe mittels einer

geeigneten Separation möglich wird.

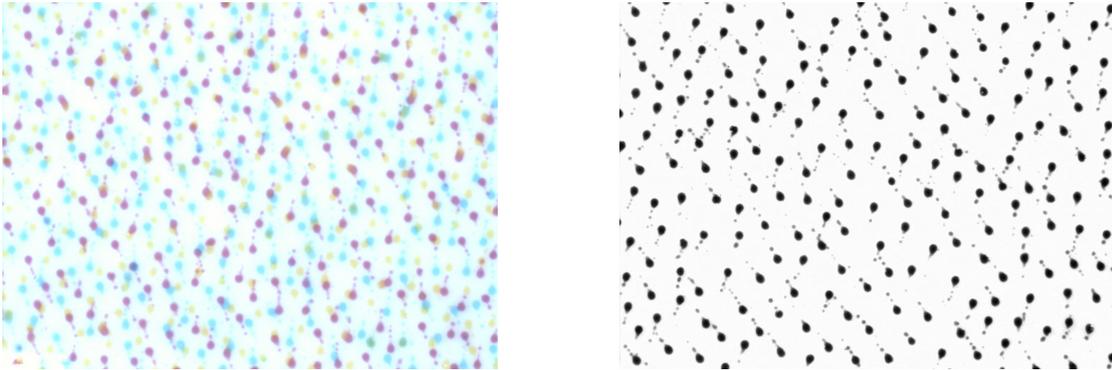


Bild 4.18: Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 4. CMY0*-Separation (links) und CMYn5*-Separation (rechts)

Dass eine zuverlässige Steuerung der Ausgabe auch mit anderen Geräten möglich ist, zeigt Bild 4.18. Wie auch bei der Auswertung der Offset-Ausgaben wurden die zwei Separationen CMY0* und CMYn5* mikroskopisch untersucht. Auch hier zeigt sich, dass im Buntaufbau ein graues Feld mittels Überlagerung der drei Druckfarben aufgebaut wird. In der CMYn5*-Separation werden graue Felder nur mit schwarzer Druckfarbe bedruckt. Anders als beim Offset-Druck werden hier die Druckpunkte statistisch zufällig über das Papier verteilt. Die Größe der Punkte ist in etwa immer die gleiche, so dass das Ausgabegerät mit einem frequenzmodulierten Raster arbeitet. Die Farbfelder in Bild 4.18 wurden auf einem Tinten-basierten-Proof-Drucker Nr. 4 ausgegeben. Diese Drucker werden häufig für farbverbindliche Muster der später im Offset hergestellten Stückzahlen verwendet. Daher sollten diese Geräte möglichst exakt an die *Tücken* des Offset-Prozesses angepasst sein.

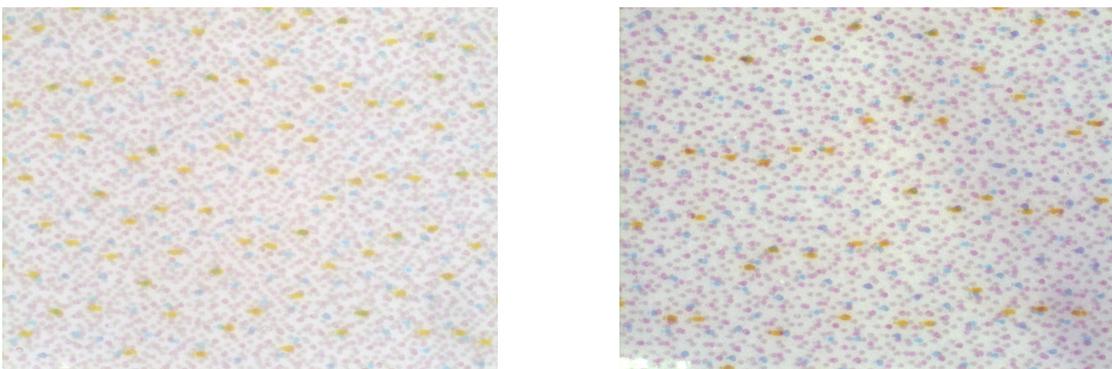


Bild 4.19: Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 5. CMY0*-Separation (links) und CMYn5*-Separation (rechts)

Die Bilder 4.19 entstanden auf einem ähnlichen Gerät wie die aus 4.18. Dieses Gerät ist allerdings mit einem sieben-Farb-Kopf ausgestattet. Die schwarze Druckfarbe wird in

4. Auswertung der Messdaten

der Vergrößerung als sehr hell empfunden. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass geringe Gelb- und Magentaanteile in allen Graustufen vorhanden sind. Der Drucker legt sozusagen ein Farbanteil Gelb und Magenta als statischen Offset-Wert unter die Graureihe. Auch die Tatsache, dass der Drucker mehr Farben zur Verfügung hat als sich in der Steuerungsdatei definieren, lassen macht eine exakte Steuerung der Ausgabeseparation eigentlich nicht möglich. Der Druckertreiber hat keine andere Möglichkeit als die Farbwerte, die gesendet wurden, neu zu kodieren. Andernfalls würden ja die zusätzlichen Farben nicht verwendet. Für die hier durchgeführten Tests der Material-Effizienz, durch einen geeigneten und steuerbaren Separationsmechanismus, ist ein solches Gerät daher etwas ungeeignet.

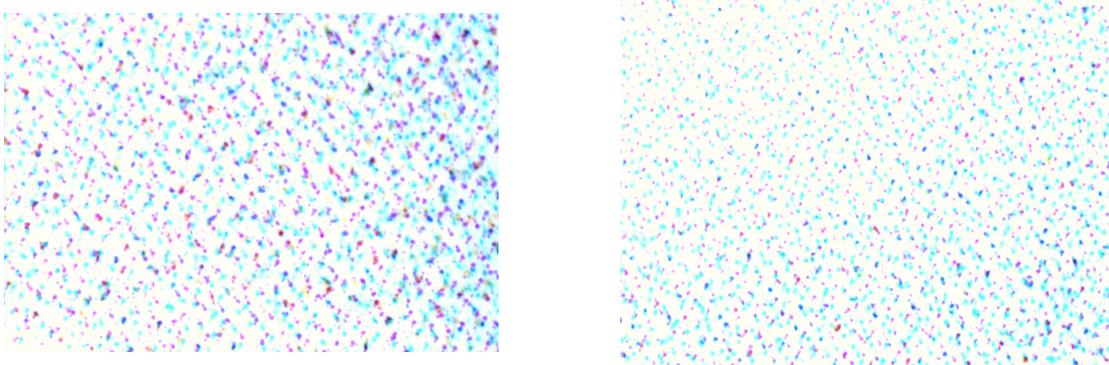


Bild 4.20: Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 6. CMY0*-Separation (links) und CMYn5*-Separation (rechts)

Als im vorigen Abschnitt der Materialverbrauch mittels wiegen der Tintenpatronen ermittelt wurde, hat sich schon abgezeichnet, dass mit Ausgabegerät Nr. 6 keine Material-Effizienz durch eine geeignete Separation zu erwarten ist. Dies zeigt auch die Darstellung unter dem Mikroskop. In Bild 4.20 ist rechts ein helles Grau mittels Buntaufbau und rechts mittels Unbuntaufbau zu sehen. Es ist unschwer zu erkennen, dass beide Felder mittels Buntaufbau gedruckt wurde. Da sich beim Drucken von Grau aus bunter Druckfarbe etwa neunmal mehr Umsatz erreichen lässt als beim Drucken mit Schwarz, ist es nicht verwunderlich, dass gerade Geräte im unteren Preissegment diese Eigenschaft nutzen.

Dass es auch bei Verwendung von Bürogeräten anders geht, zeigt die Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 7 und vergrößert in Bild 4.21 dargestellt. Der Druck entstand auf einem aktuellen Bürodrucker, der mittels Laser-Druckverfahren arbeitet und über Postscript angesprochen werden kann. Die Vergrößerung zeigt, dass die Art der Separation für die Ausgabe bei diesem Gerät gesteuert werden kann. Der Aufbau einer Graureihe wird, wie im Testchart definiert, einmal mit bunter Druckfarbe und das andere Mal mit unbunter Druckfarbe gelöst. Somit lässt sich die Material-Effizienz, wie sie mittels

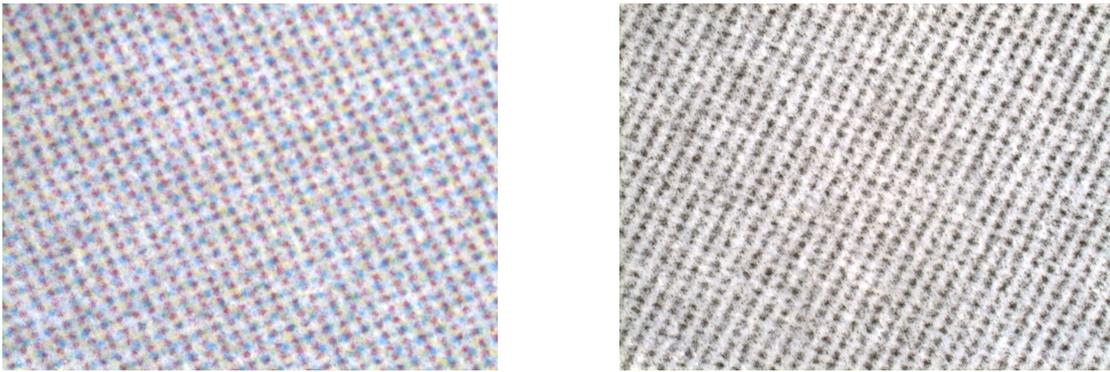


Bild 4.21: Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 7. CMY0*-Separation (links) und CMYn5*-Separation (rechts)

Separationsauszug ermittelt wurden, auch auf Ausgaben dieses Gerätes bzw. dieser Geräteklasse übertragen. Dies bedeutet, dass sich bei diesem Gerät die Druckkosten durch eine geeignete Separation um gut die Hälfte reduzieren lassen.

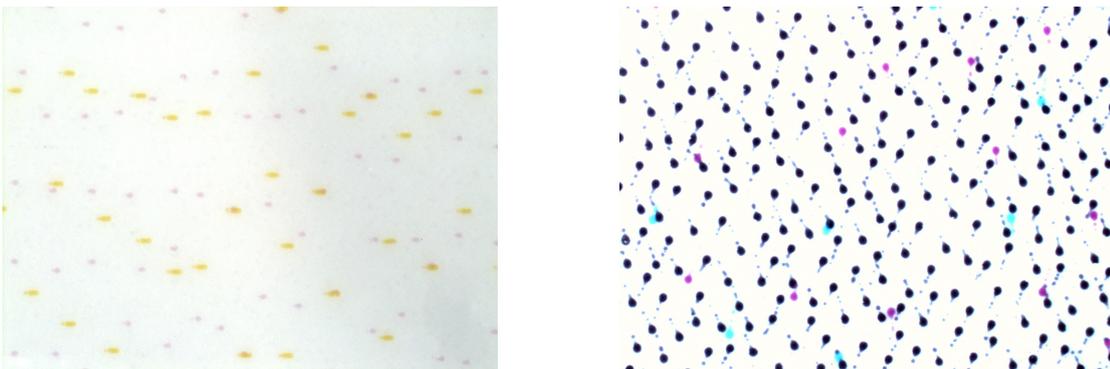


Bild 4.22: Ausgabe eines als Weiß definierten Feldes auf Gerät Nr. 5 (links). Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer CMYn5*-separierten Zweitausgabe (rechts)

Die etwas kuriose und oben erwähnte Umsetzung des weißen Feldes, unabhängig ob Erst- oder Zweitausgabe, bei Ausgabegerät Nr. 5 ist in Bild 4.22 dargestellt. Zu erkennen ist, dass zu dem Papierweiß noch gelbe und magentafarbene Druckpunkte zugemischt werden. Möglich wäre, dass dieser Effekt durch ein Ausgabeprofil zustande kommt, welches die Verwendung einer speziellen Papiersorte simuliert und mit der zusätzlichen Druckfarbe den Weißpunkt angleicht. Eine vergleichende Messung mit einer rein weißen Papierprobe erbrachte nur einen minimalen Farbunterschied. Auf dem Testchart wurde ein CIELAB-Wert von ($L^*=96.65$; $a^*=1.4$; $b^*=-2.7$) gemessen. Die Messung der weißen Papierprobe ergab einen CIELAB-Wert von ($L^*=97.0$; $a^*=1.4$; $b^*=-3.99$). Aus den Messwerten ergibt sich ein ΔE von gerade einmal 1,34. Der Wert ist so gering, dass er nicht auf eine beabsichtigte Angleichung des Weißpunktes schlie-

ßen lässt. Es handelt sich wohl eher um einen Fehler in der Ansteuerung oder im Ausgabeprofil.

Im rechten Bild ist zu erkennen, dass sich durch die Anwendung des Linearisierungsalgorithmus neue Farbwerte in die Graudefinition *einschleichen*. Somit verschlechtert sich die Material-Effizienz durch die Linearisierung geringfügig. Aus den Messwerten in Tabelle 4.13 ist zu erkennen, dass die Verschlechterung durch eine Linearisierung eindeutig vernachlässigt werden kann.

4.4. Zusammenfassung der visuellen Effizienz und Material-Effizienz

In der folgenden Tabelle sind die Parameter für visuelle Effizienz und Material-Effizienz mittels ja/nein-Kriterien zusammengefasst. Die Angaben beziehen sich auf Erstaussgabe und Zweitaussgabe unter Verwendung einer CMYn5*-Separation. Lediglich die Angaben für Ausgabegerät Nr. 6 und Nr. 9 beziehen sich auf Ausgabe der OLV*-Daten, da diese Geräte nur mit RGB basierten Datensätzen brauchbare Ergebnisse erzielten.

Gerät Nr.	Visuelle Effizienz				Materialeffizienz Einsparung ≥ 50 %
	Farbabstand $\leq 3\Delta E$		Gleichmäßigkeit ≥ 50		
	Erstaussgabe	Zweitaussgabe	Erstaussgabe	Zweitaussgabe	
1	nein	ja	ja	ja	ja
2	nein	ja	ja	ja	ja
4	nein	ja	nein	ja	ja
5	nein	ja	nein	ja	ja
6	nein	ja	nein	ja	nein
7	nein	ja	ja	ja	ja
9	nein	nein	nein	nein	nein

Tabelle 4.16: Zusammenfassung der Daten für Material- und visuelle Effizienz der Ausgabegeräte mittels vereinfachter ja/nein Kriterien

5. Zusammenfassung und Ausblick

Für die durchgeführte Untersuchung wurde die Farbausgabe verschiedener Ausgabegeräten untersucht. Eine anfangs große Schwierigkeit bei der Durchführung war die Beschaffung geeigneter Ausgabegeräte bzw. die Möglichkeit, digitale Farbprüfvorlagen auf diesen Geräten auszugeben. Bei der Ausgabe auf Offset-Maschinen waren vor allem die Druckkosten durch die Herstellung von Lithographie-Platten sowie der Ausfall an Maschinenzeit in der Druckerei ein Problem. Ein weiteres Problem war, dass von Seiten der Druckerhersteller die Verbesserung der Material-Effizienz nicht immer gewünscht wird; dies gilt vor allem für Hersteller günstiger GDI-Drucker. Bei einem Jahresumsatz von 100 Milliarden ¹ Dollar für Verbrauchsmaterial, welcher einem Umsatz an Drucker-Hardware von 60 Milliarden Dollar gegenübersteht, verwundert es nicht, dass die Material-Effizienz nicht im Fokus der Druckerhersteller liegt. Laut Aussagen der Marktforscher ist es gerade der Trend zur Farbe, der den Herstellern hier Milliardengewinne beschert.

Nachdem geeignete Ausgabegeräte für alle Anwendungsgebiete, wie Büroanwendung, Heimanwendung und professionelle Druckindustrie gefunden waren, haben die Messwerte der Ausgaben gezeigt, dass eine Steuerung der visuellen Effizienz fast immer möglich ist. Durch die Linearisierung der Ausgabe wird diese visuell gleichabständig. Farbmetrische Beurteilungen haben gezeigt, dass sich Kenngrößen wie die Gleichmäßigkeit g^* angenähert um den Faktor Zwei verbessern, wenn die Ausgabe linearisiert wird. Wichtig ist hier vor allem, dass durch die Ausgabe keine Farbfelder zusammenlaufen. Diese Eigenschaft führt zu unwiderruflichen visuellen Verlusten. Man stelle sich beispielsweise ein Wärmebild vor, in dem die Lage einzelner Objekte durch Helligkeitskontraste und die Temperatur durch unterschiedliche Farbwerte gekennzeichnet sind. Werden bei der Ausgabe die Farbwerte visuell nicht gleichabständig wiedergegeben, kann der Betrachter weniger Farbkontraste erkennen und es kann zu einem Informationsverlust in der Prozesskette kommen. Diese mögliche Fehlerquelle in der Datenübertragung ist schon im Vorfeld zu berücksichtigen, wenn Farbe für die Informationskodierung eingesetzt wird.

¹Marktforschung durch Lyra Research für das Geschäftsjahr 2006

Eine Linearisierung und Erhöhung der visuellen Effizienz war bei den einfachen GDI-Ausgabegeräten nur bedingt möglich, eine Steuerung der Materialeffizienz ist nicht möglich. Druckmaschinen mit einem eigenen grafischen Interface zur Interpretation der Farbwerte konnten hier klar punkten. Diese können jeweils über Postscript angesprochen werden. Durch den Einsatz einer intelligenten Separation, welche auf dem Prinzip des Unbuntaufbaus basiert, konnte die Material-Effizienz deutlich gesteigert werden. So lagen die Druckkosten durch den Verbrauch von Druckfarbe jeweils bei 50% im Vergleich zur einfachen, bunt aufgebauten Separation. Auch die Graubalance konnte durch die unbunt aufgebaute Separation erheblich verbessert werden. Dies ist ein großer Vorteil, da Farbstiche in den mittleren Grautönen vom Betrachter als besonders störend empfunden werden. Auch die Tatsache, dass die Bedeckung an Druckfarbe bei einer intelligenten Separation um mehr als ein Drittel sinkt, wirkt sich positiv auf die Druckbedingungen im Offset-Prozess aus. So kann problemlos auf dünneres Papier gedruckt werden und die Trockenzeit nach dem Druck verringert sich.

Ein Problem der angewendeten Methode zur Ausgabesteuerung ist die Tatsache, dass jede Farbausgabe neu berechnet werden muss. Dieser Vorgang kostet viel Rechenleistung und Zeit, was ihn ungeeignet für eine anwenderorientierte Arbeitsweise macht. Eine Möglichkeit, dies zu umgehen, wäre die Erstellung eines *Device-Link-Profiles*. Dabei müsste das Ausgabeverhalten des Druckers durch Messung der 729 Standardfarben einmalig bestimmt werden. Aufgrund der Messung wäre eine *Look-Up-Tabelle* zu erstellen, welche die Soll-Werte in die Ziel-Werte überführt. Der Rechenalgorithmus für die Farbseparation müsste software-basiert im Profil implementiert werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz einer intelligenten Separation nach dem Prinzip des Unbuntaufbaus nur Vorteile bringt; nämlich materielle wie auch visuelle. Der Einsatz dieser Technologie ist mit jedem Gerät möglich, das entweder über ein RIP im Workflow oder im Gerät selbst angesteuert werden kann. Bei konsequenter Anwendung der hier vorgestellten Technik amortisieren sich die höheren Anschaffungskosten durch den geringeren Verbrauch an Toner oder Tinte. Die Investition in ein Gerät mit einem eigenem grafischen Interface, so dass die Gerätefarben CMYK direkt angesprochen werden können, lohnt sich langfristig für fast alle Anwendungen.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Modell der Farbempfindung und Farbmetrischen Beschreibung	4
2.2. Spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfenarten im Auge	5
2.3. Normspektralwertfunktion für den 2° und 10° Standardbeobachter . . .	7
2.4. CIE Normfarbtafel [3]	9
2.5. a*b* Ebene mit Kennzeichnung der Buntheit (C) und des Bunttons (h) .	11
2.6. Zusammenhang zwischen Hellbezugswert Y und Helligkeit L*	12
2.7. Prinzip der Farbmischung	22
2.8. Farbrasterpunkte im Vielfarbendruck mit dem Mikroskop vergrößert dargestellt	23
2.9. Farbmetrisch gleichwertige Farben entsprechend Farbseparation in Bild 2.10	24
2.10. Substitution einer Druckfarbe durch Schwarz in der Farbseparation. Original (links) - GCR(100%) (Mitte) - GCR(25%) (rechts)	26
3.1. Kennzeichnung der Prüfvorlagen	36
3.2. Testchart L84E00NP - Bunttdreiecke zur visuellen Beurteilung der Ausgabe	38
3.3. Testchart L45E00NA - Ausgabe von 729 RGB-Werten und 4 verschie- den definierter Graureihen	38
3.4. Testchart L45E00NA - Ausgabe der OLV*-Werte	39
3.5. Testchart L46E00NA - Ausgabe der CMY0*-Werte	39
3.6. Testchart L47E00NA - Ausgabe der CMYn4* Zwischenseparation . . .	40
3.7. Testchart L48E00NA - Ausgabe der intelligenten CMYn5* Separation .	40
3.8. Testchart E21E00NP - Erstaussage für den Offset-Druck	41
3.9. TestchartE29E00FP - Zweitaussage für den Offset-Druck	41
3.10. Abweichungen in ΔE bei einem zu kleinen Messfeld	43
3.11. Prozesskette zur Ermittlung der Reflexionsfaktoren und CIELAB-Daten	45
4.1. Spektrale Reflexion der Primär-Druckfarben im Offset-Druck (links) und Laser-Druck (rechts)	57

4.2.	Farborte der Grund- und Mischfarben für den Standard Mehrfarbendruck[3]	58
4.3.	Reduzierung des Farbumfangs durch eingeschaltetes Farbmanagement. ● - CMM=off, △ - CMM=on	61
4.4.	Farbortverlauf im CIELAB-System bei Veränderung der Rastertonwerte von Primär- und Sekundärfarben im Offset-Prozess. Links im Bild mittels CMY0*-Separation und rechts mittels CMYn5*-Separation . . .	62
4.5.	Farbortverlauf im CIELAB-System bei Veränderung der Rastertonwerte einer intelligent Separierten Ausgabe vor der Linearisierung (links) und nach der Linearisierung (rechts). Ausgegeben auf Gerät Nr. 4 (Tintenbasierter Proof-Plotter)	63
4.6.	Farbortverlauf im CIELAB-System der Primär und Sekundärfarben zweier verschiedener Druckprozesse: ●-Laserdrucker, △-Offset-Druck . . .	64
4.7.	Bunttondreieck ausgegeben auf Gerät Nr. 1 für die Offset-Primärfarbe Magenta und Anlegen einer Tangente an die Farbreihe von der Volltonfarbe zum Schwarzpunkt (links). Vergleich zwischen Erstaussgabe und Zweitaussgabe (rechts).	66
4.8.	Bunttondreieck mit allen gemessenen Zwischenwerten für den Buntton Cyan (links) und Magenta (rechts).	67
4.9.	Komprimierung der Farbwerte zu höherer Buntheit bei Ausgabe auf einem Büro Laserdruck-System. Links im Bild die nicht linearisierte Erstaussgabe und rechts die linearisierte Zweitaussgabe	68
4.10.	Verschiedene Separationen und die Auswirkung auf die Graubalance, dargestellt im Bunttondreieck (CMY0*-Separation links und CMYn5*-Separation rechts) für die Farbe Cyan.	69
4.11.	Darstellung des Farbstiches der Graureihe in der a^*b^* -Ebene des CIELAB-Systems.	70
4.12.	Gradiation für zunehmende Rastertonwerte der Primär- und Sekundär-Prozessfarben (Laserdrucker Nr. 7)	71
4.13.	Spektralwerte der Graureihe (Laser-Druck oben und Offset-Druck unten).	73
4.14.	Mittlere Farbabweichung bei Erstaussgabe und CMYn5*-Zweitaussgabe von den theoretischen Soll-Werten zu den gemessenen Ist-Werten im CIELAB Farbsystem, ausgegeben auf zwei verschiedenen Offset Druckmaschinen (Nr. 1 oben und Nr. 2 unten).	75

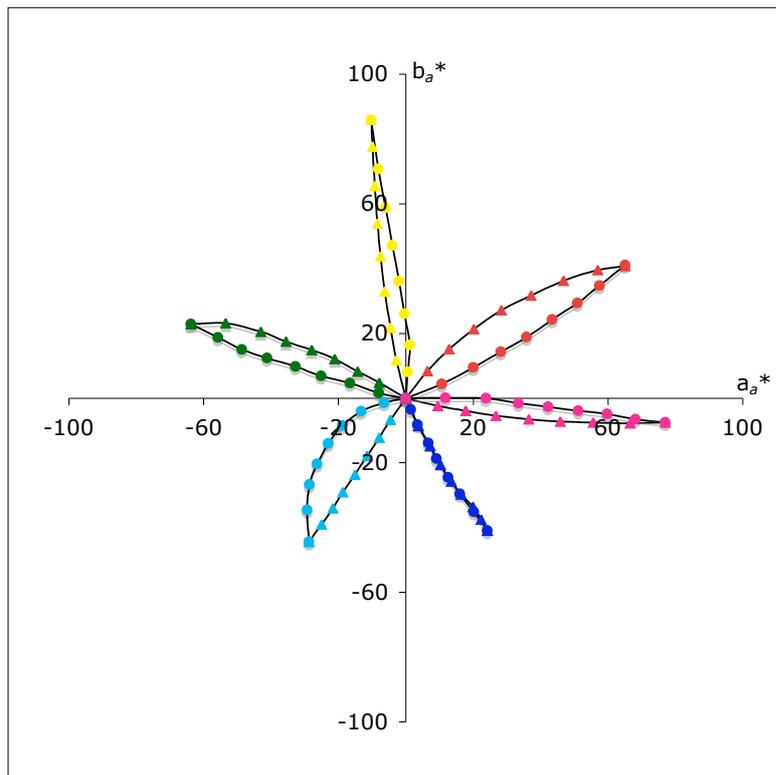
4.15. Mittlere Farbabweichung bei Erstaussgabe und CMYn5*-Zweitaussgabe von den theoretischen Soll-Werten zu den gemessenen Ist-Werten im CIE-LAB Farbsystem. Die Messwerte, oben im Bild, stammen von einer Ausgabe ,die auf dem Proof-Drucker Nr. 4 ausgegeben wurde. Unten im Bild sind die Messwerte einer Ausgabe, die auf dem Laserdrucksystem Nr. 7 ausgegeben wurde.	77
4.16. Bunttondreieck für Gelb in LABHNU, CIELAB und CIELUV	80
4.17. Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 1. CMY0*-Separation (links) und CMYn5*-Separation (rechts)	88
4.18. Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 4. CMY0*-Separation (links) und CMYn5*-Separation (rechts)	89
4.19. Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 5. CMY0*-Separation (links) und CMYn5*-Separation (rechts)	89
4.20. Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 6. CMY0*-Separation (links) und CMYn5*-Separation (rechts)	90
4.21. Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer Ausgabe, gedruckt auf Gerät Nr. 7. CMY0*-Separation (links) und CMYn5*-Separation (rechts)	91
4.22. Ausgabe eines als Weiß definierten Feldes auf Gerät Nr. 5 (links). Mit dem Lichtmikroskop vergrößerte Darstellung einer CMYn5*-separierten Zweitaussgabe (rechts)	91

Literaturverzeichnis

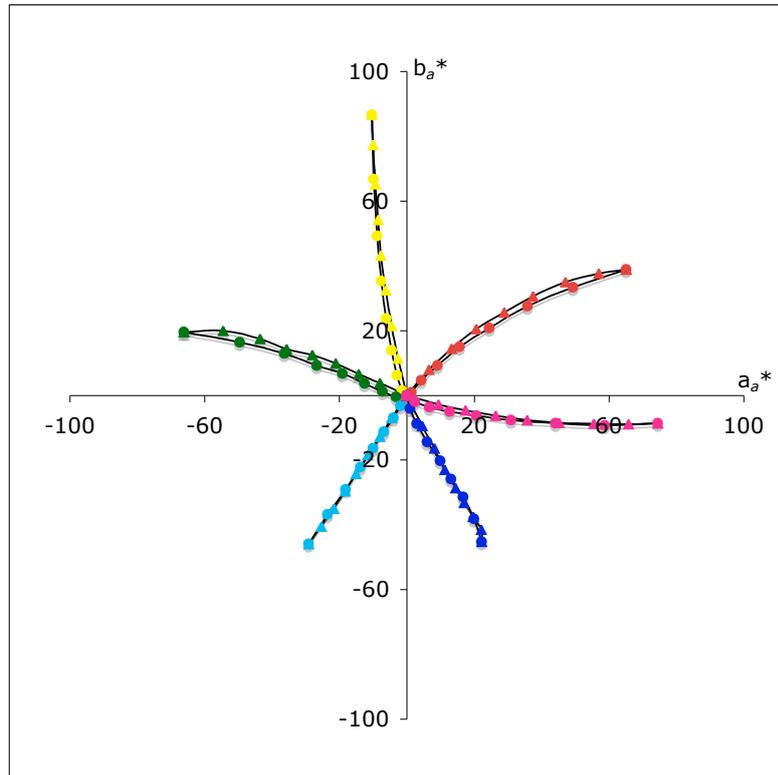
- [1] Klaus Richter, Computergrafik und Farbmetrik
1996 VDE-Verlag GmbH
- [2] Manfred Richter, Einführung in die Farbmetrik
2. Auflage Berlin, New York: de Gruyter 1980
- [3] Helmut Kipphan, Handbuch der Printmedien
Kapitel 1 als PDF Download der HDM-Stuttgart (ISBN 3-540-66941-8)
- [4] DIN 5033 Teil 1-4 und Teil 6-7
Teil 1 März 1979, Teil 2 Mai 1979, Teil 3 Juli 1992, Teil 4 Juli 1979, Teil 6 August 1976, Teil 7 Juli 1983
- [5] DIN 6174:2007-10
Oktober 2007
- [6] DIN 33872-1 bis -6:2007
Norm-Entwurf, November 2007
- [7] Fachwissen · Farbe und Qualität
www.heidelberg.com/www/html/de/binaries/files/prinect/expertguidecolor.pdf
- [8] Praxiswissen Print Color Solutions · Was sind Device-Link-profile
www.heidelberg.com/wwwbinaries/bin/files/dotcom/de/prinect/devicelinkprofile.pdf
- [9] Harald Küppers, Die Logik der Farbe
Verlag Georg D.W. Callwey, München 2. überarbeitete und ergänzte Auflage
- [10] Philip Kittelmann · Visuelle Überprüfung großer CIELAB-Farbabstände von 3- und 5-stufigen Farbreihen
Technische Universität Berlin, Diplomarbeit, 2005
- [11] Jens Witt · Farbmetrische Methoden zur Herstellung von Prüfvorlagen für Farbkopierer, Farbscanner und Farbmonitore
Technische Universität Berlin, Dissertation, 2006
<http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2006/1363/>

A. Anhang mit Diagrammen der wichtigsten Ausgabegeräten

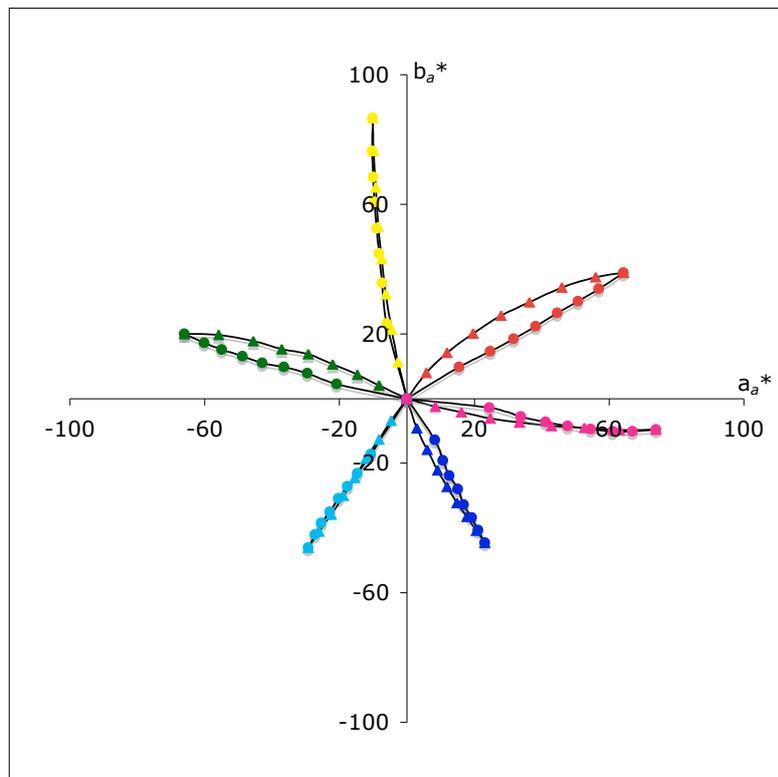
B. Diagramme Ausgabegerät Nr. 1



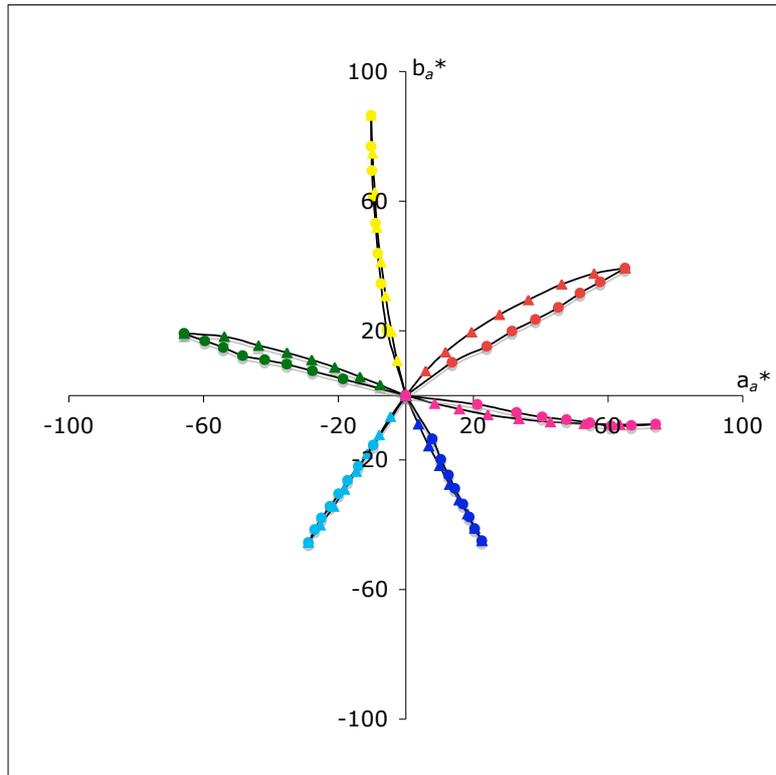
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMY0* Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



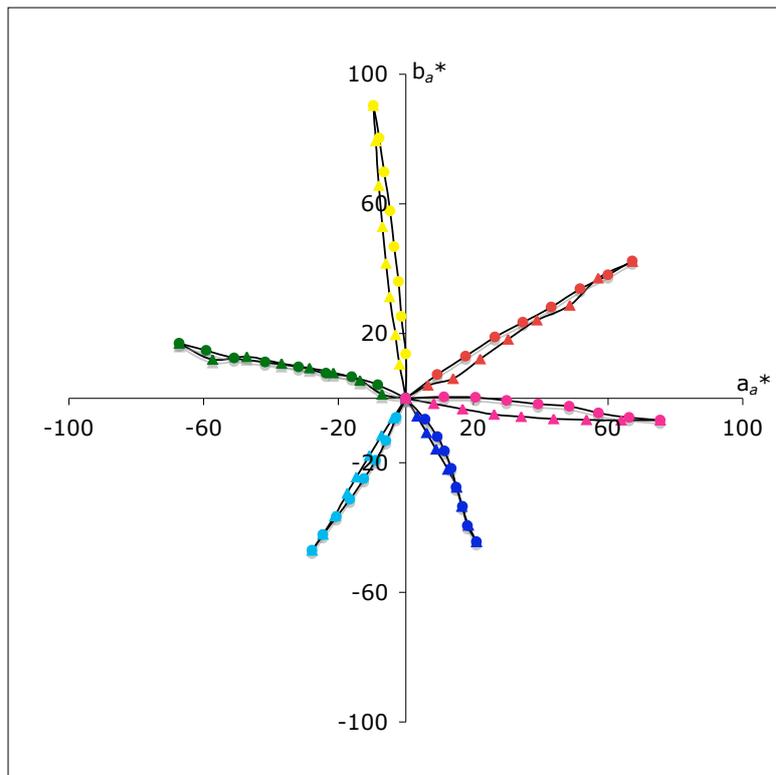
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn4* Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn5* (VT=1.0) Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

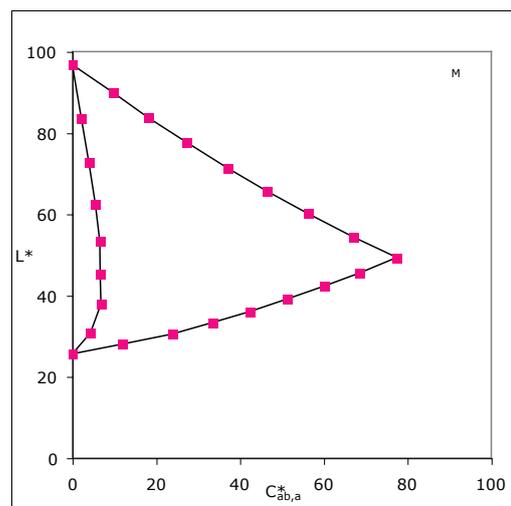
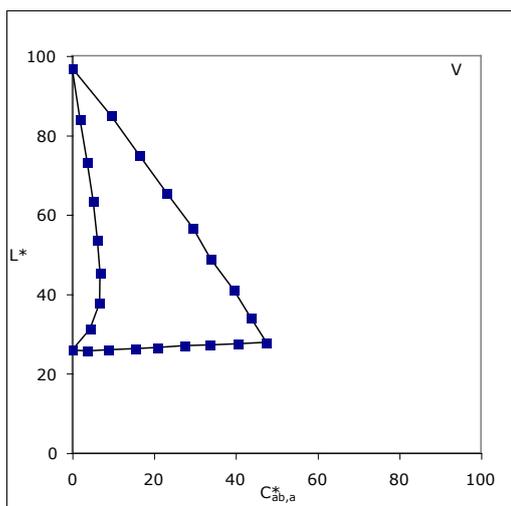
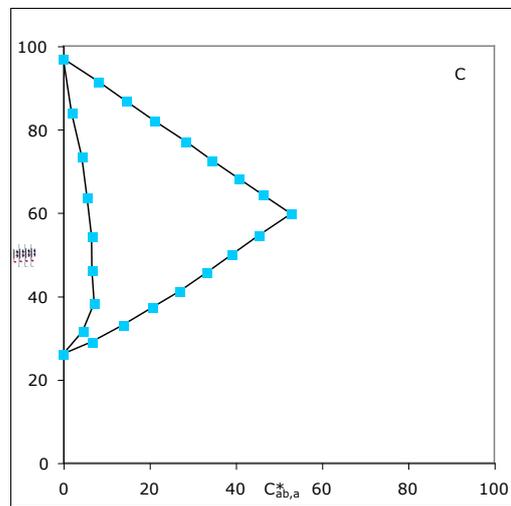
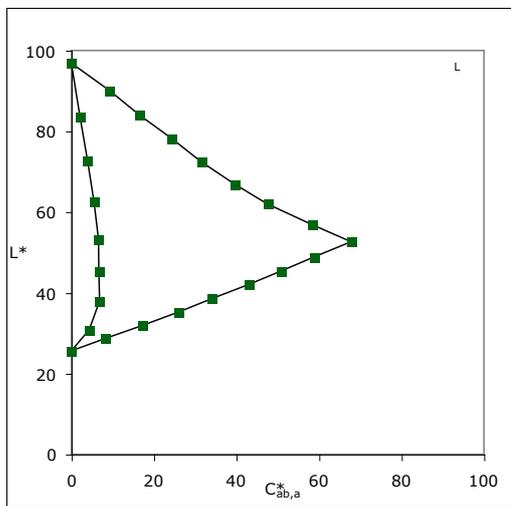
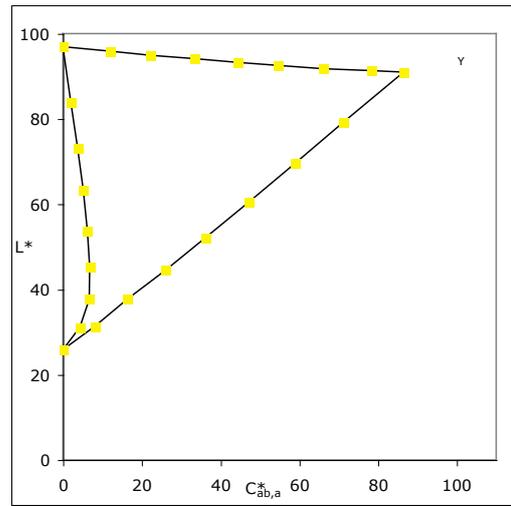
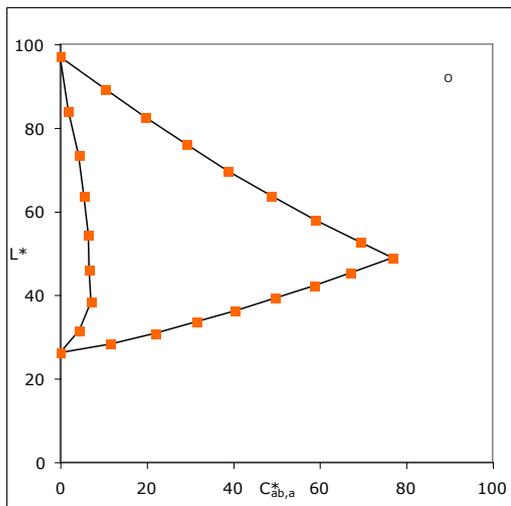


Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn5* (VT=0.98) Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

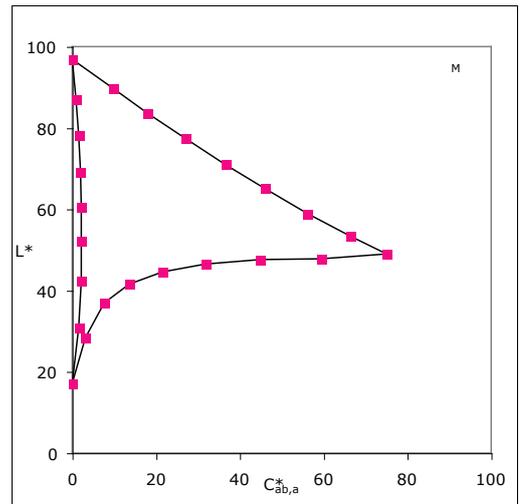
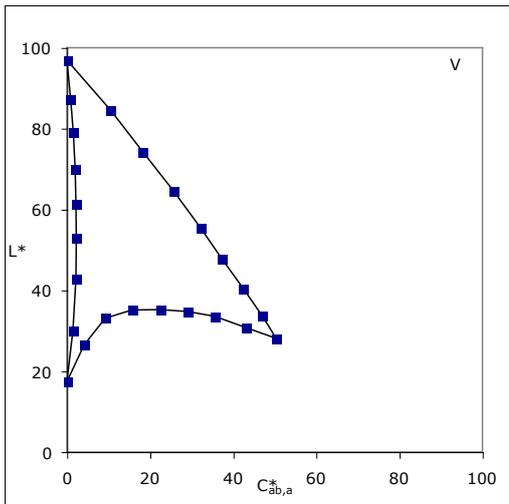
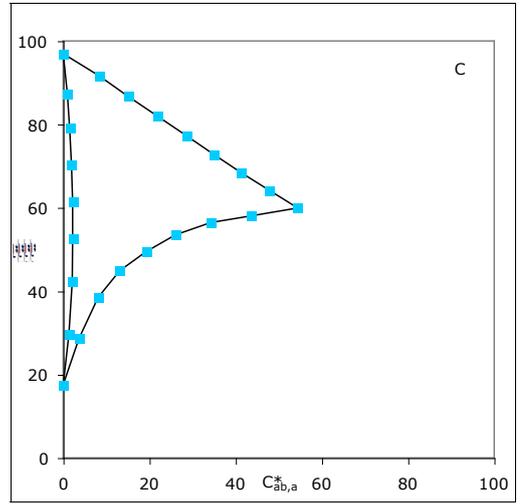
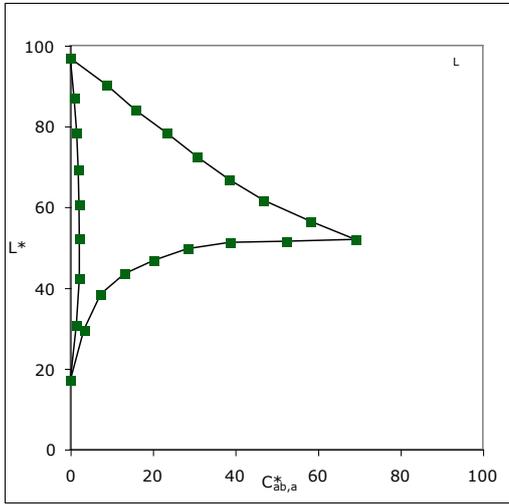
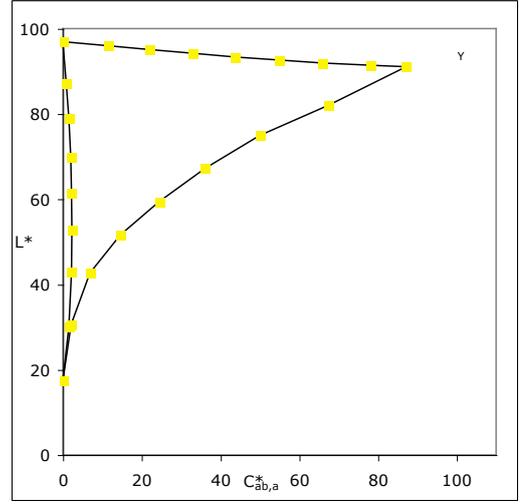
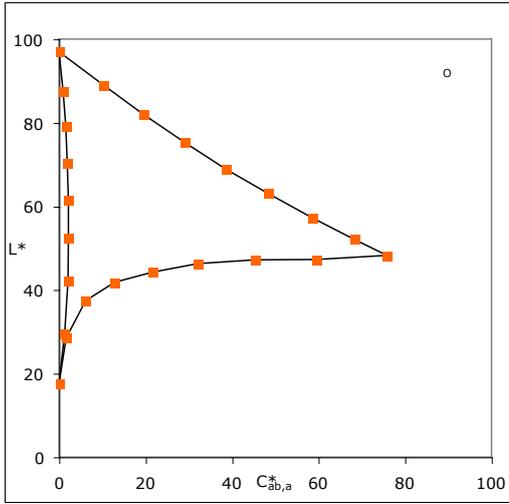


Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter CMYn5* (VT=0.98) Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

B. Diagramme Ausgabegerät Nr. 1

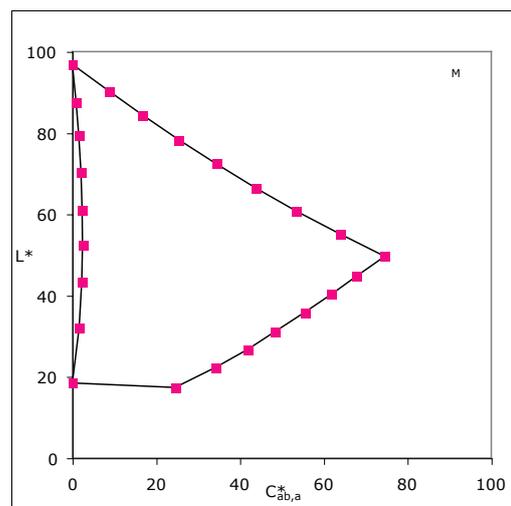
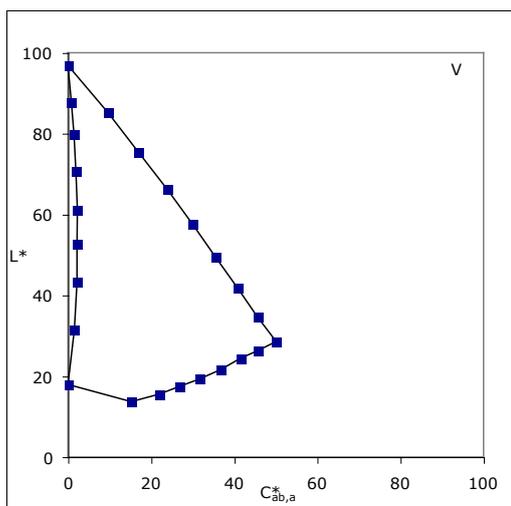
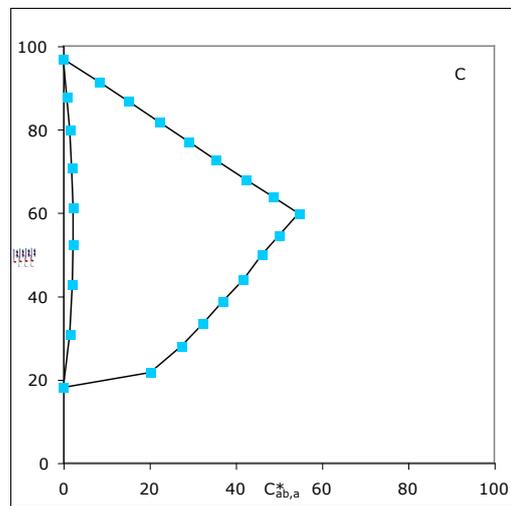
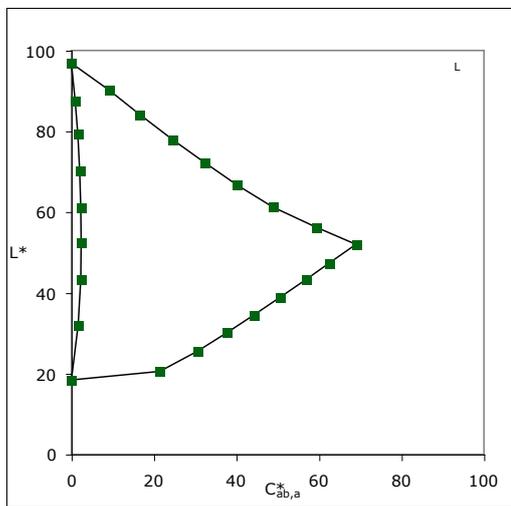
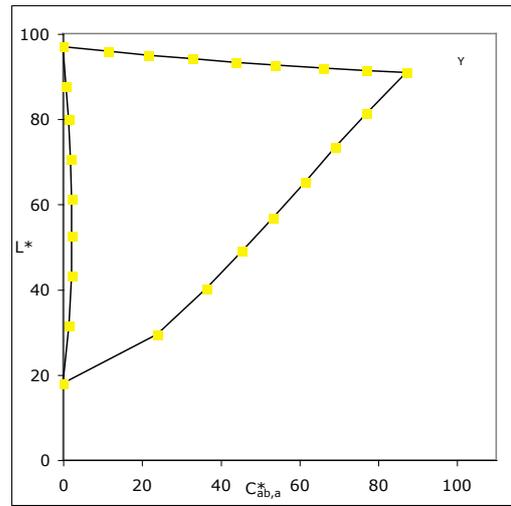
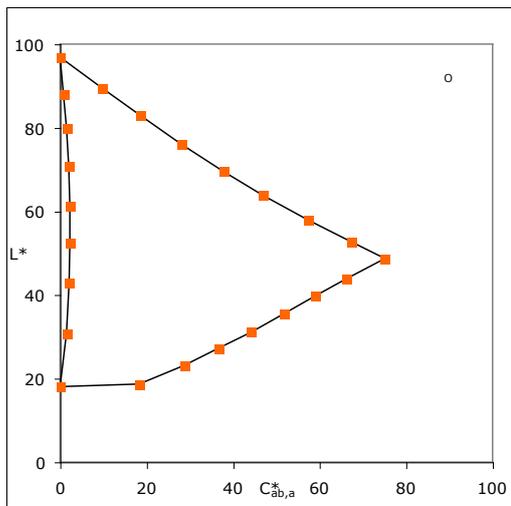


OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMY0* Separation

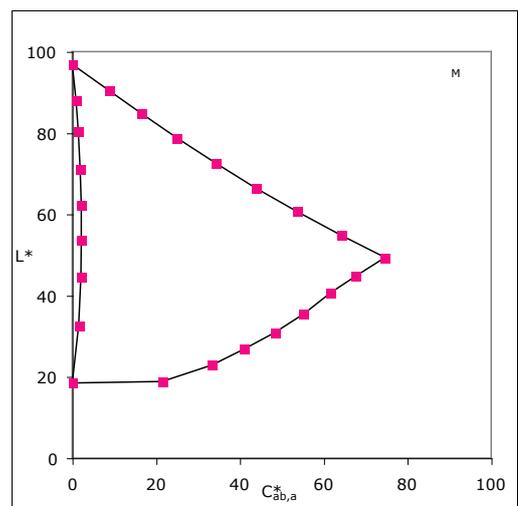
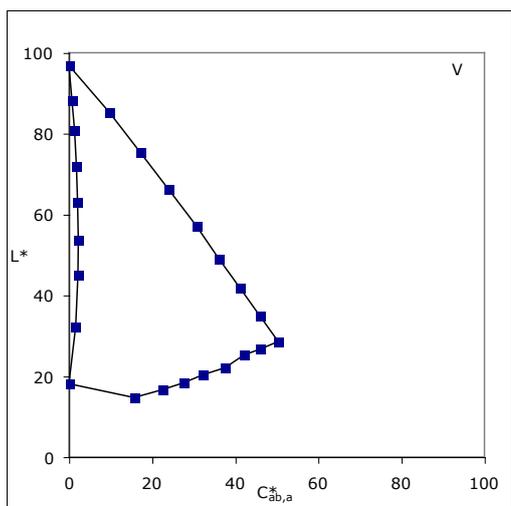
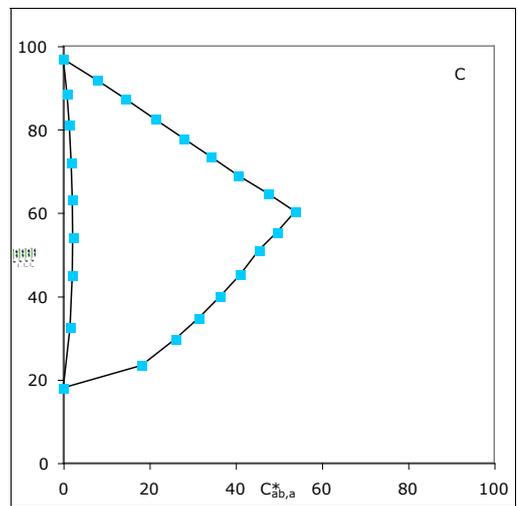
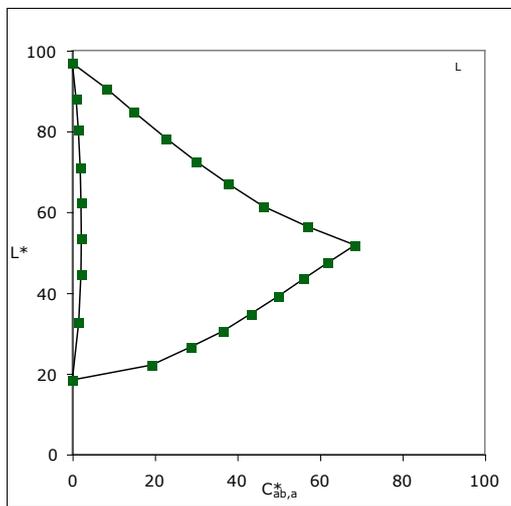
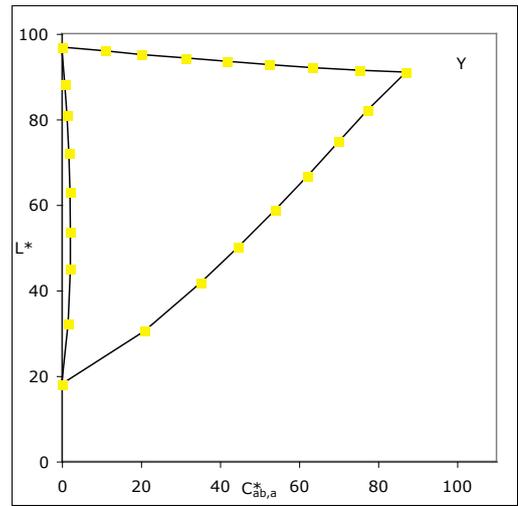
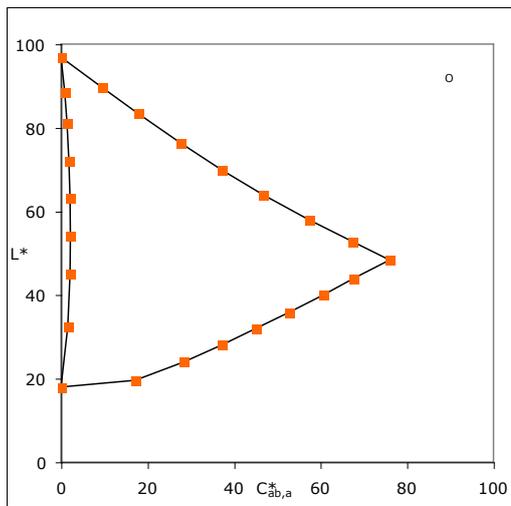


OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMYn4* Separation

B. Diagramme Ausgabegerät Nr. 1

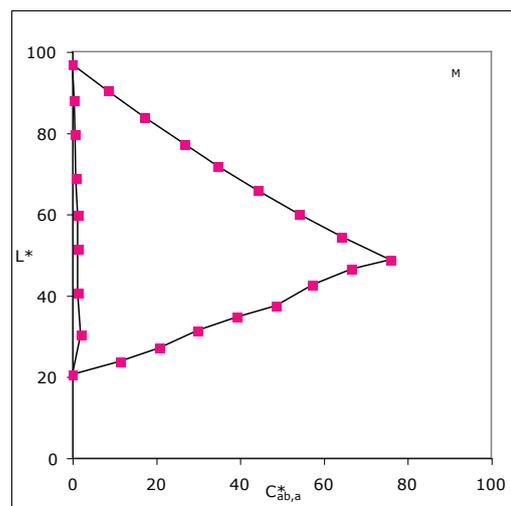
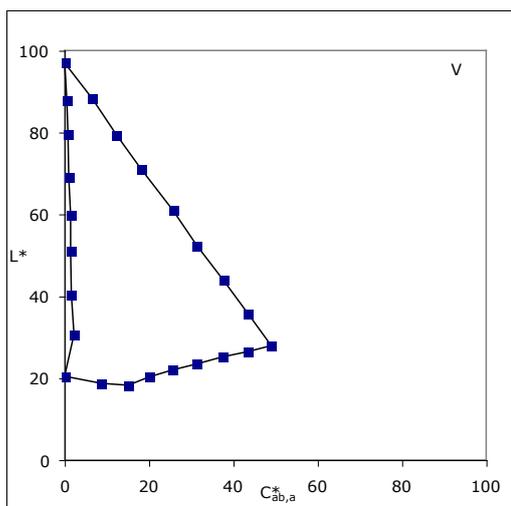
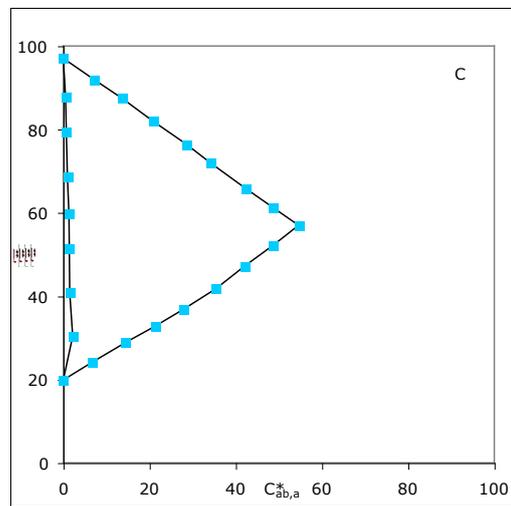
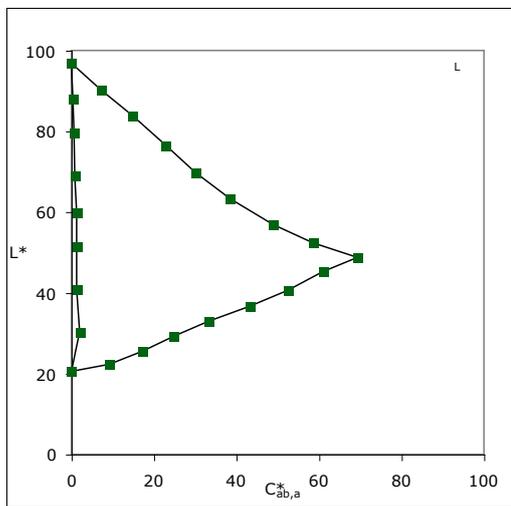
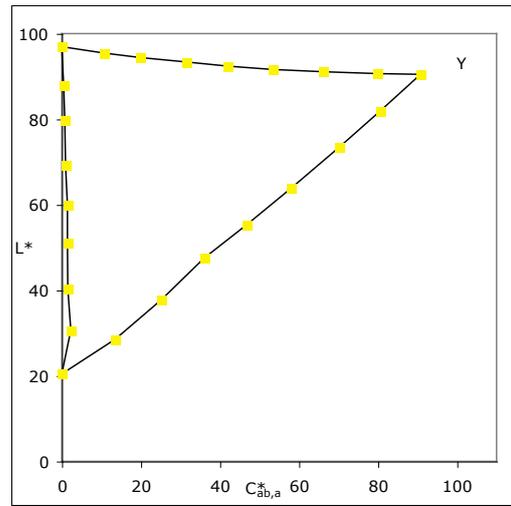
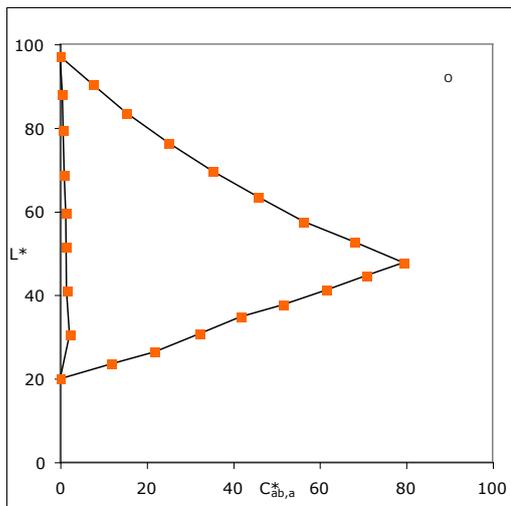


OYLCVM Bunttndreieck - nicht linearisierte CMYn5* (VT=1.0) Separation

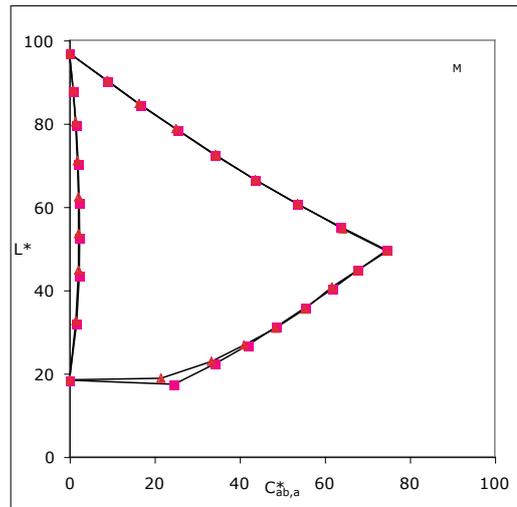
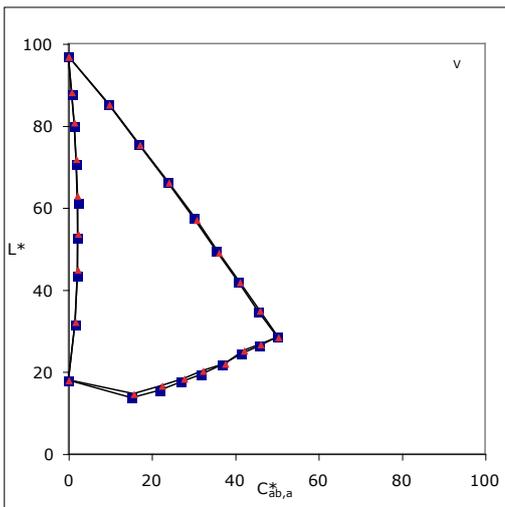
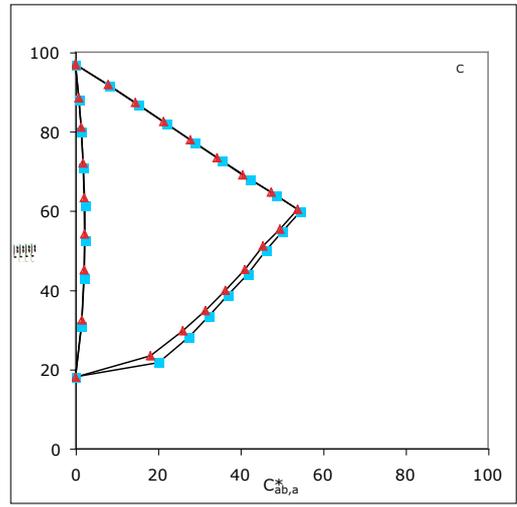
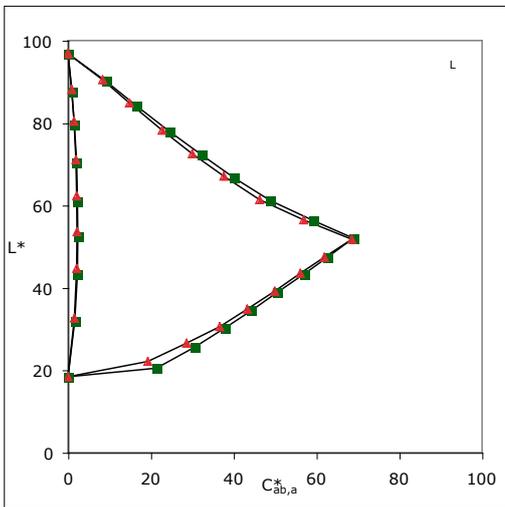
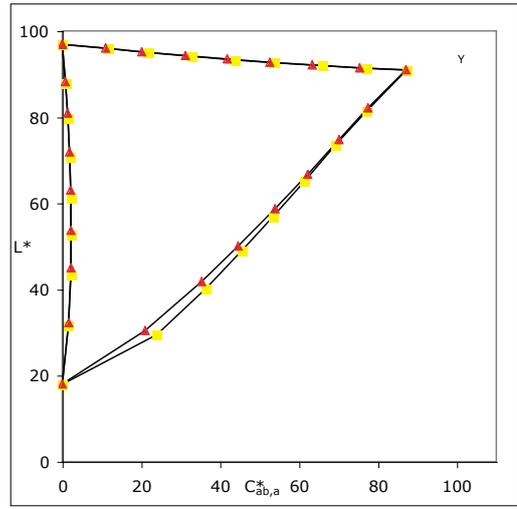
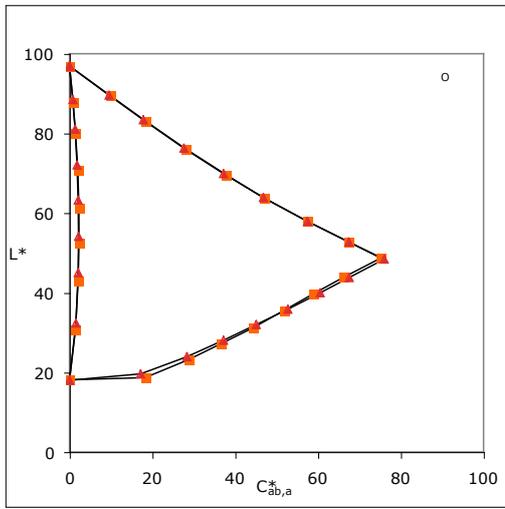


OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMYn5* (VT=0.98) Separation

B. Diagramme Ausgabegerät Nr. 1

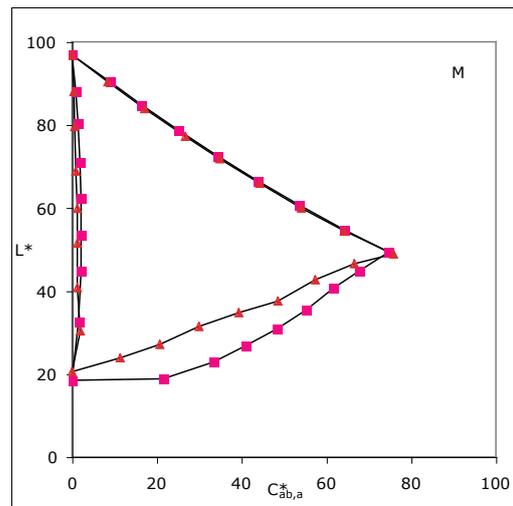
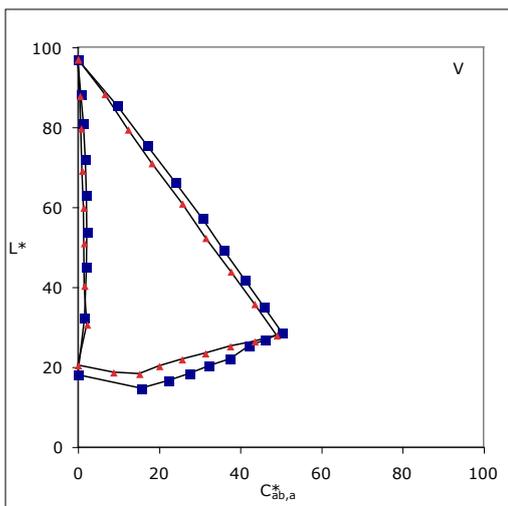
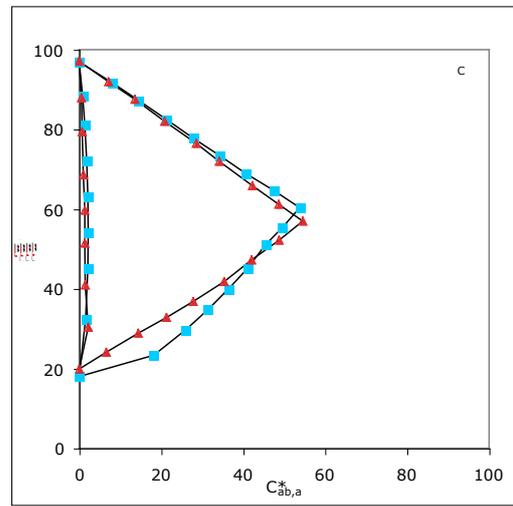
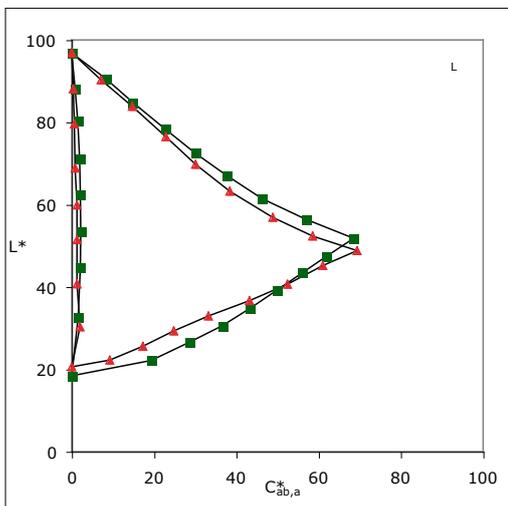
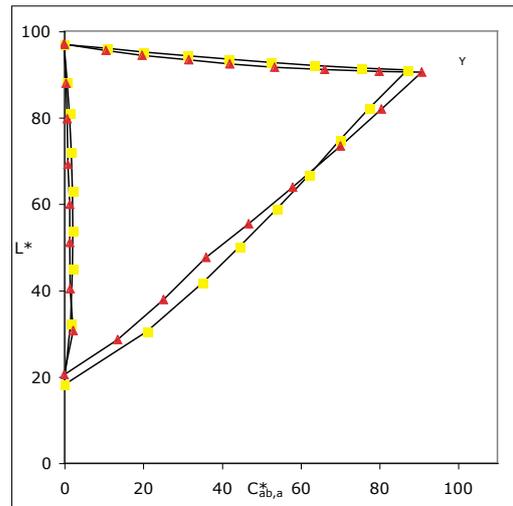
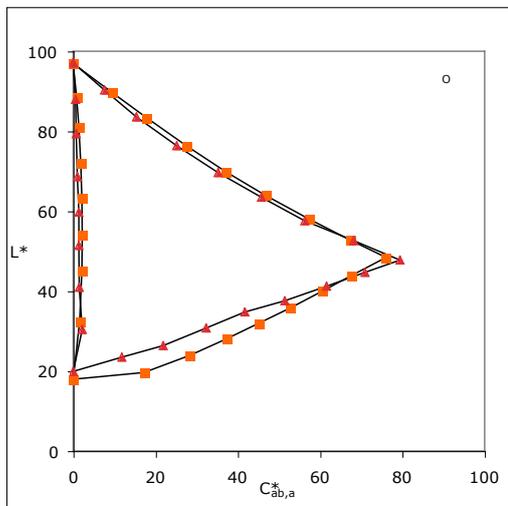


OYLCVM Bunttondreieck - linearisierte CMYn5* (VT=0.98) Separation



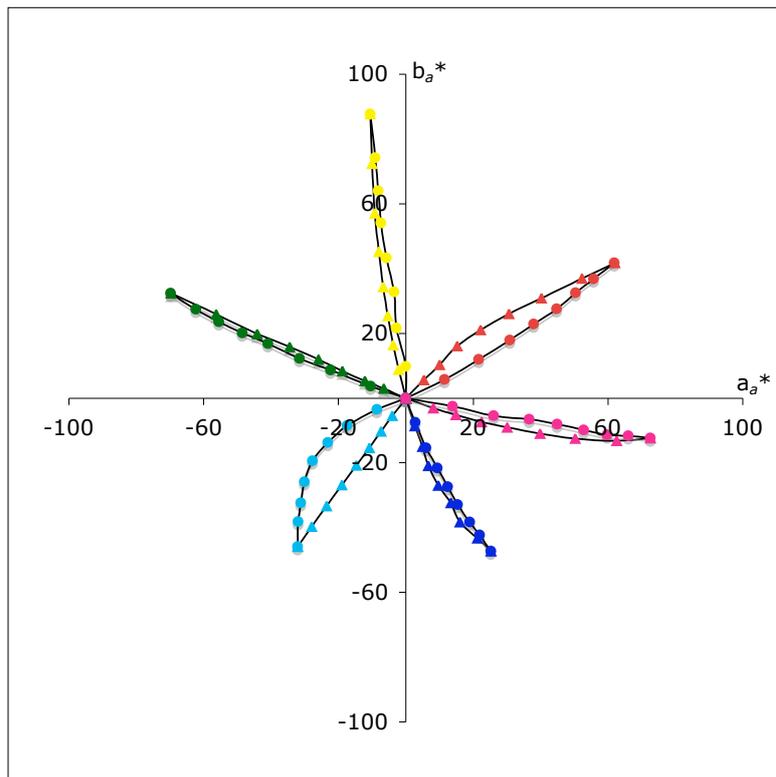
OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMYn5* Separation im Vergleich
 VT=1.0[□] und VT=0.98[△]

B. Diagramme Ausgabegerät Nr. 1

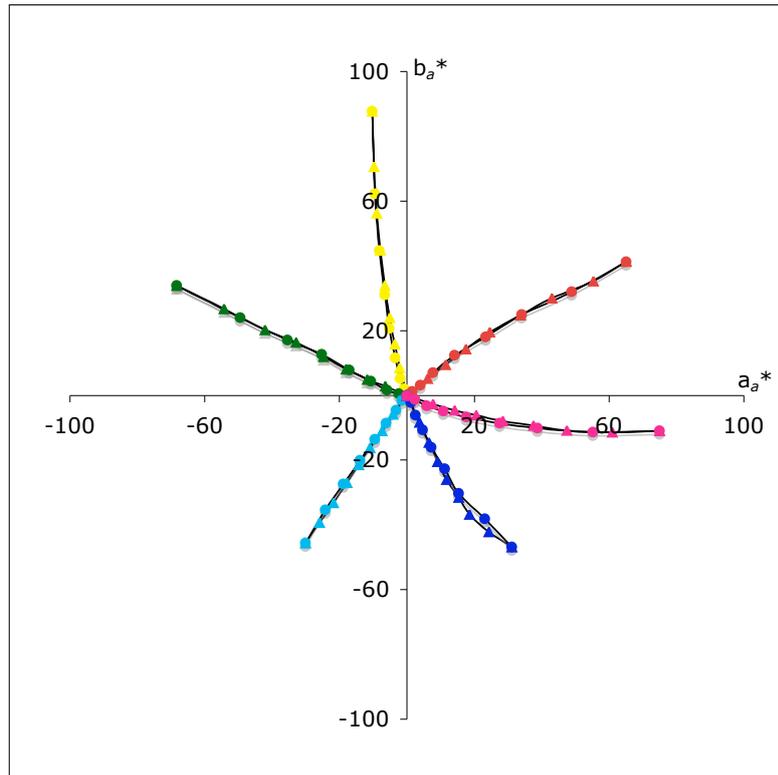


OYLCVM Bunttondreieck - Vergleich zwischen nicht linearisierter Erstausgabe[□] und linearisierter Zweitausgabe[△]

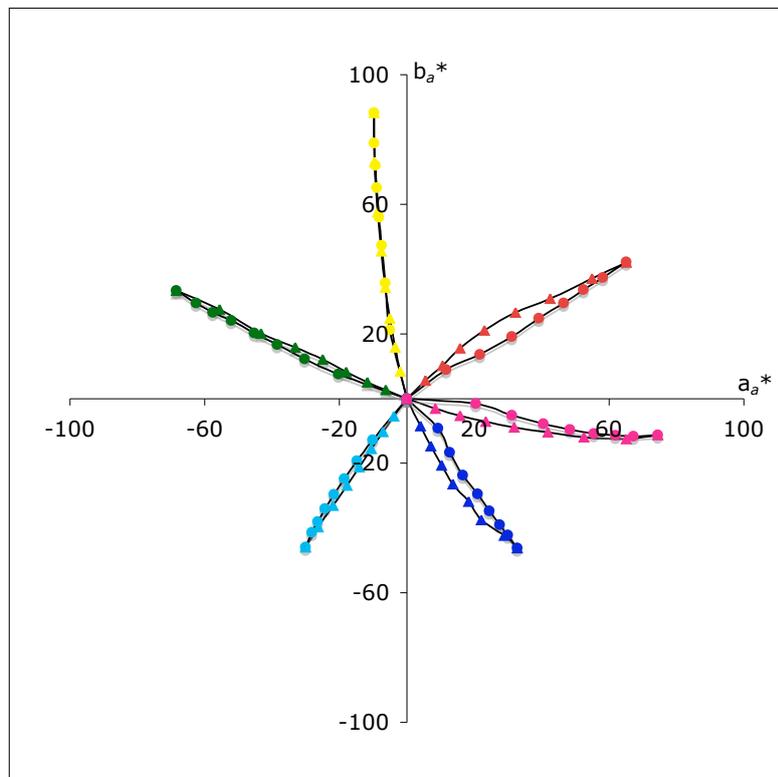
C. Diagramme Ausgabegerät Nr. 2



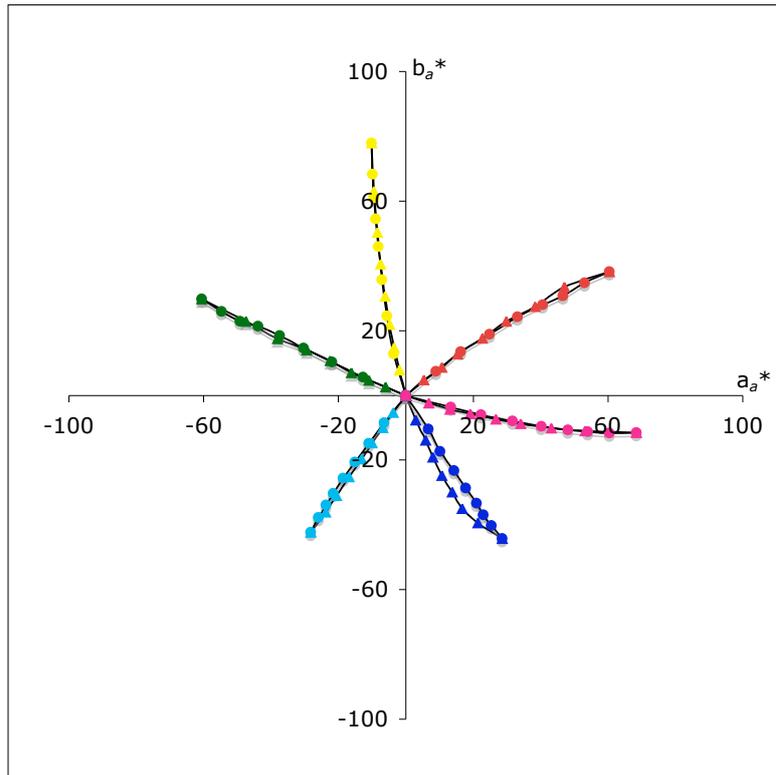
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMY0*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



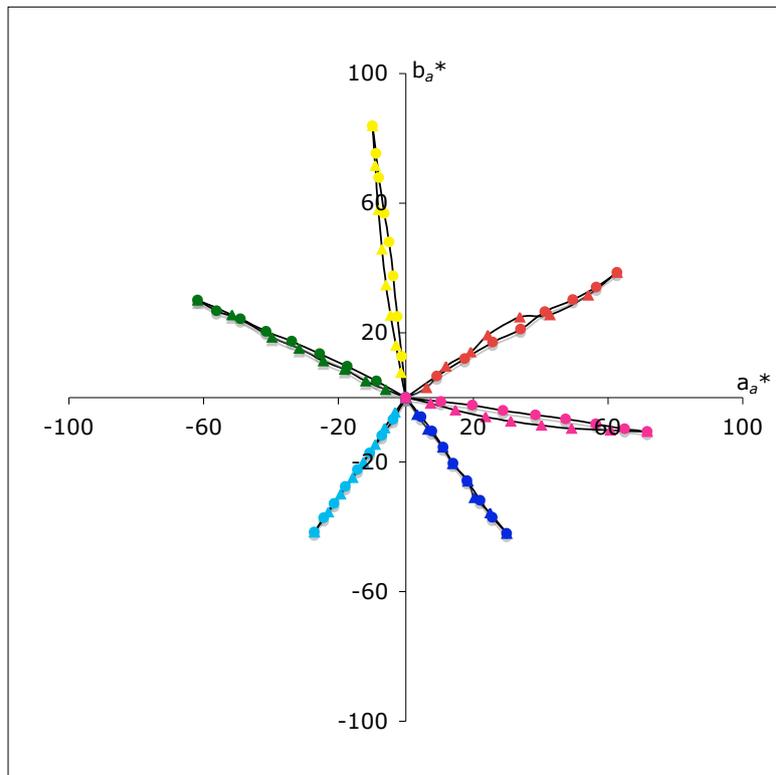
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn4*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn5*-Separation (VT=1.0). \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

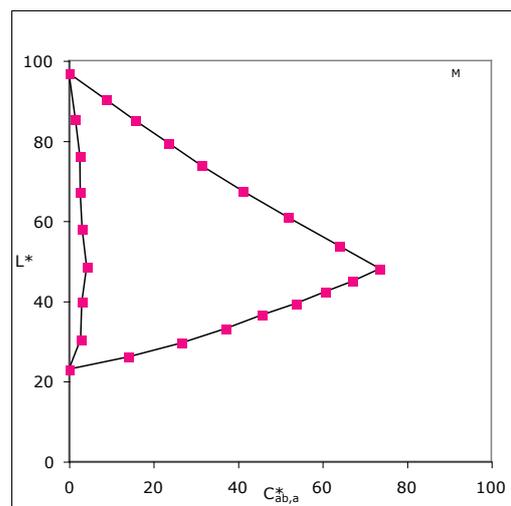
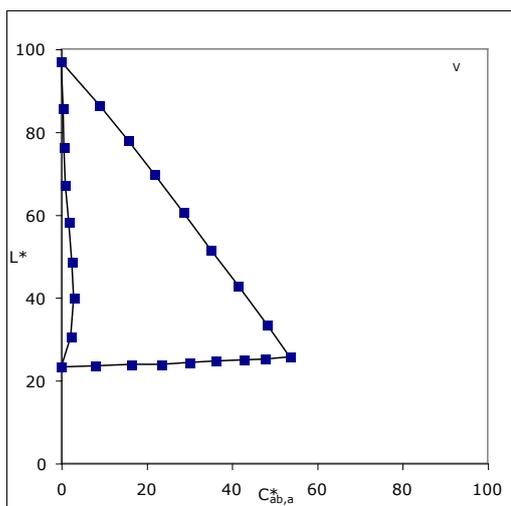
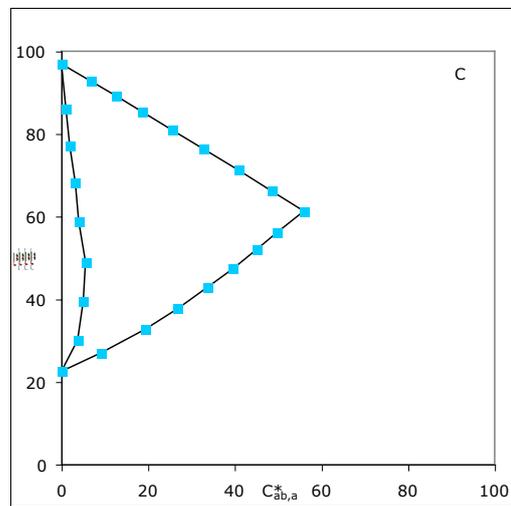
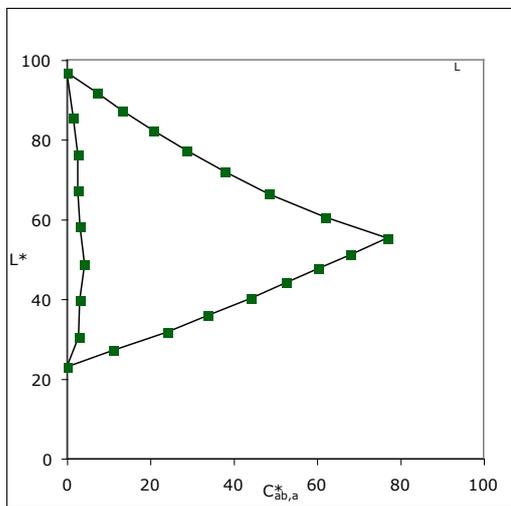
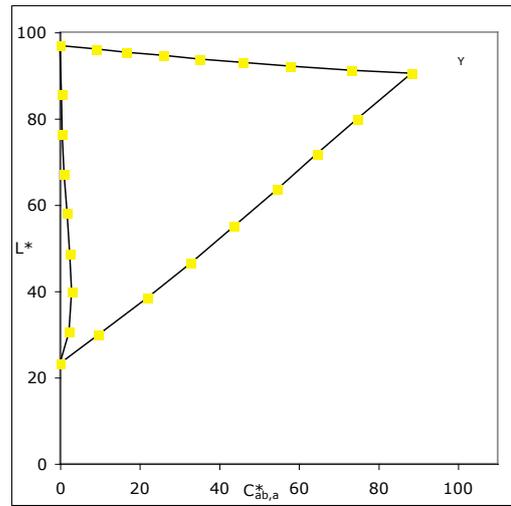
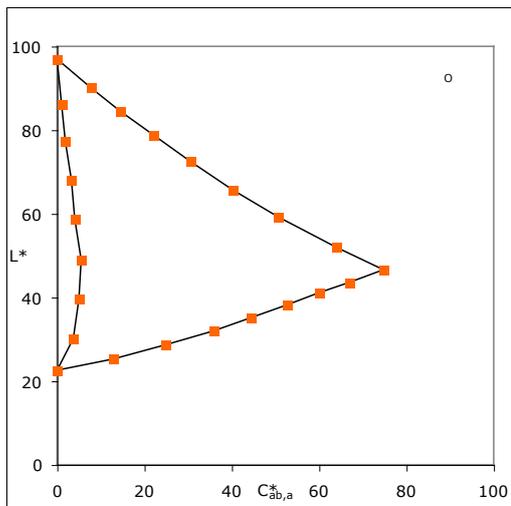


Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn5*-Separation (VT=0.92). \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

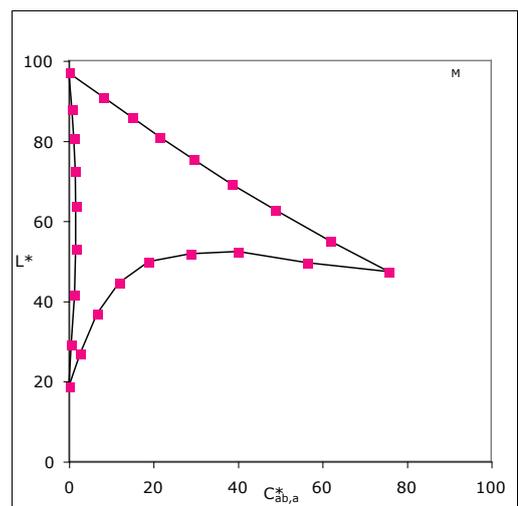
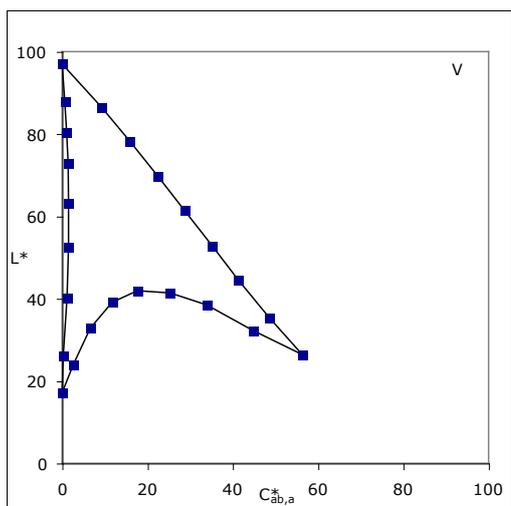
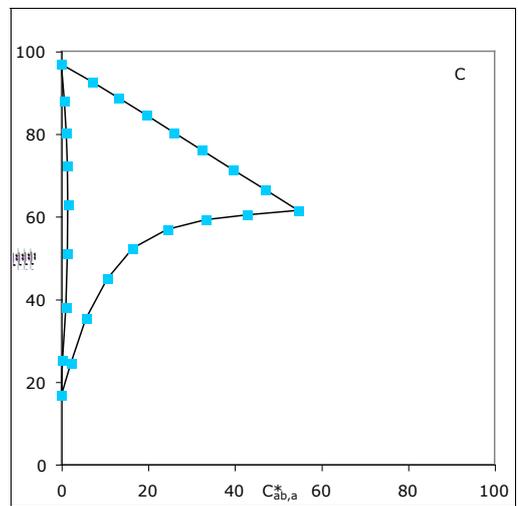
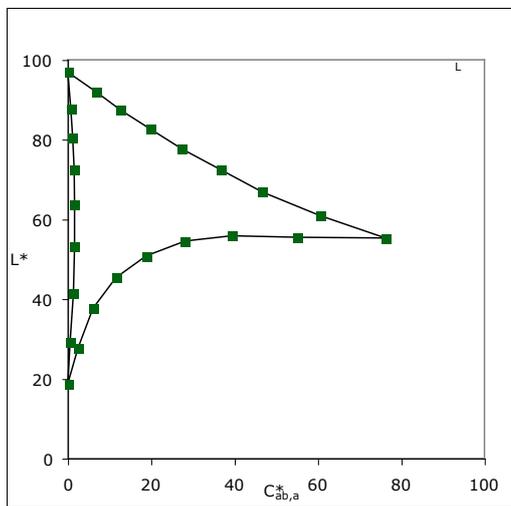
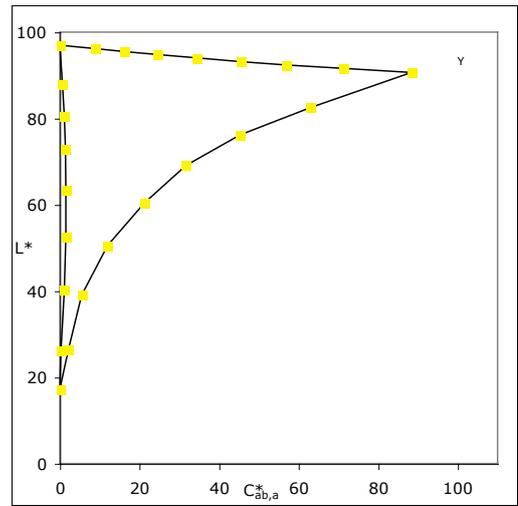
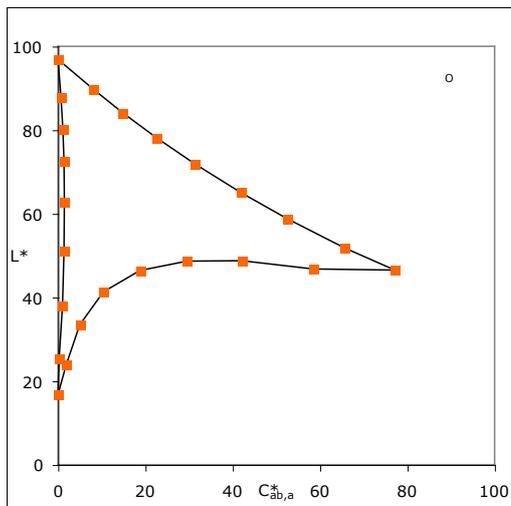


Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter CMYn5*-Separation (VT=0.92). \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

C. Diagramme Ausgabegerät Nr. 2

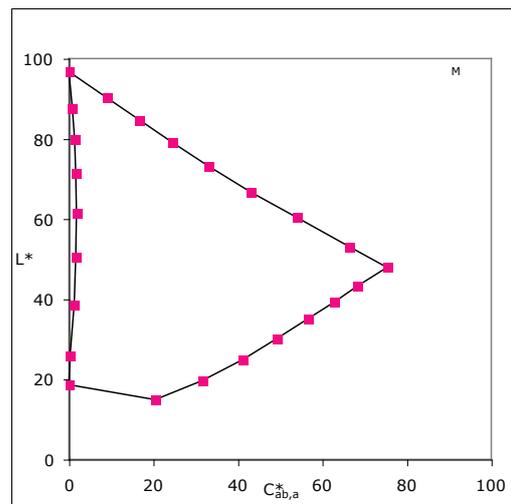
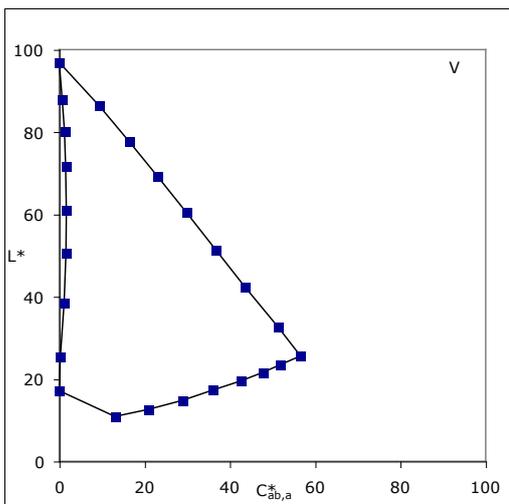
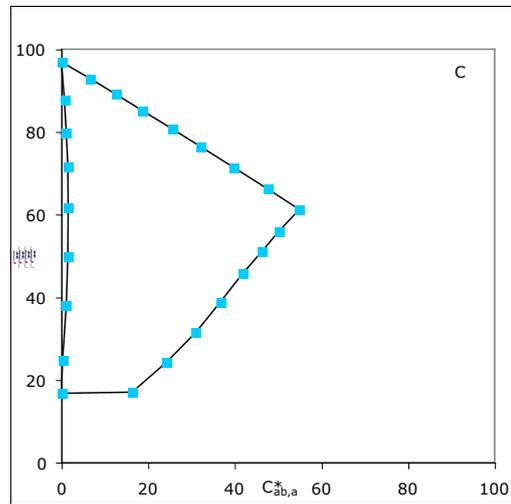
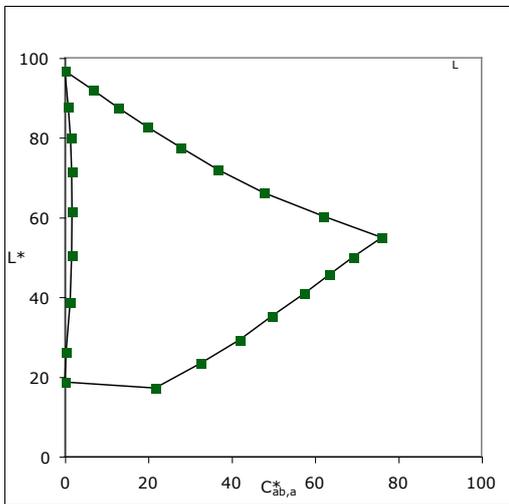
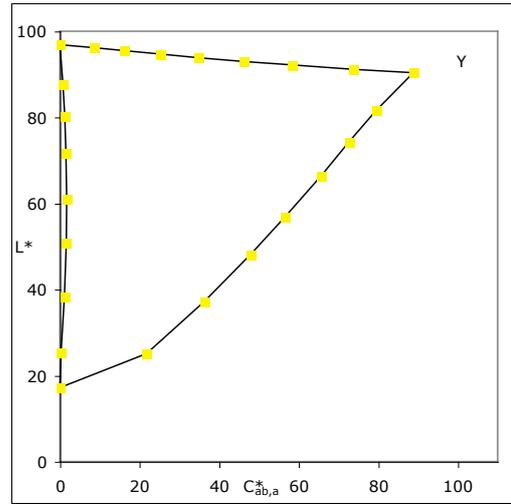
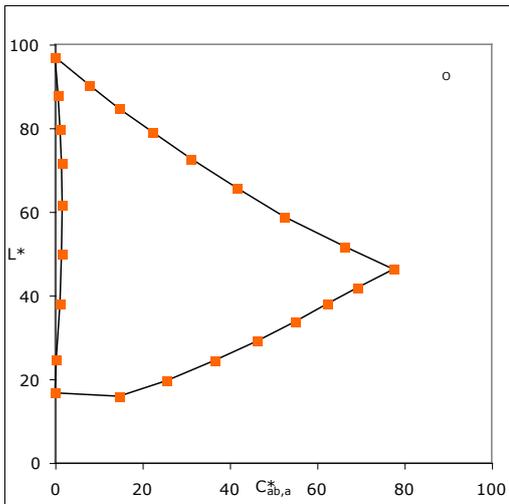


OYLCVM Bunttendreieck - nicht linearisierte CMY0*-Separation

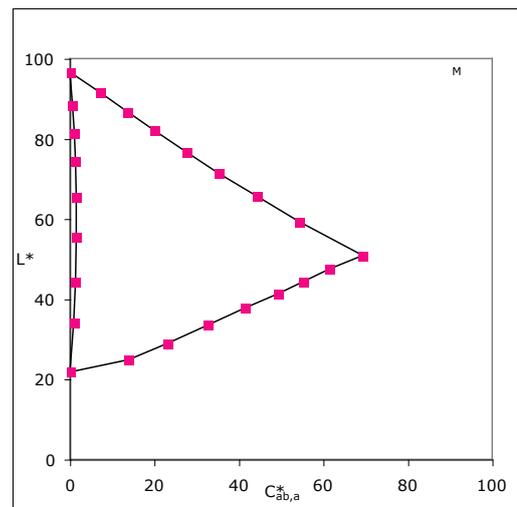
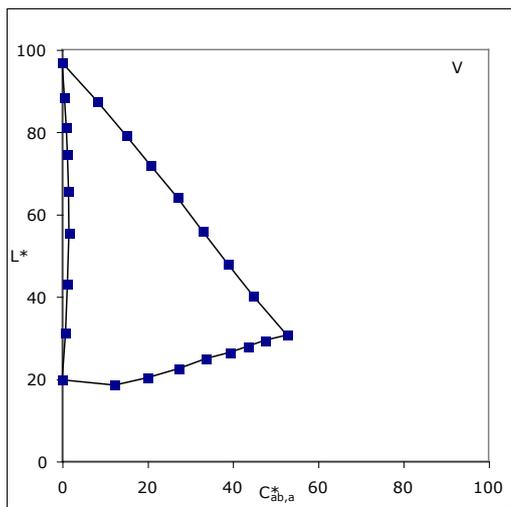
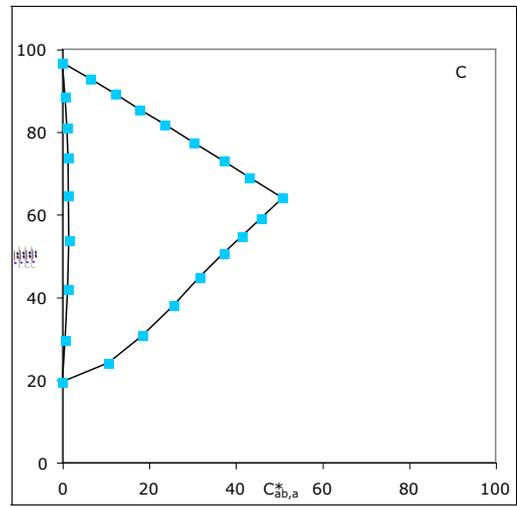
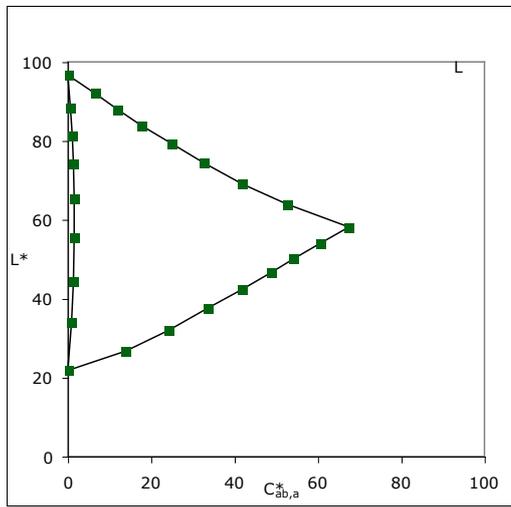
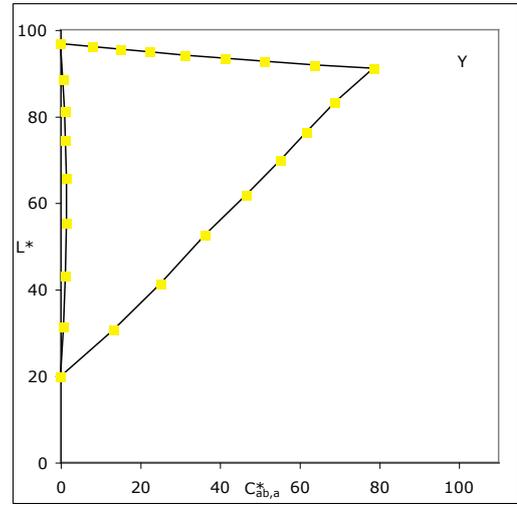
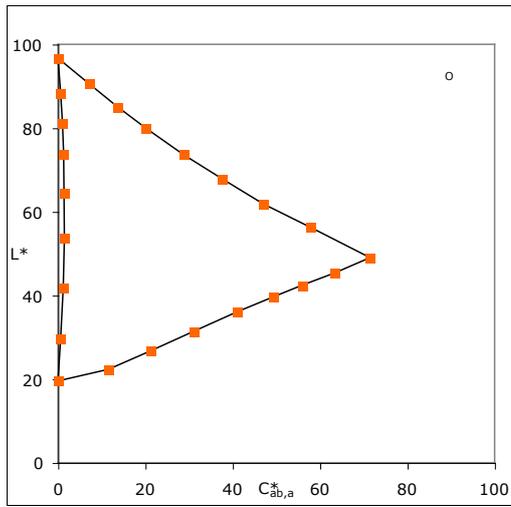


OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMYn4*-Separation

C. Diagramme Ausgabegerät Nr. 2

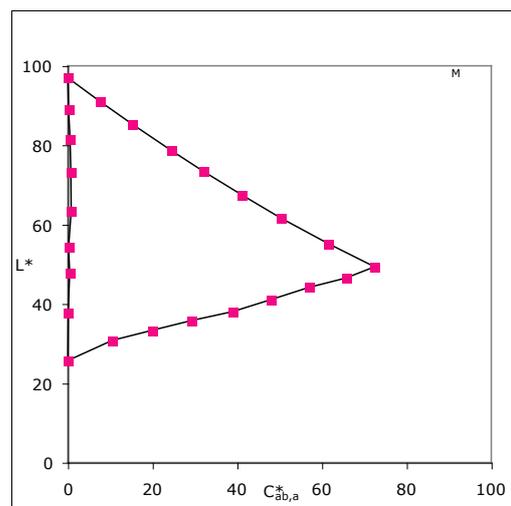
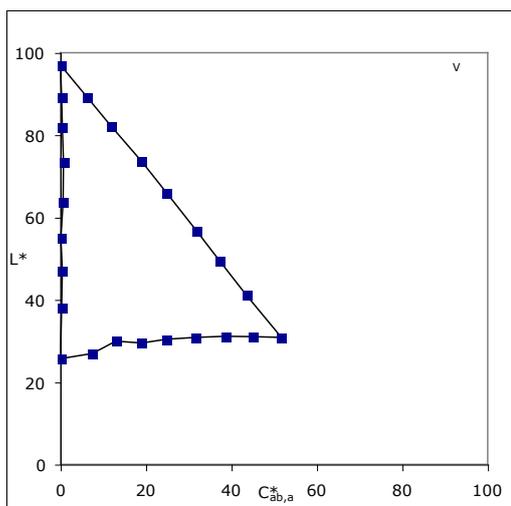
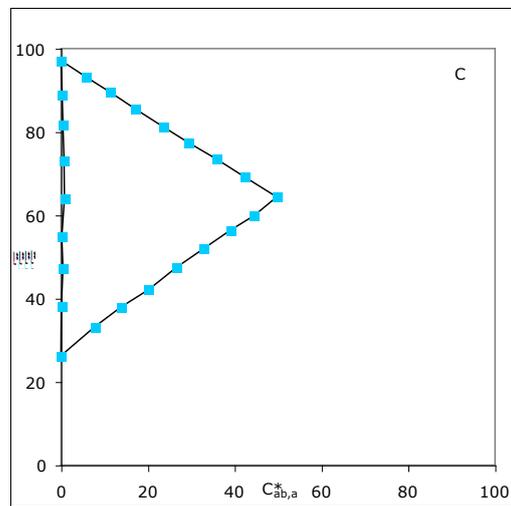
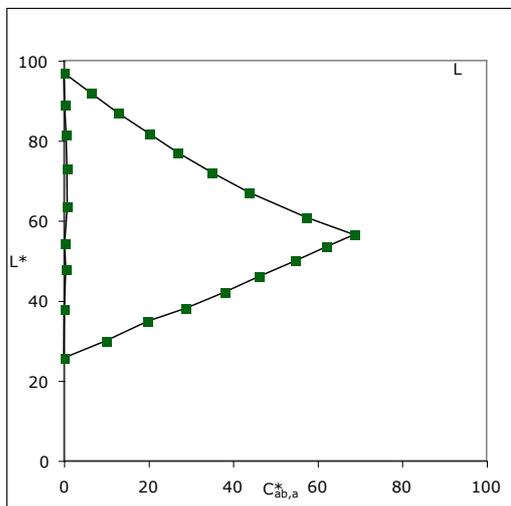
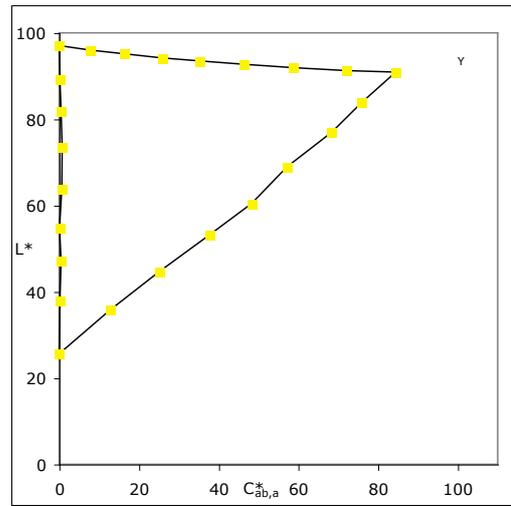
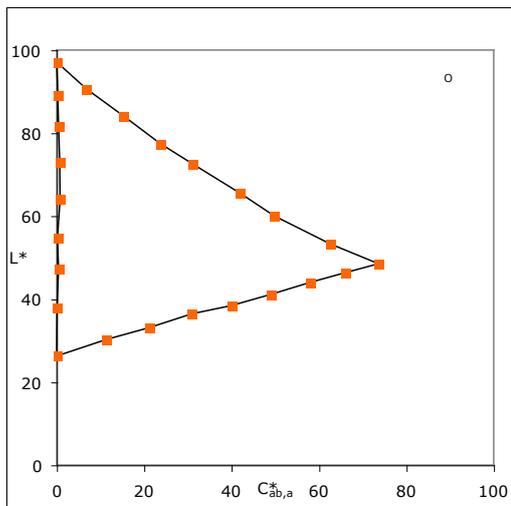


OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation (VT=1.0)

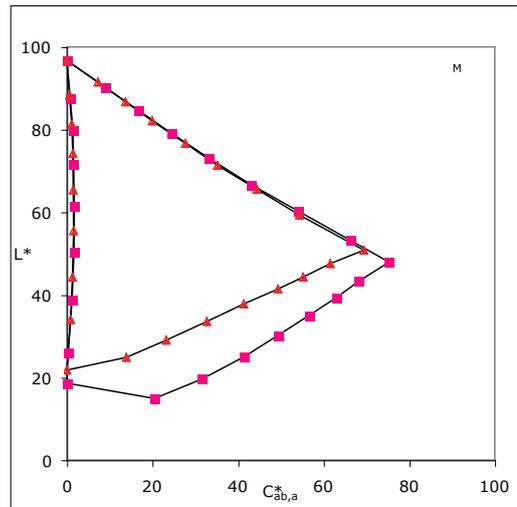
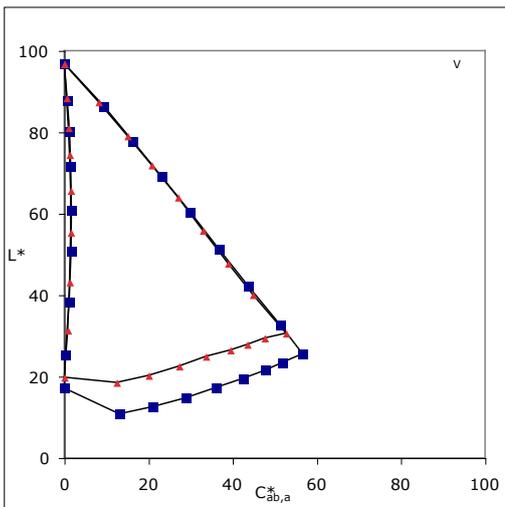
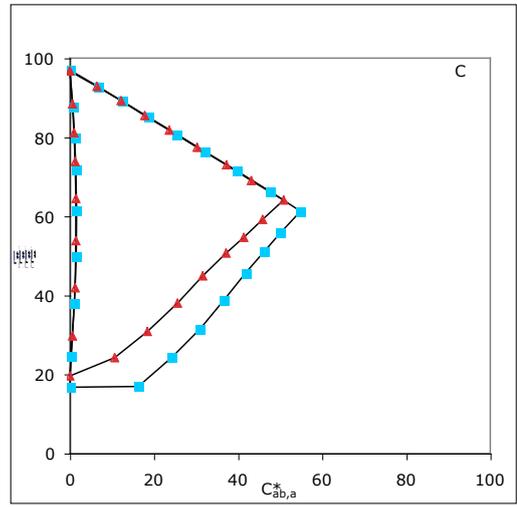
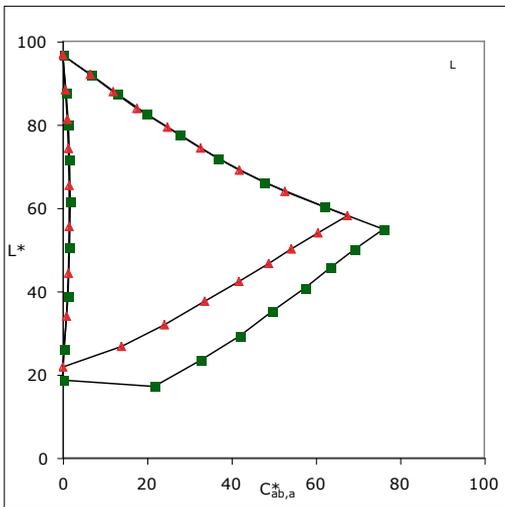
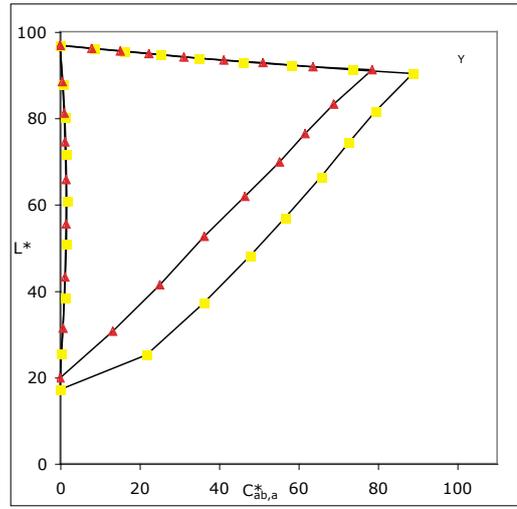
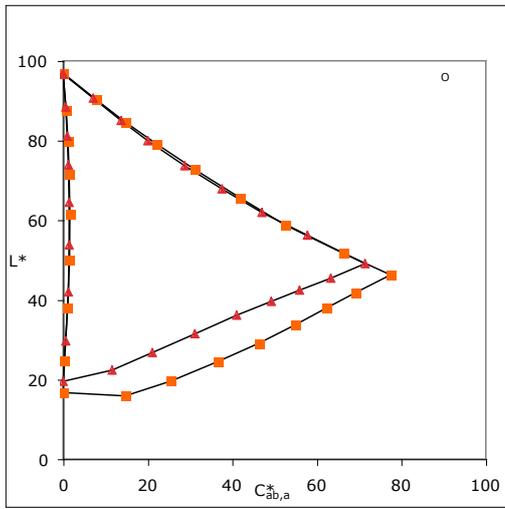


OYLCVM Bunttndreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation (VT=0.92)

C. Diagramme Ausgabegerät Nr. 2

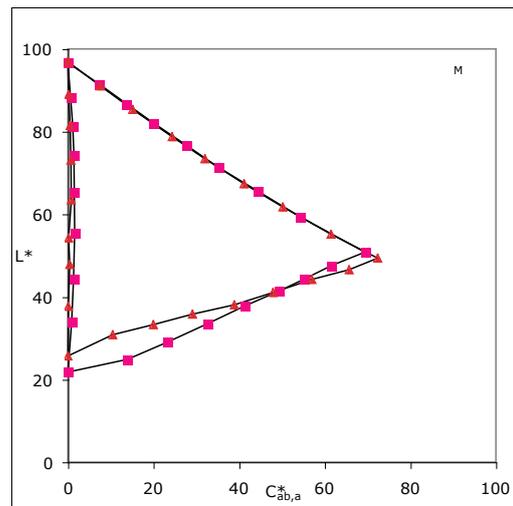
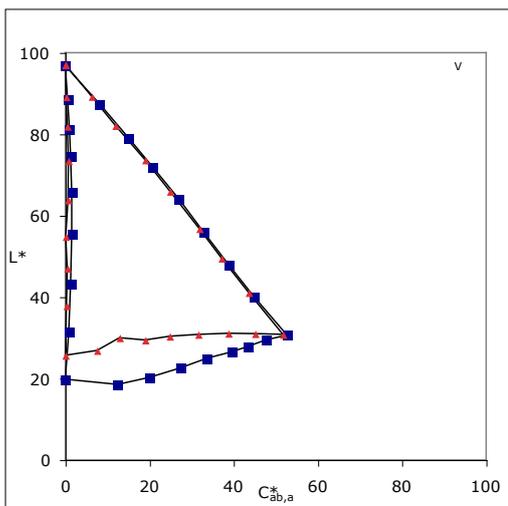
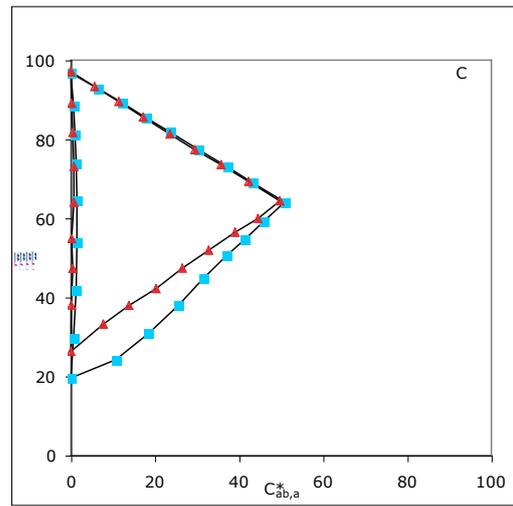
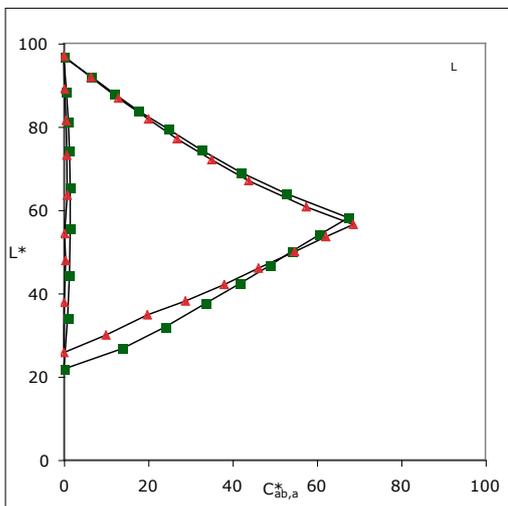
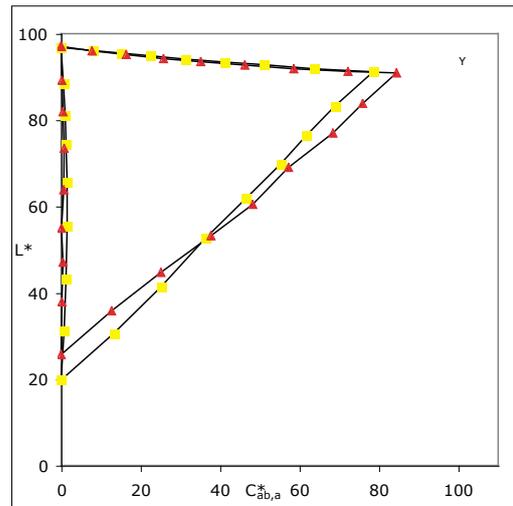
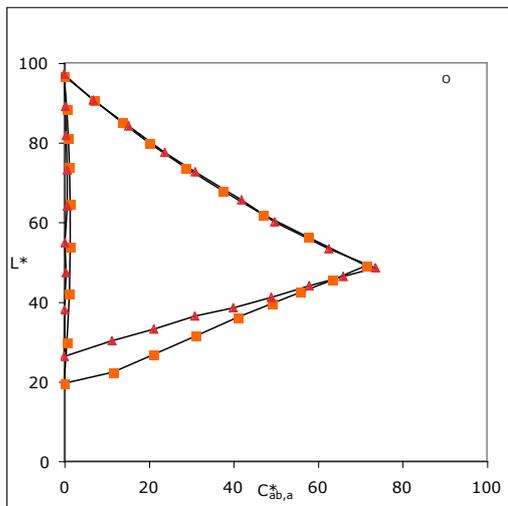


OYLCVM Bunttondreieck - linearisierte CMYn5-Separation* (VT=0.92)



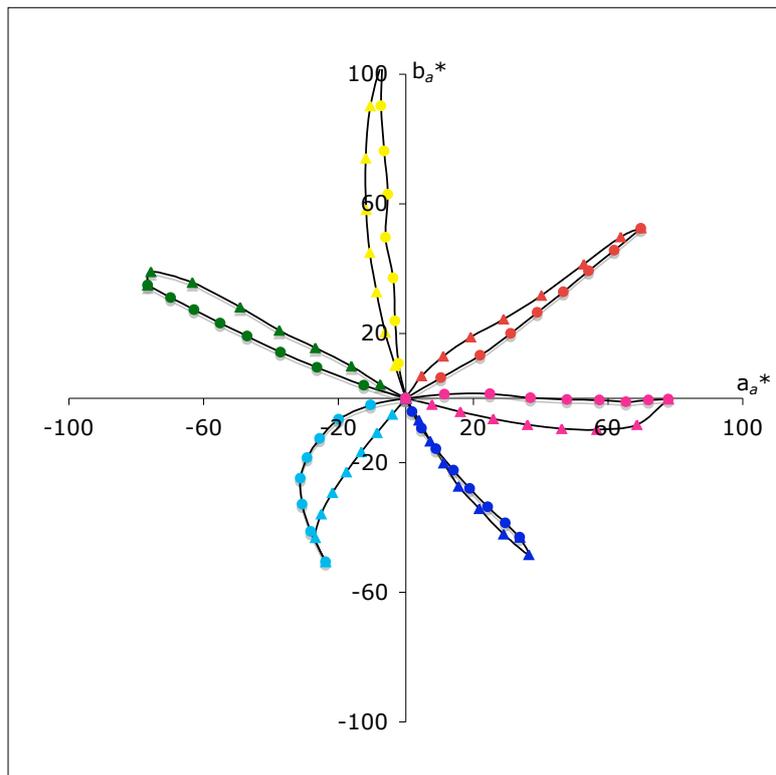
OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation im Vergleich
 VT=1.0[□] und VT=0.92[△]

C. Diagramme Ausgabegerät Nr. 2

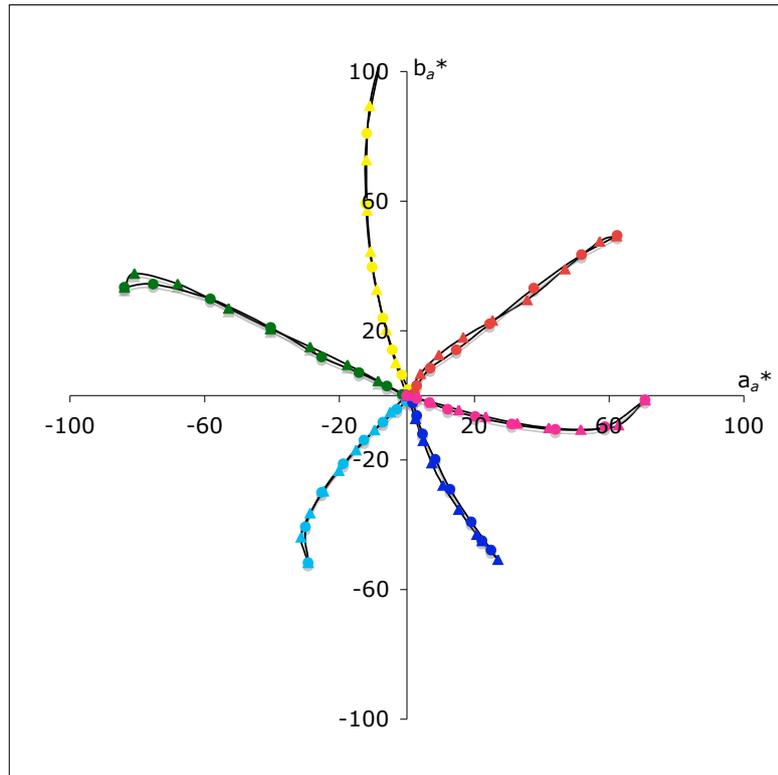


OYLCVM Bunttondreieck - Vergleich zwischen nicht linearisierter Erstausgabe[□] und linearisierter Zweitausgabe[△]

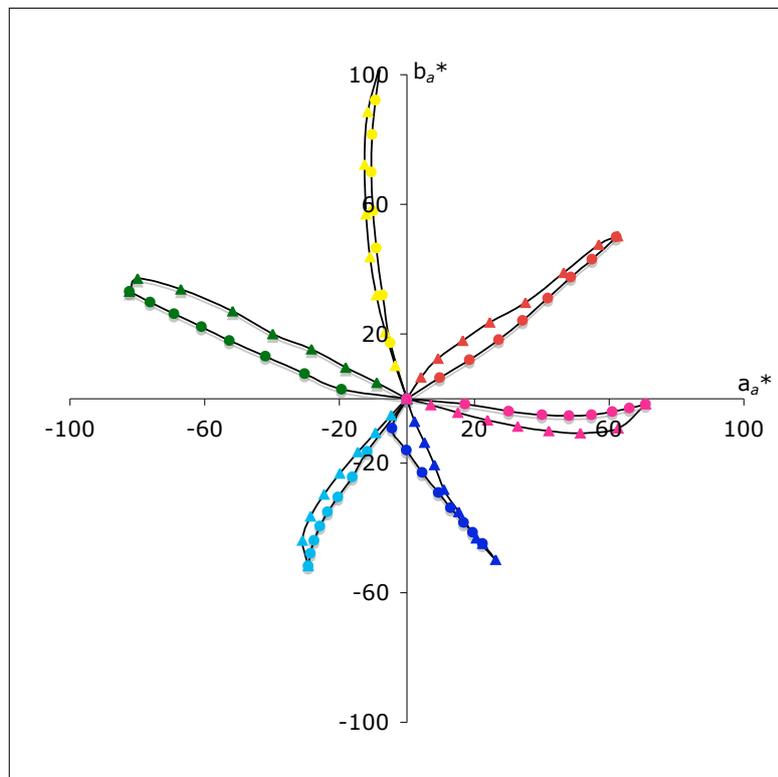
D. Diagramme Ausgabegerät Nr. 4



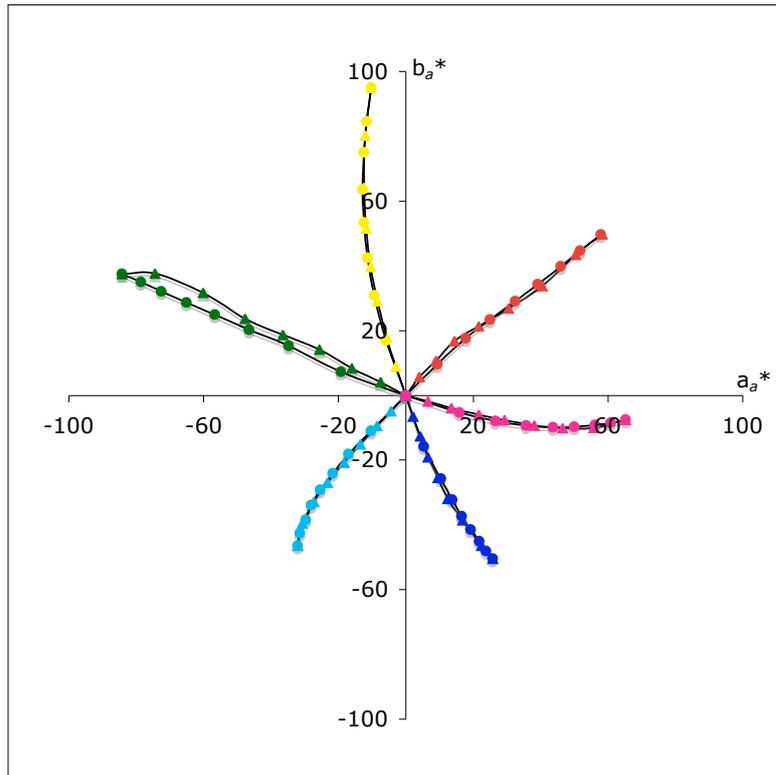
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMY0*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



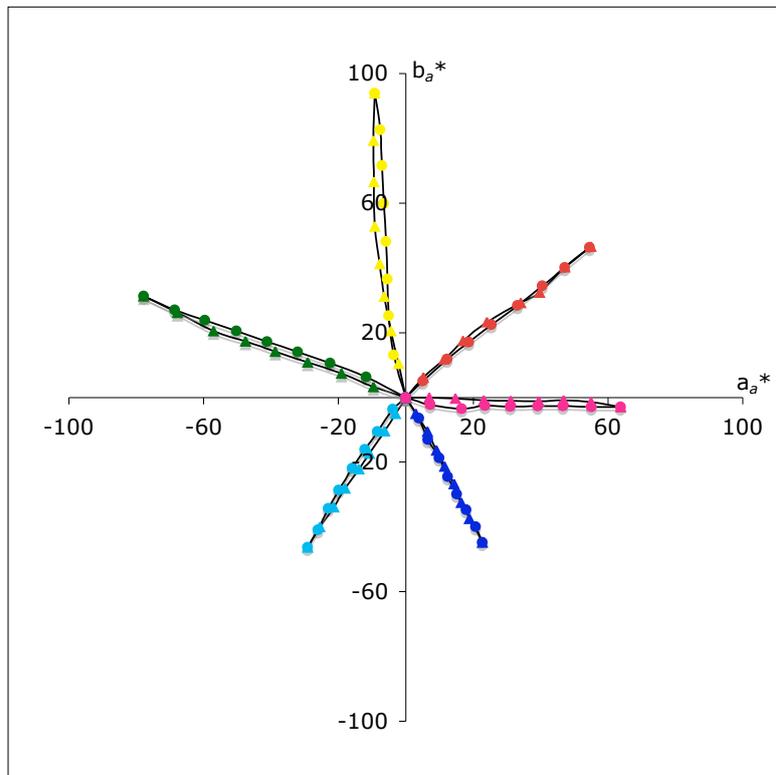
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn4*-Seperation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn5*-Seperation (VT=1.0). \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

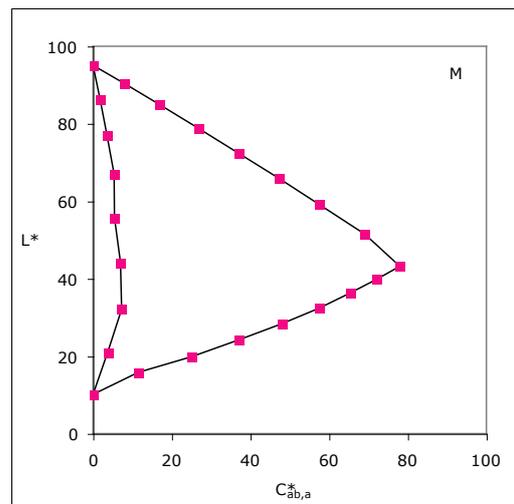
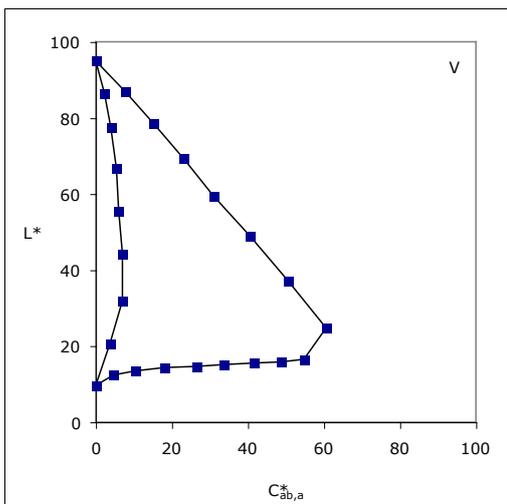
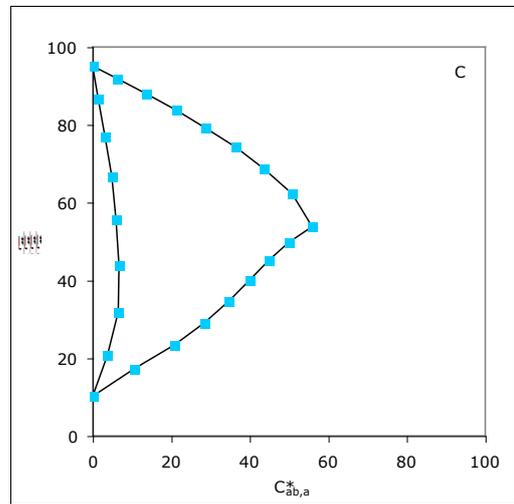
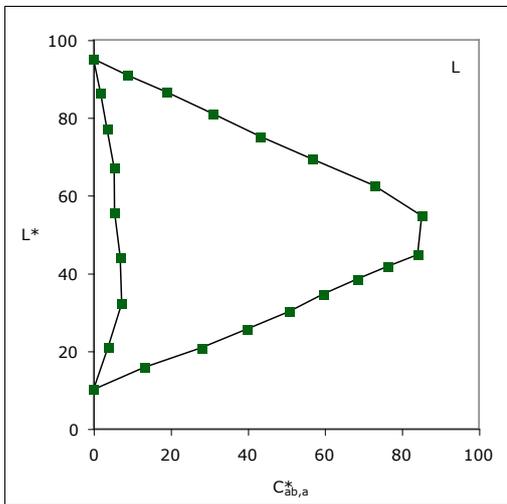
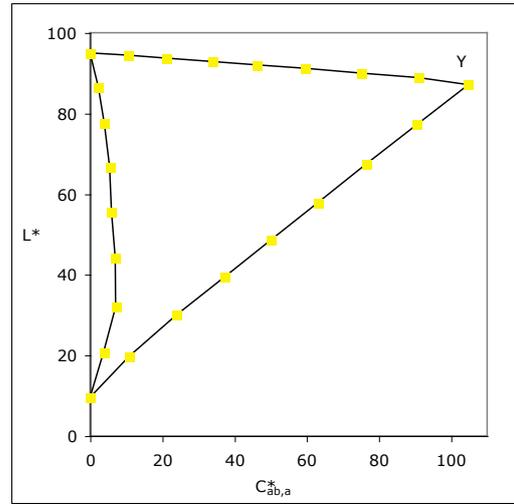
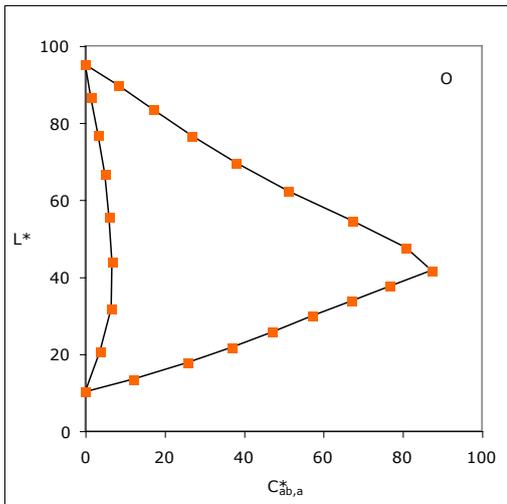


Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn5*-Separation (VT=0.92). \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

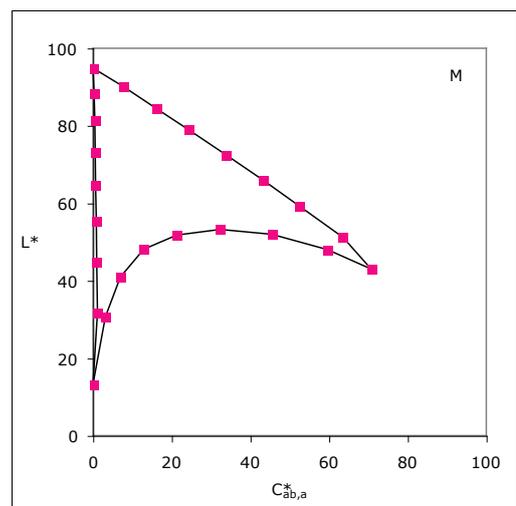
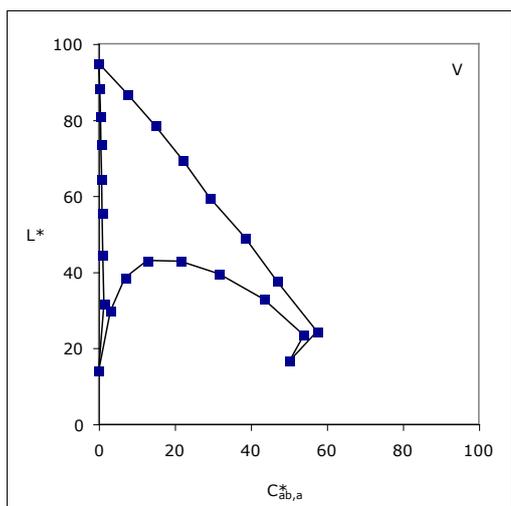
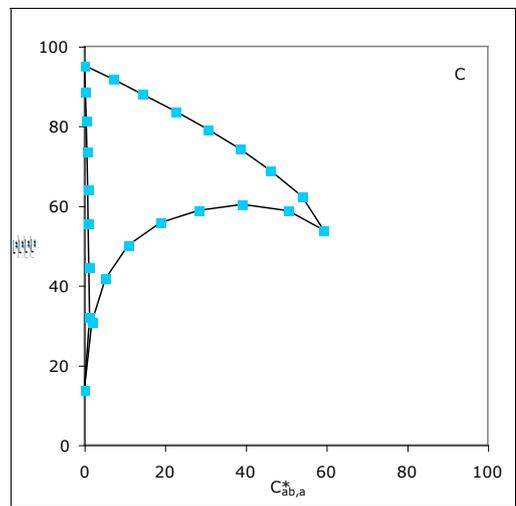
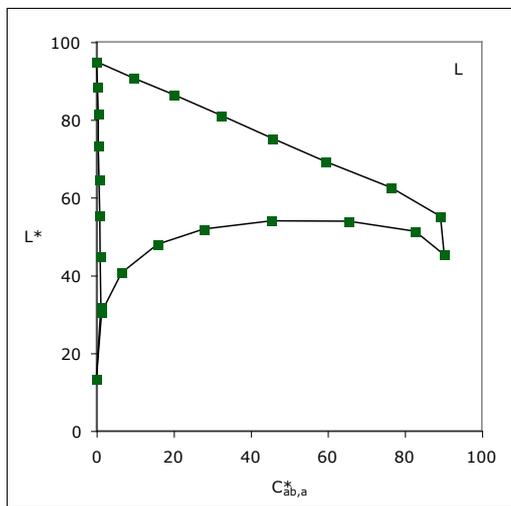
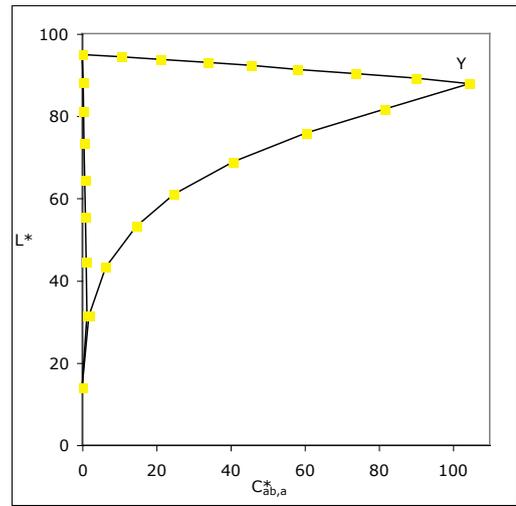
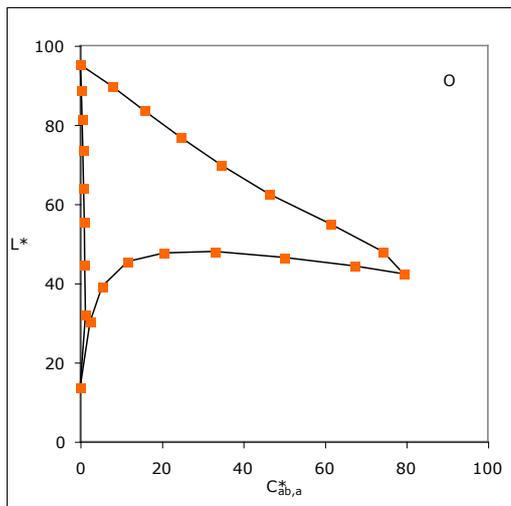


Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter CMYn5*-Separation (VT=0.92). \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

D. Diagramme Ausgabegerät Nr. 4

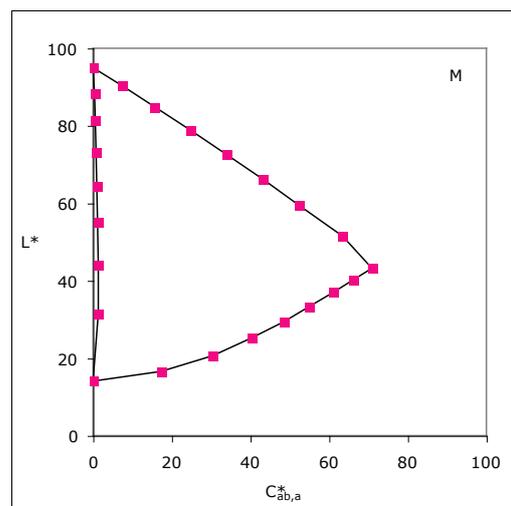
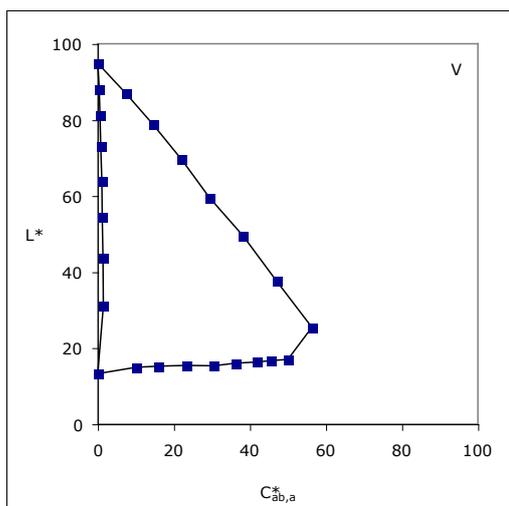
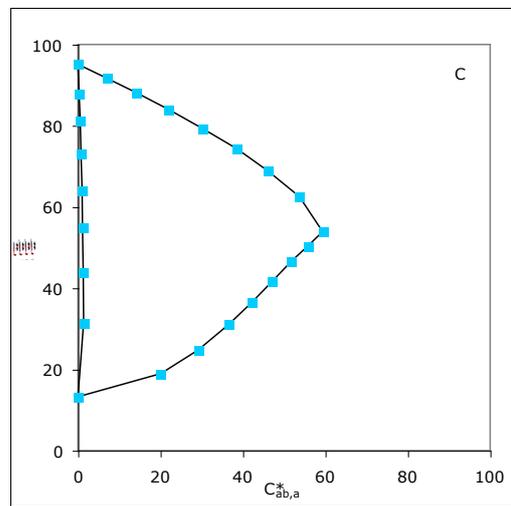
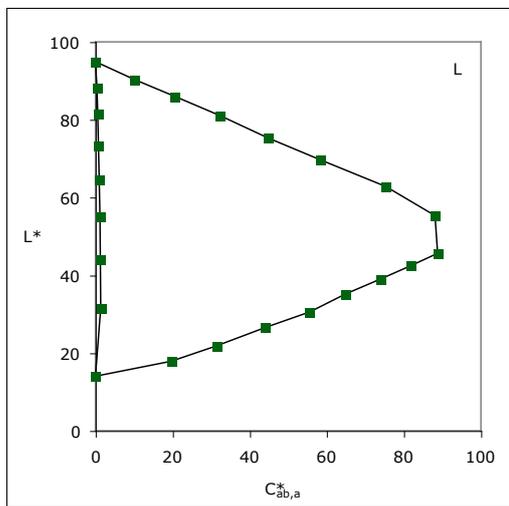
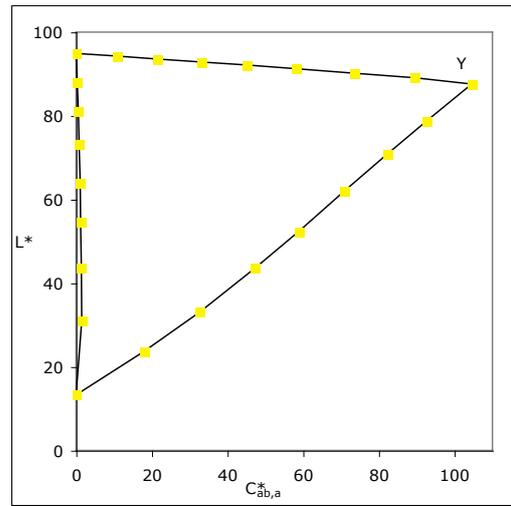
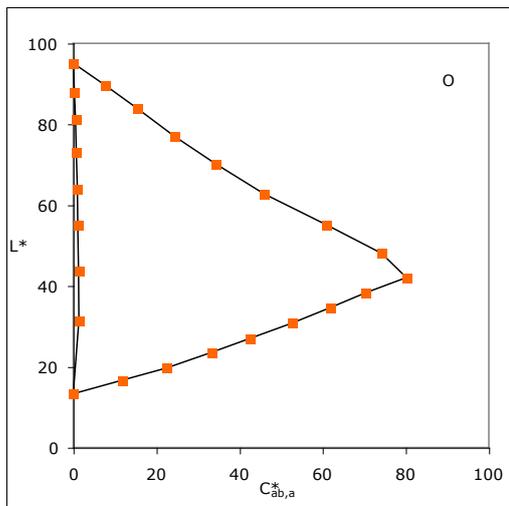


OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMY0*-Separation

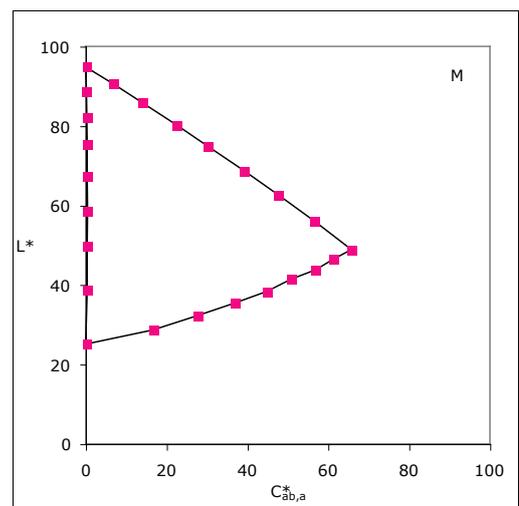
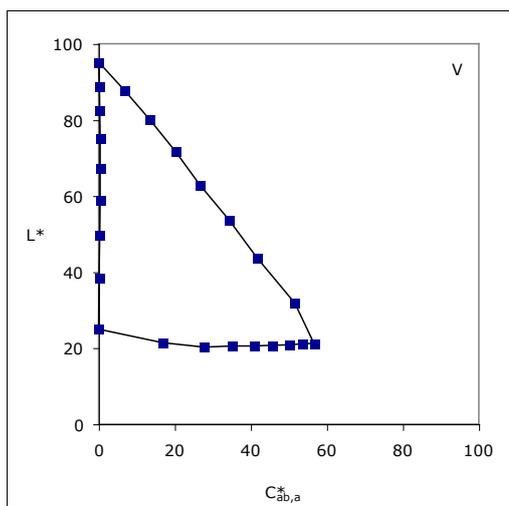
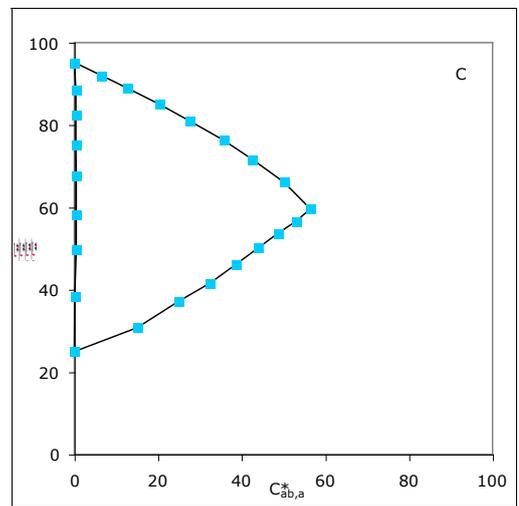
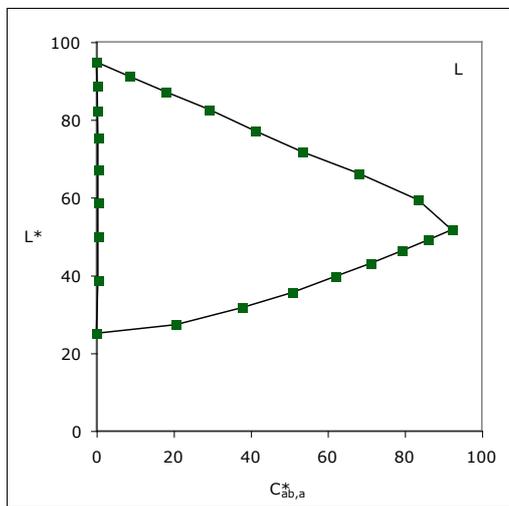
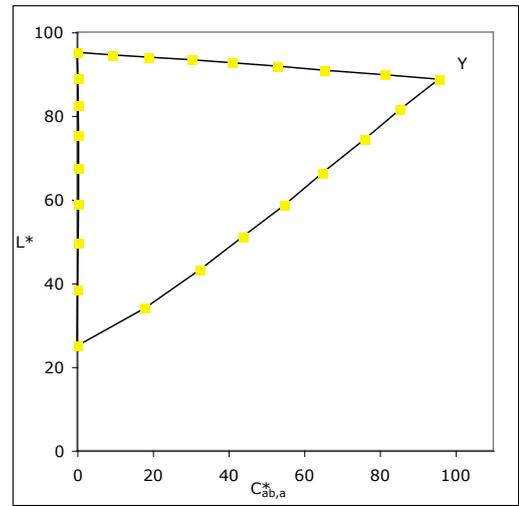
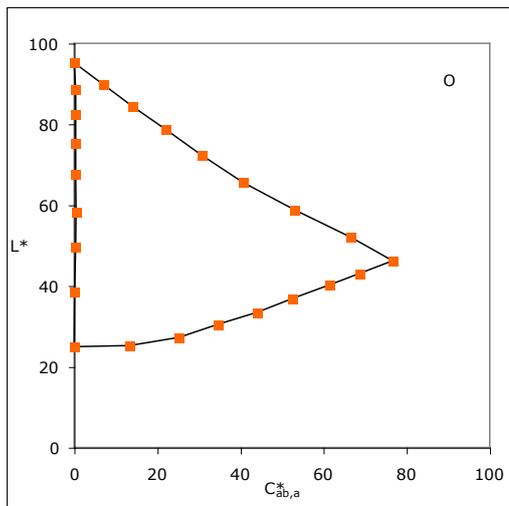


OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMYn4*-Separation

D. Diagramme Ausgabegerät Nr. 4

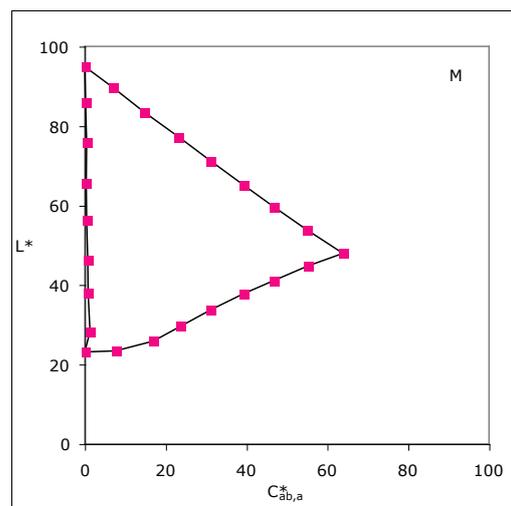
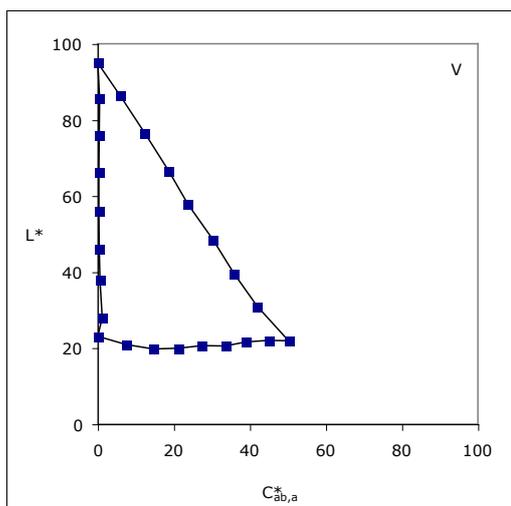
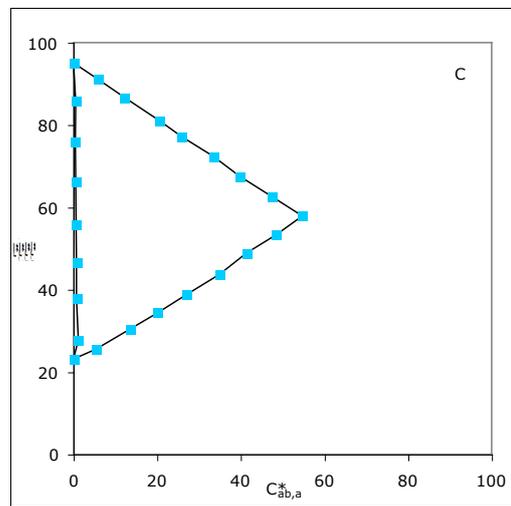
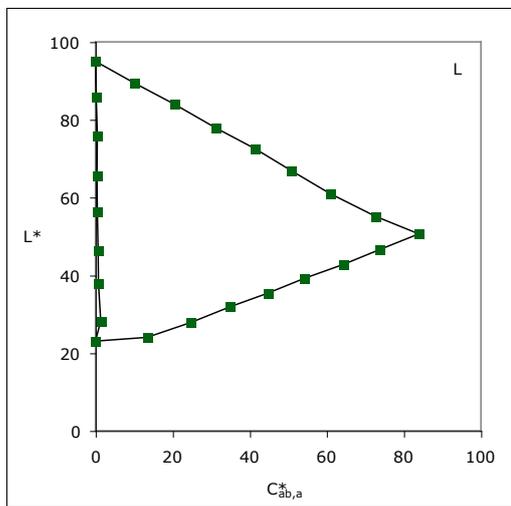
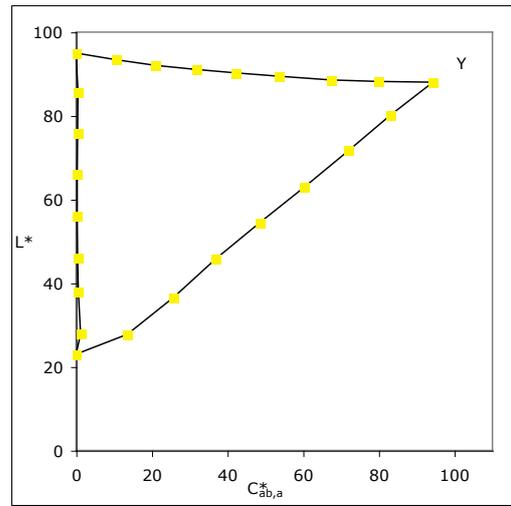
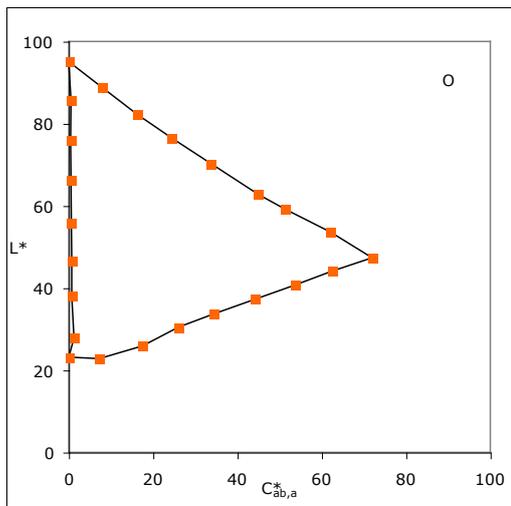


OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation (VT=1.0)

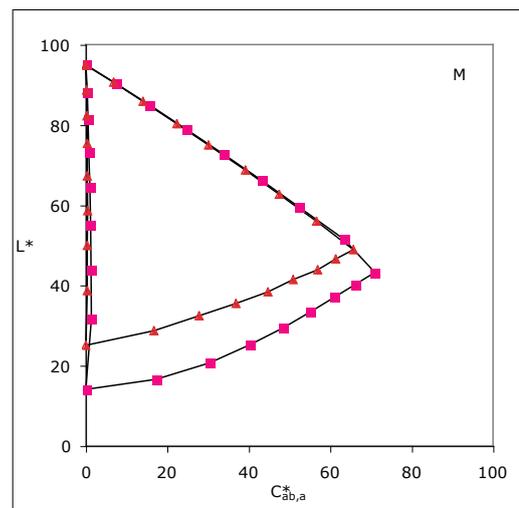
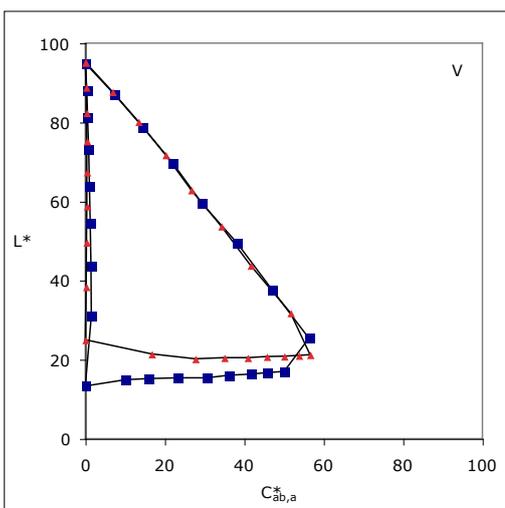
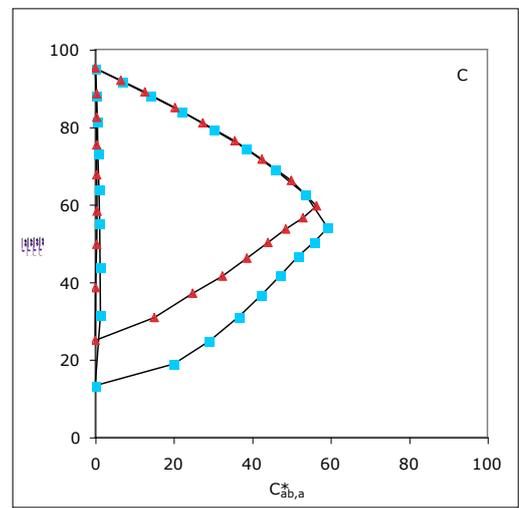
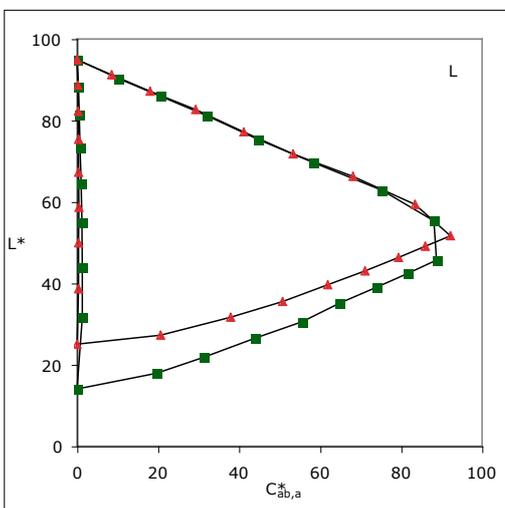
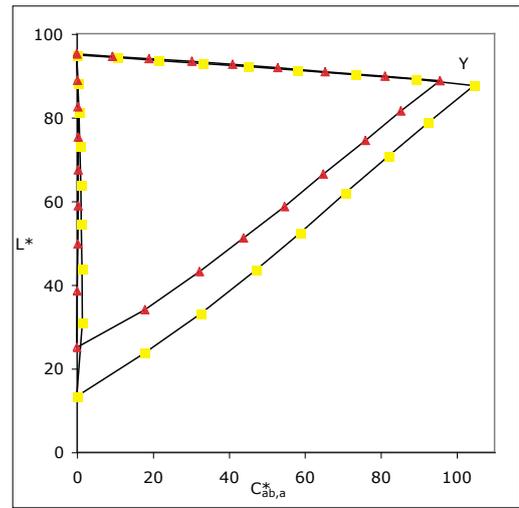
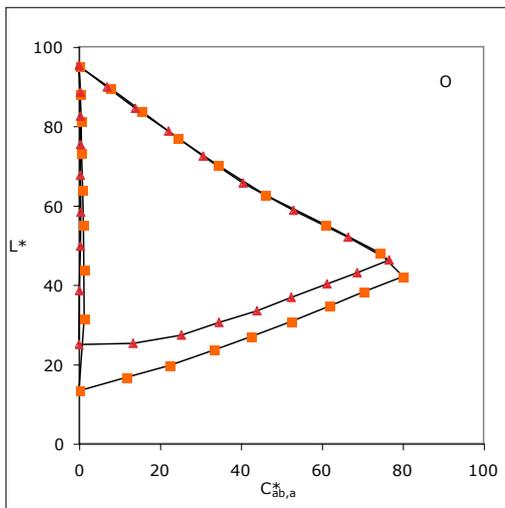


OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation (VT=0.92)

D. Diagramme Ausgabegerät Nr. 4

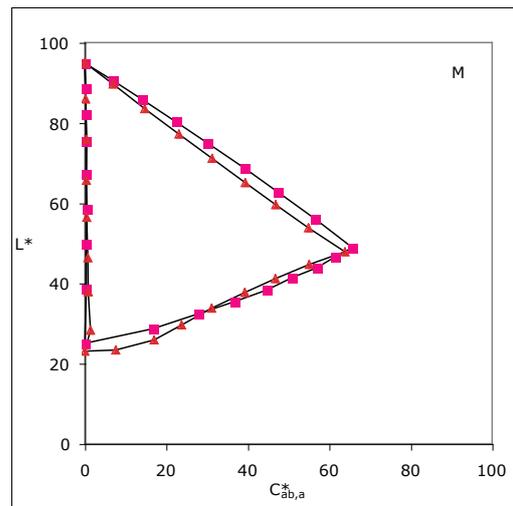
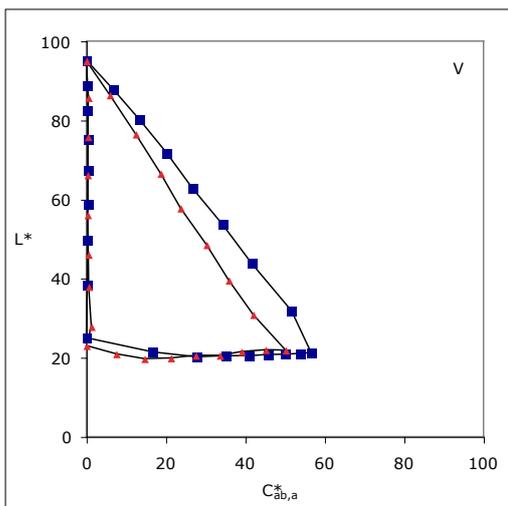
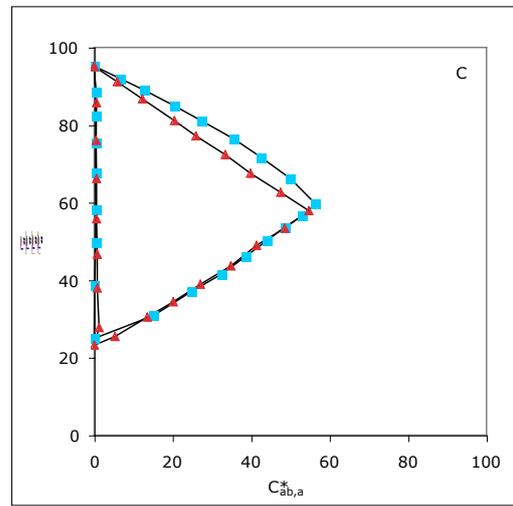
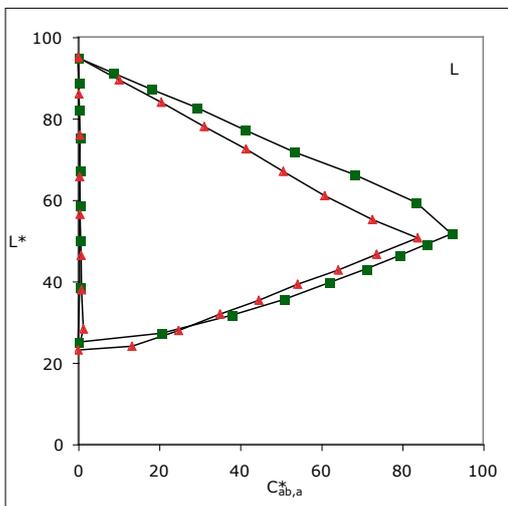
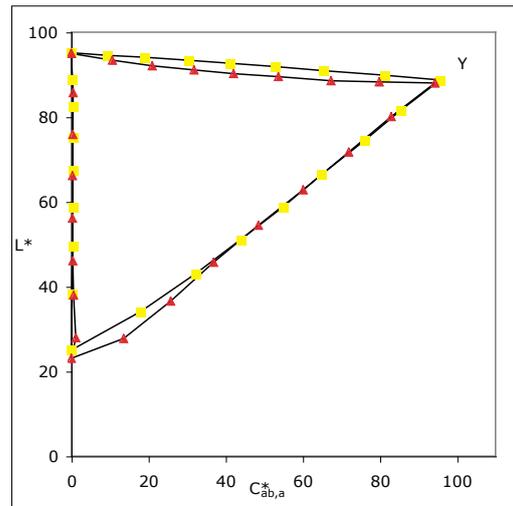
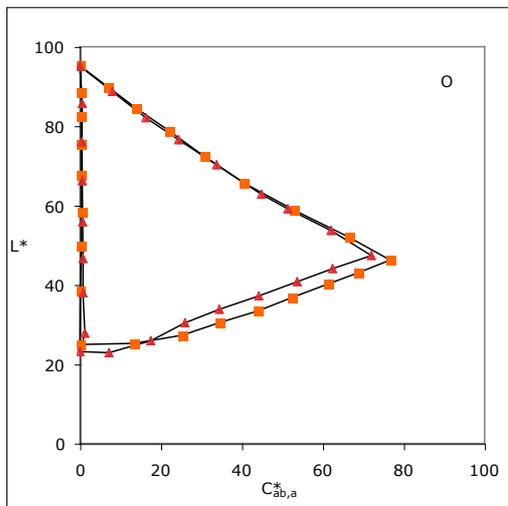


OYLCVM Bunttondreieck - linearisierte CMYn5*-Seperation (VT=0.92)



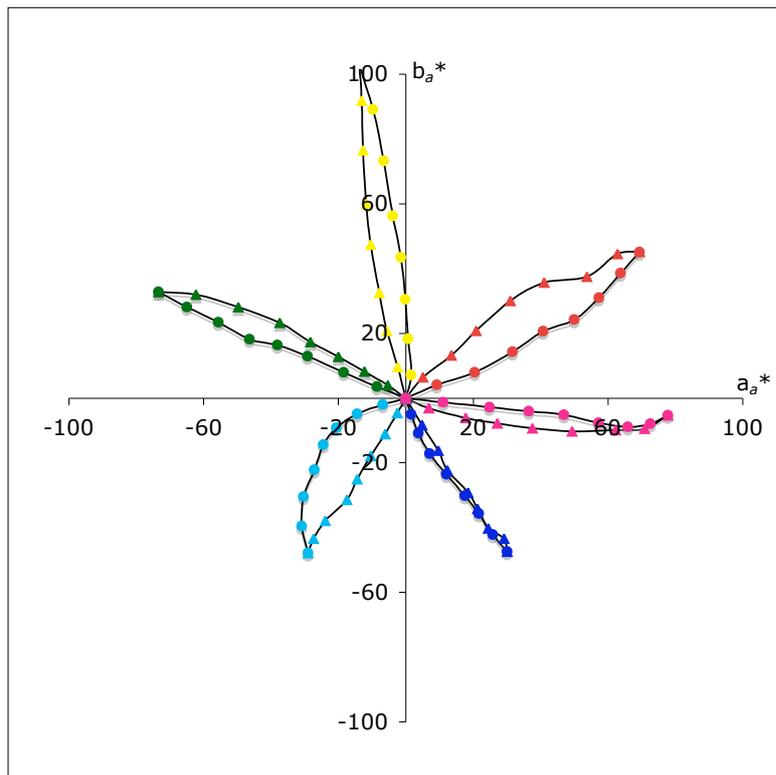
OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation im Vergleich
 VT=1.0[□] und VT=0.92[△]

D. Diagramme Ausgabegerät Nr. 4

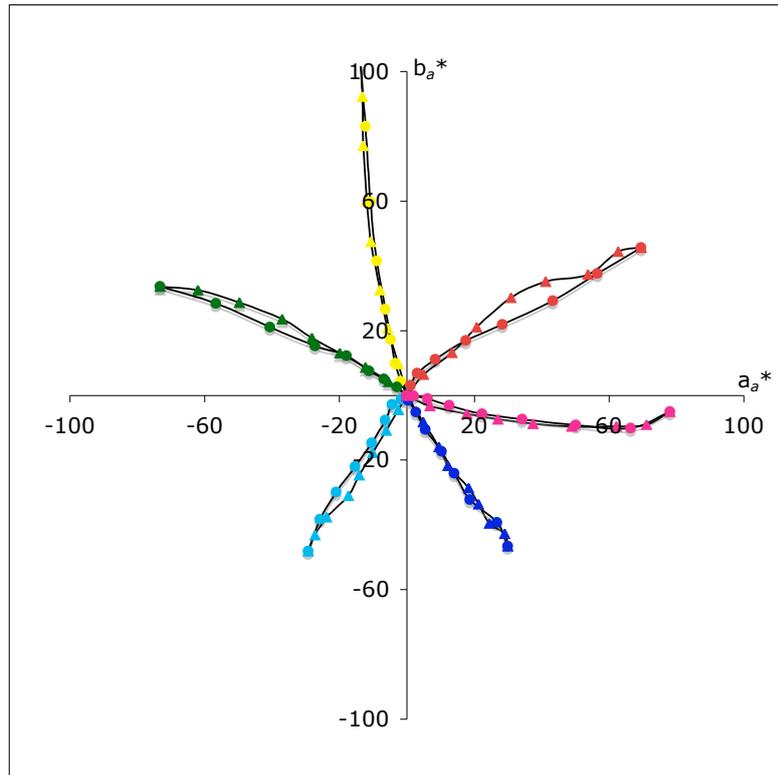


OYLCVM Bunttendreieck - Vergleich zwischen nicht linearisierter Erstausgabe[□] und linearisierter Zweitausgabe[△]

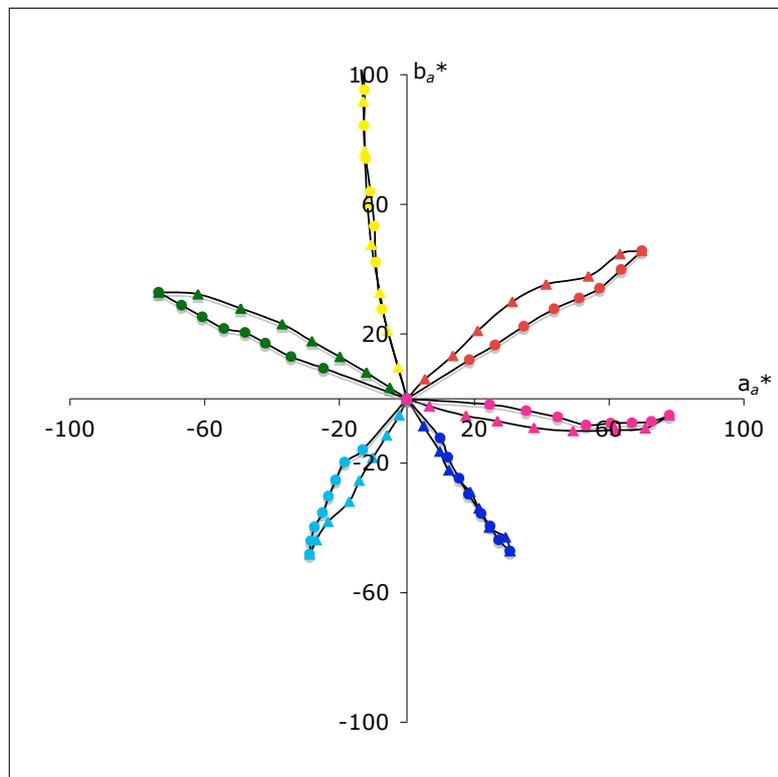
E. Diagramme Ausgabegerät Nr. 5



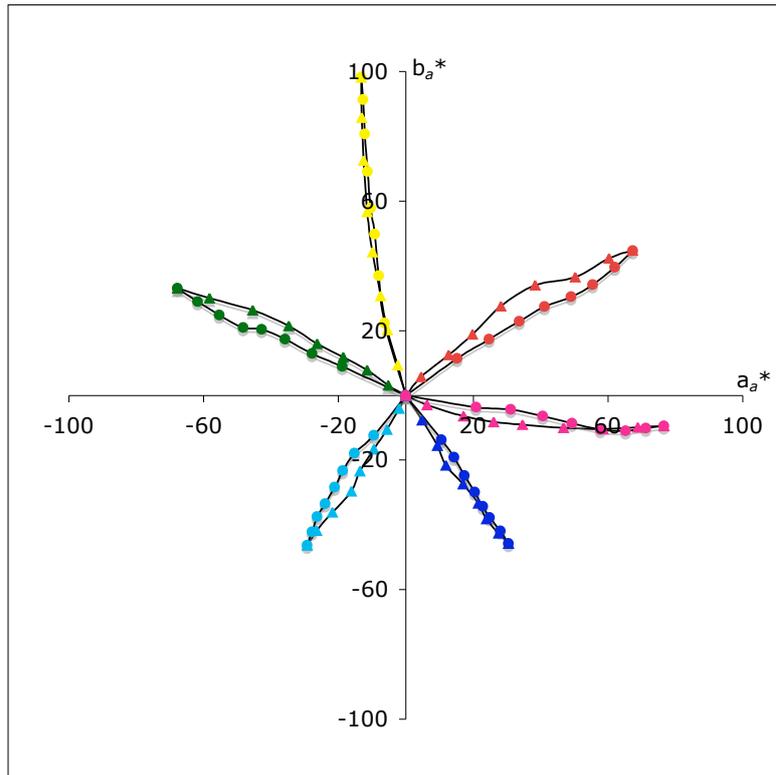
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMY0*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



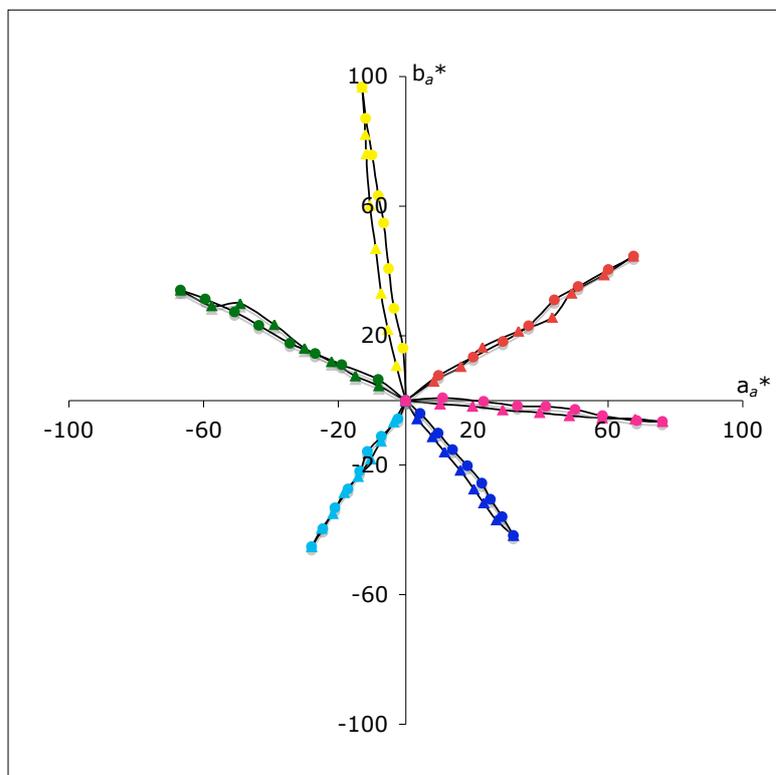
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn4*-Seperation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



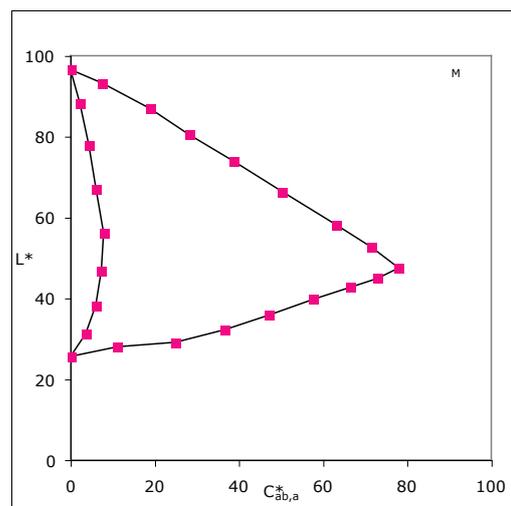
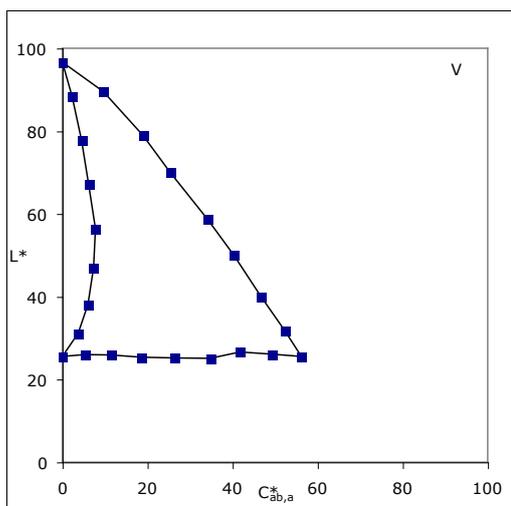
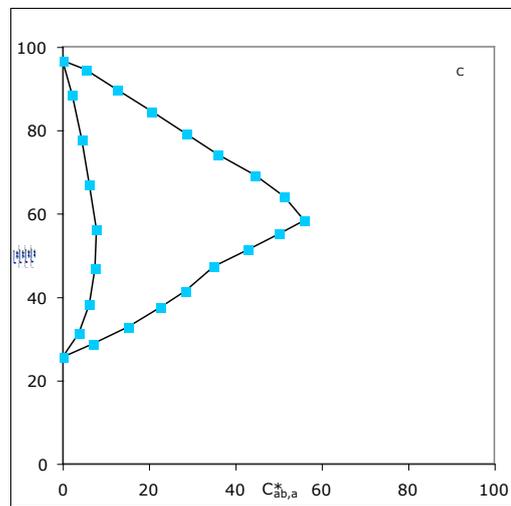
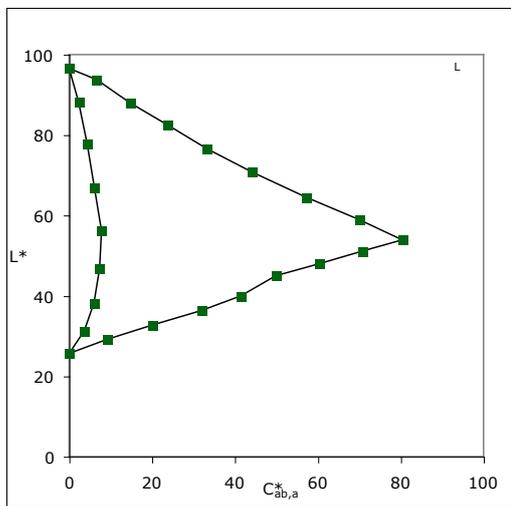
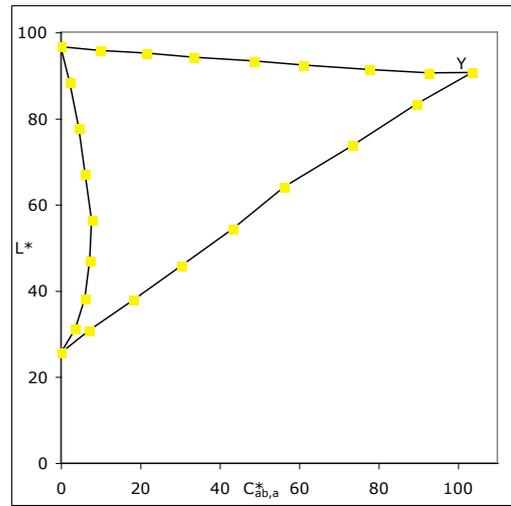
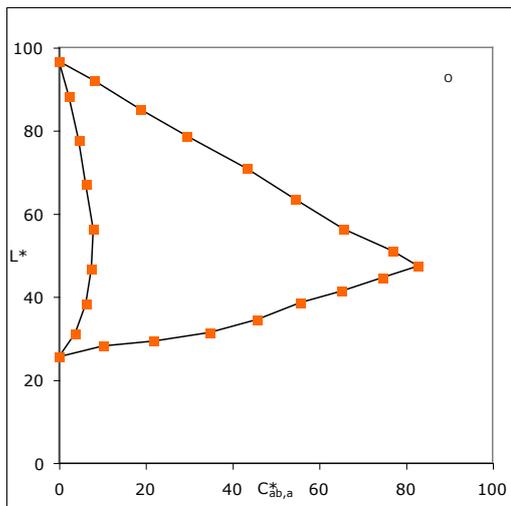
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn5*-Seperation (VT=1.0). \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



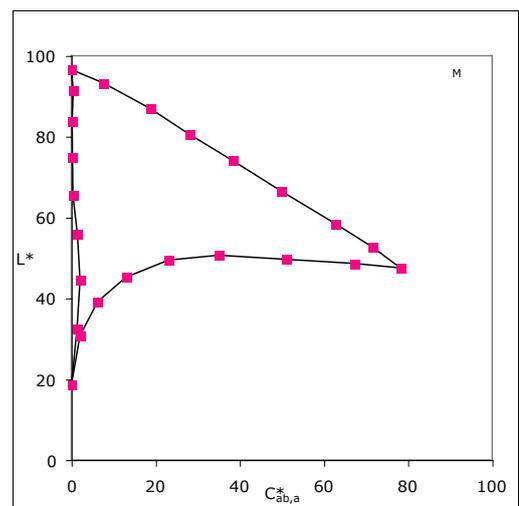
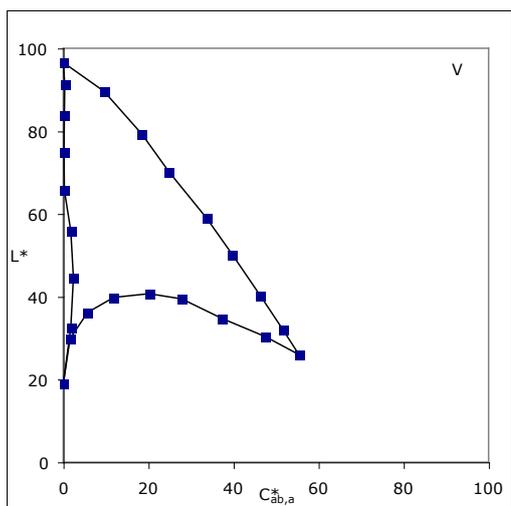
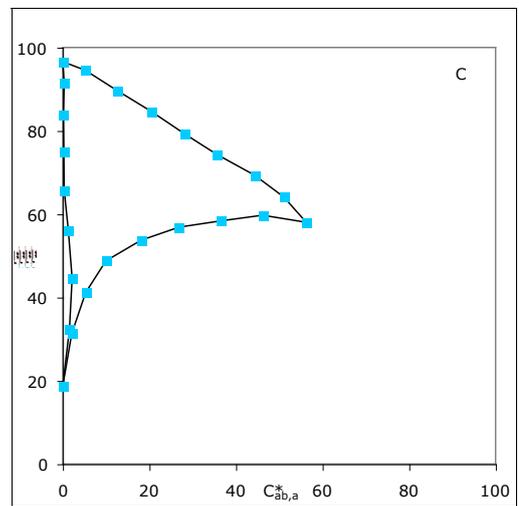
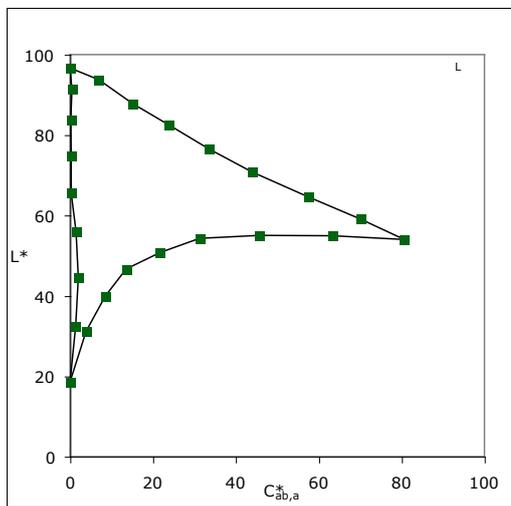
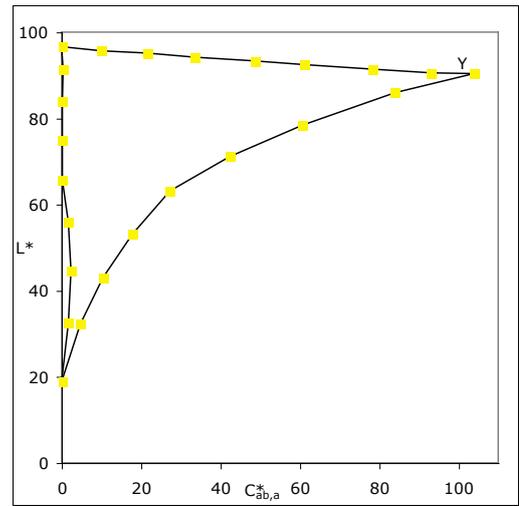
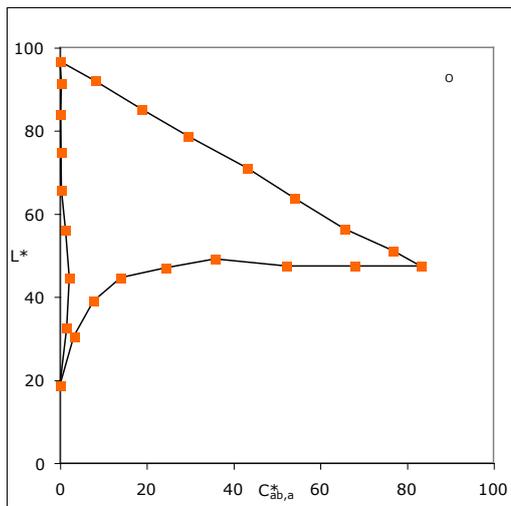
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn5*-Separation (VT=0.95). \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter CMYn5*-Separation (VT=0.95). \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

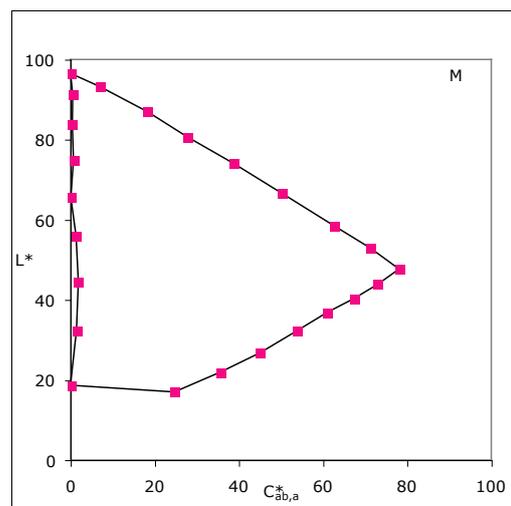
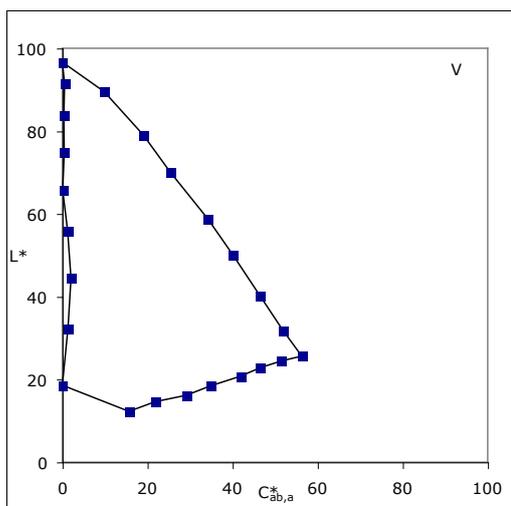
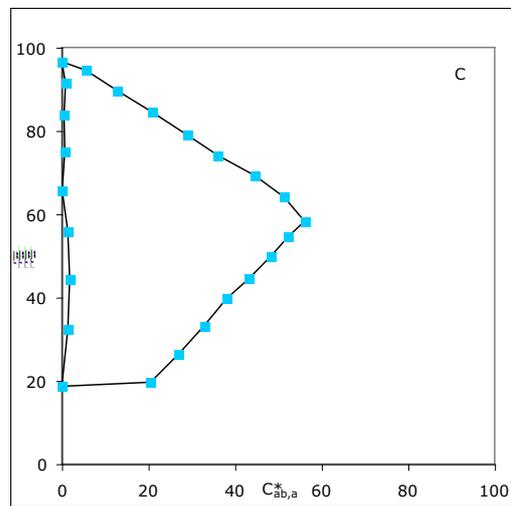
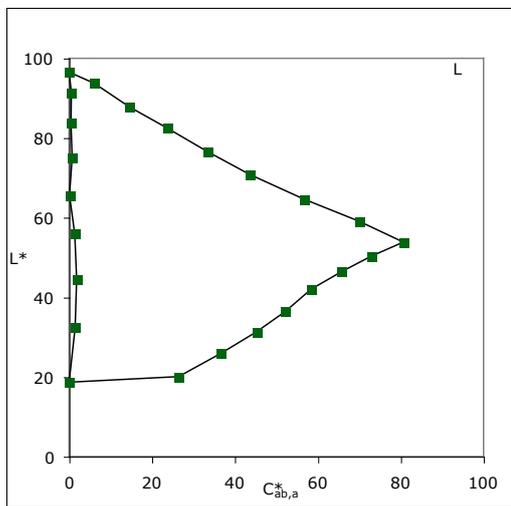
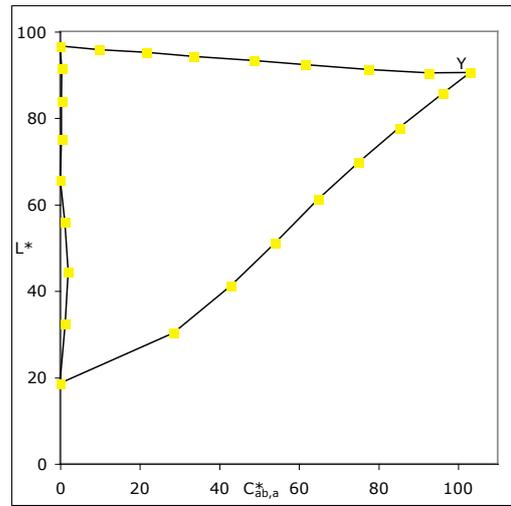
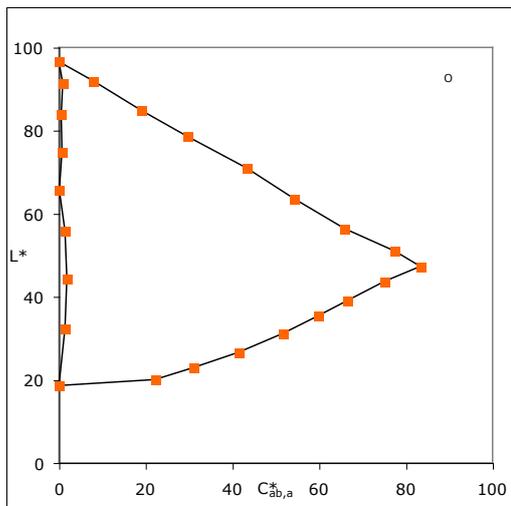


OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMY0*-Separation

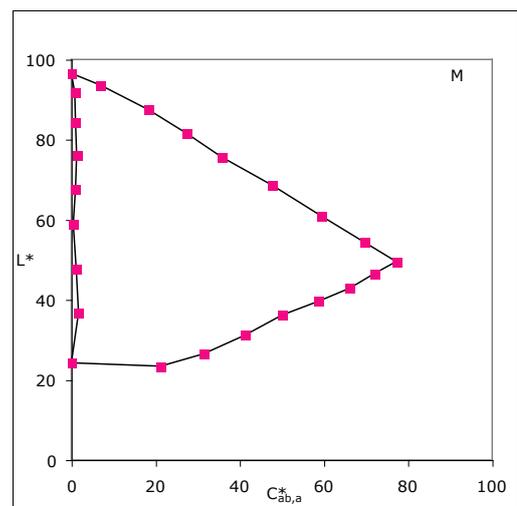
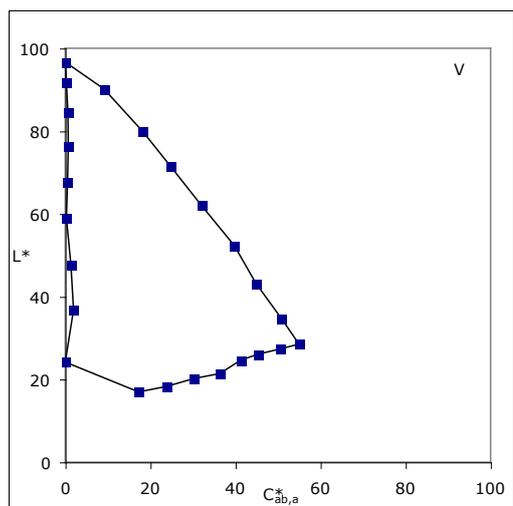
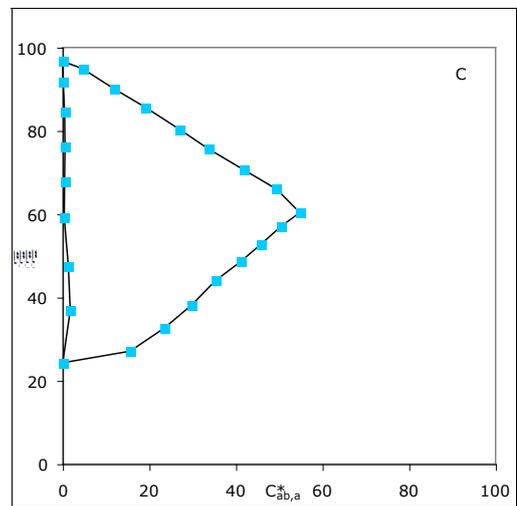
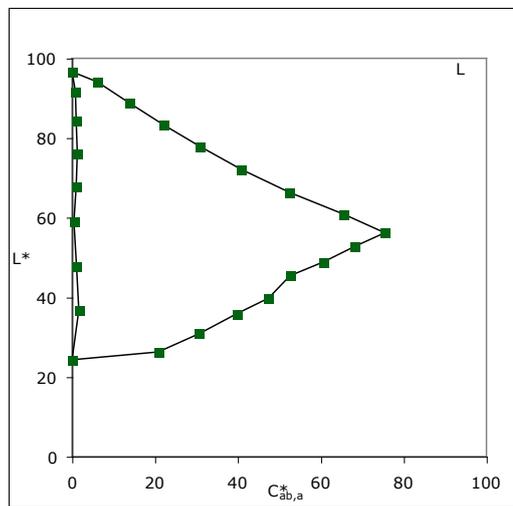
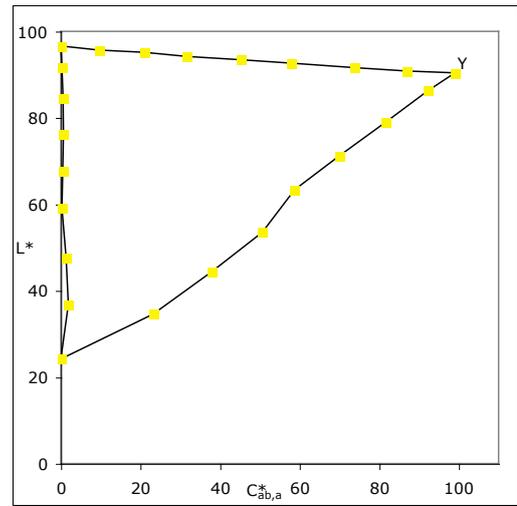
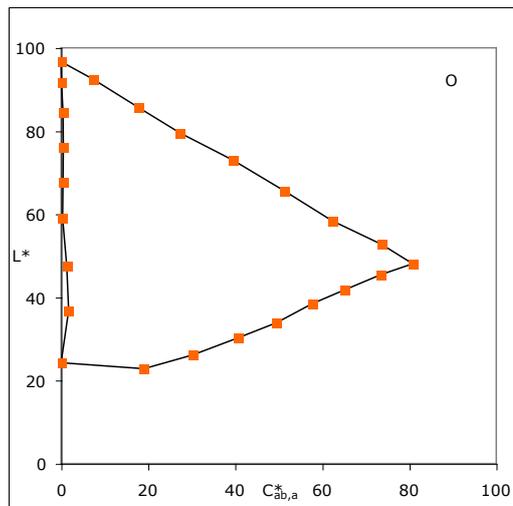


OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMYn4*-Separation

E. Diagramme Ausgabegerät Nr. 5

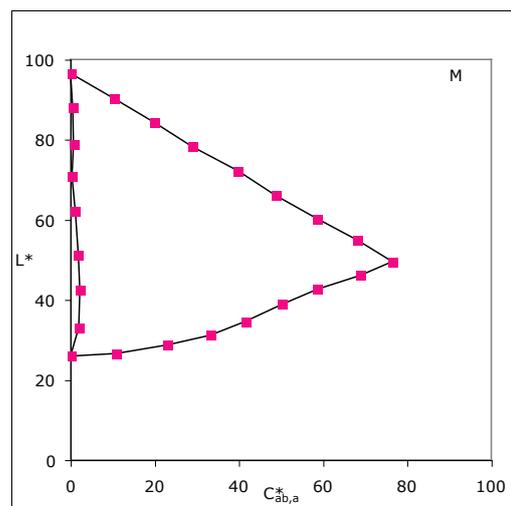
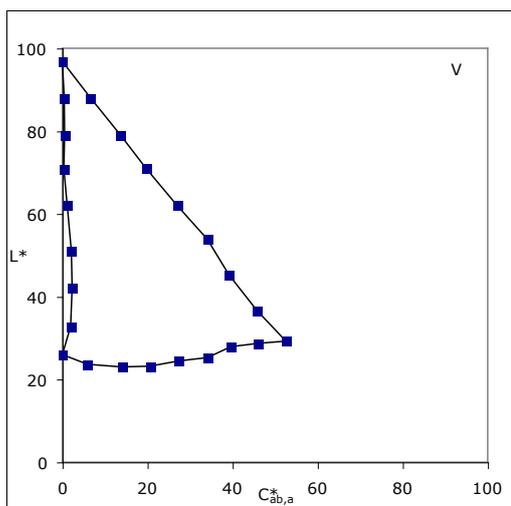
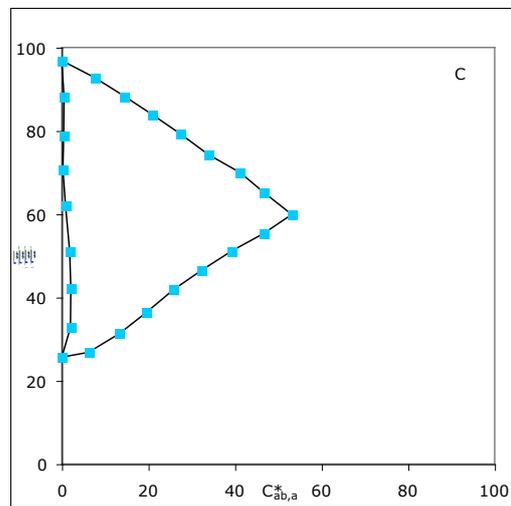
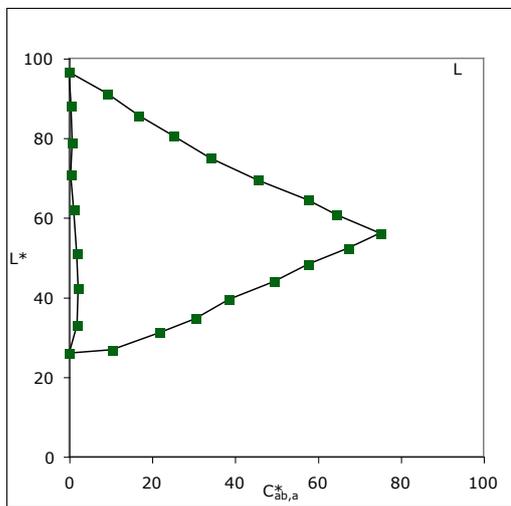
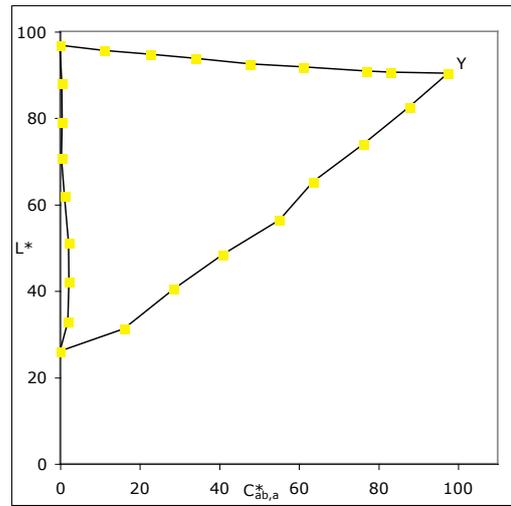
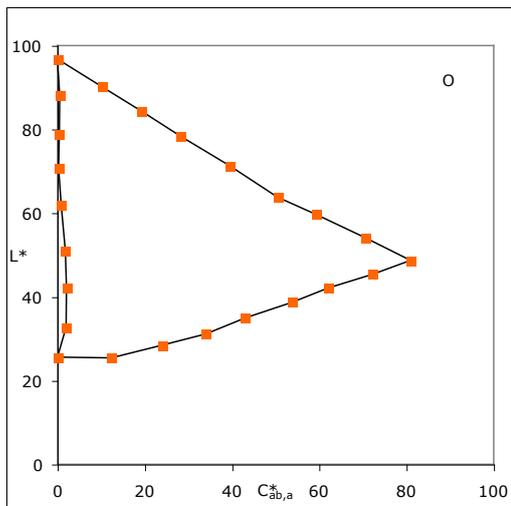


OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation (VT=1.0)

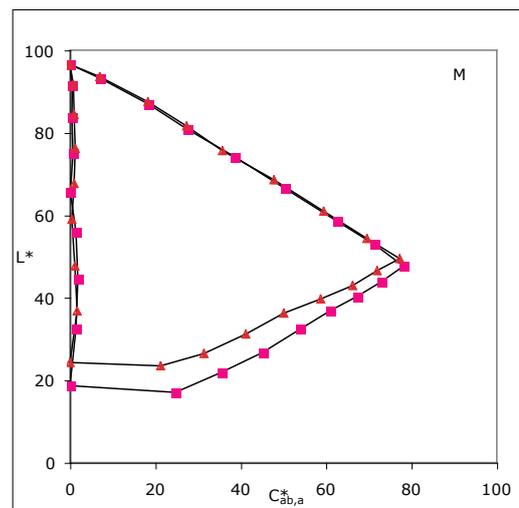
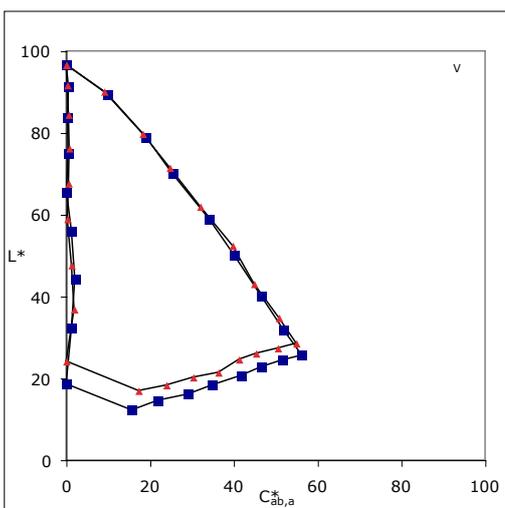
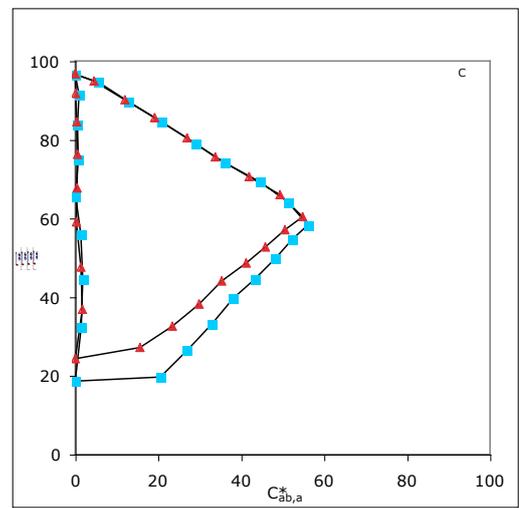
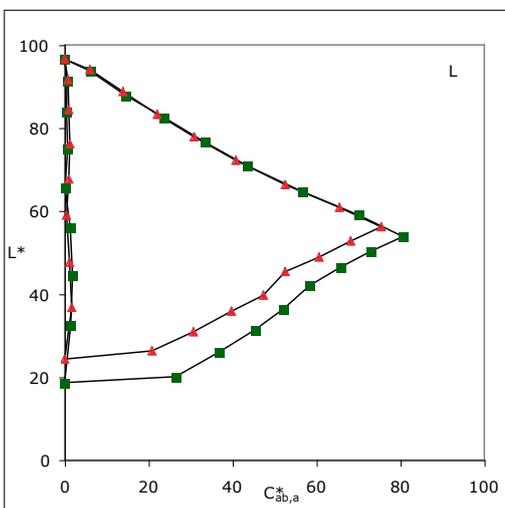
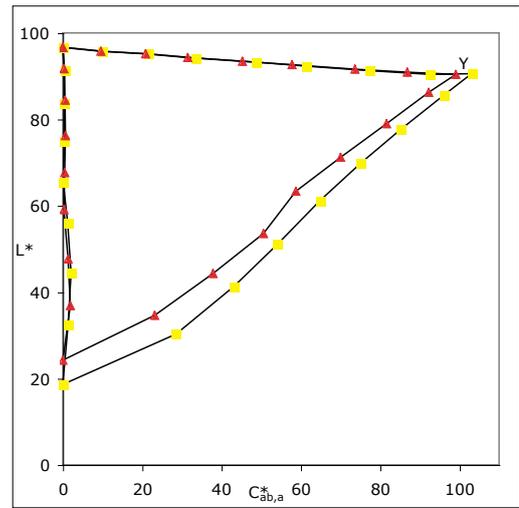
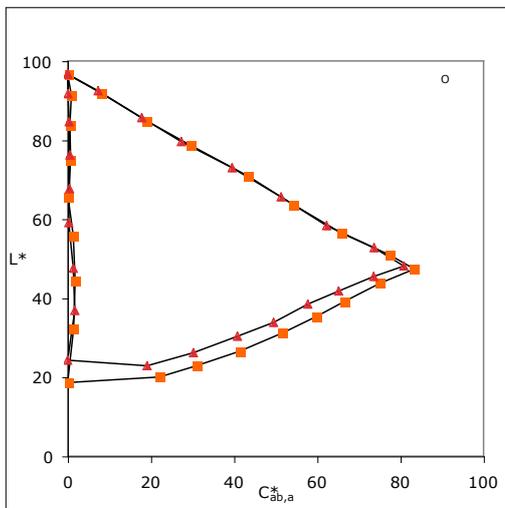


OYLCVM Bunttndreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation (VT=0.95)

E. Diagramme Ausgabegerät Nr. 5

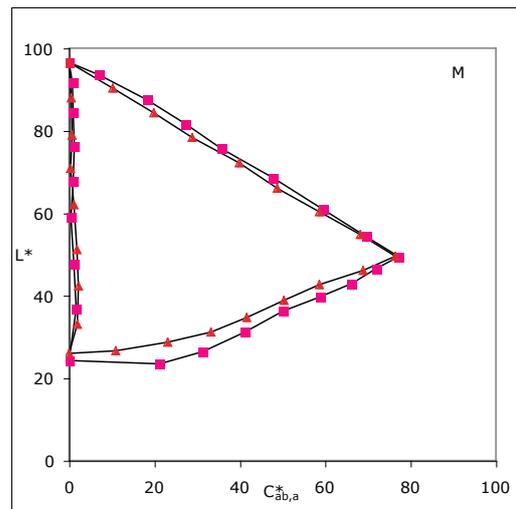
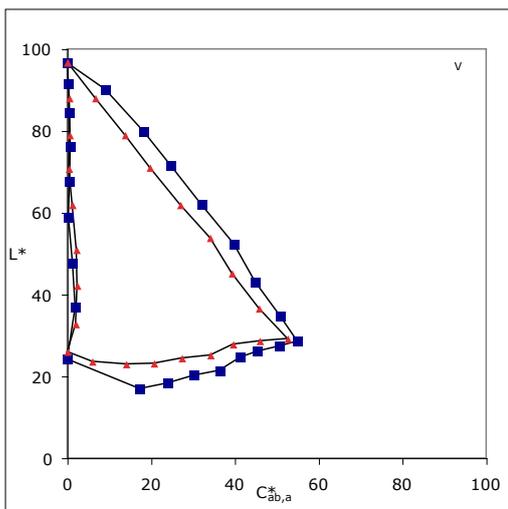
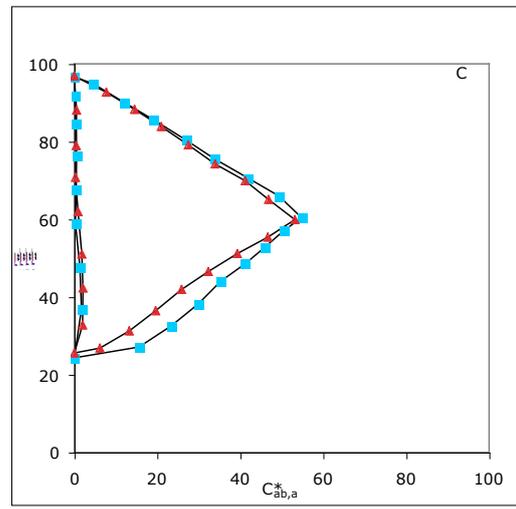
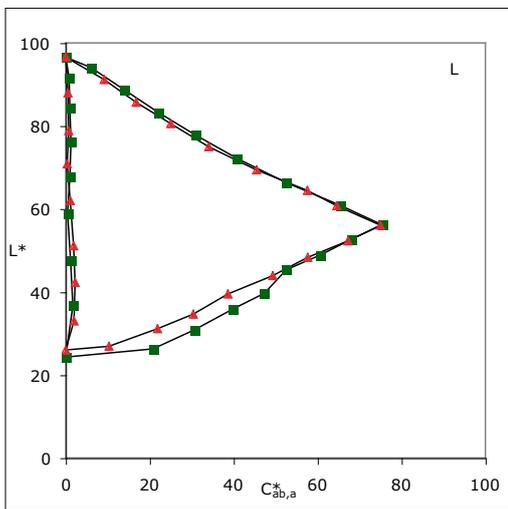
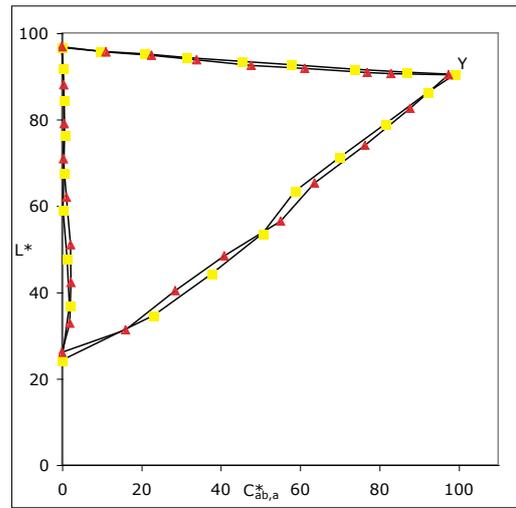
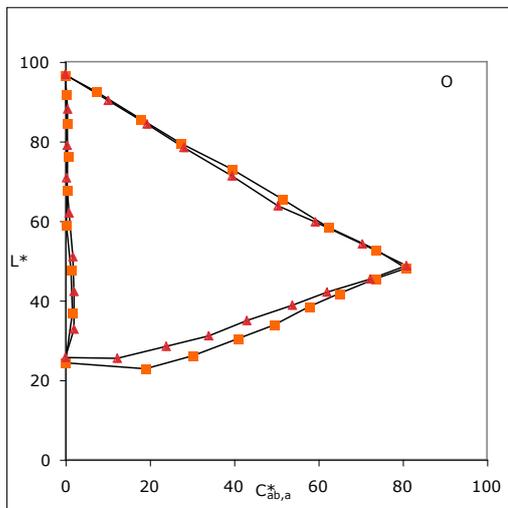


OYLCVM Bunttendreieck - linearisierte CMYn5*-Seperation (VT=0.95)



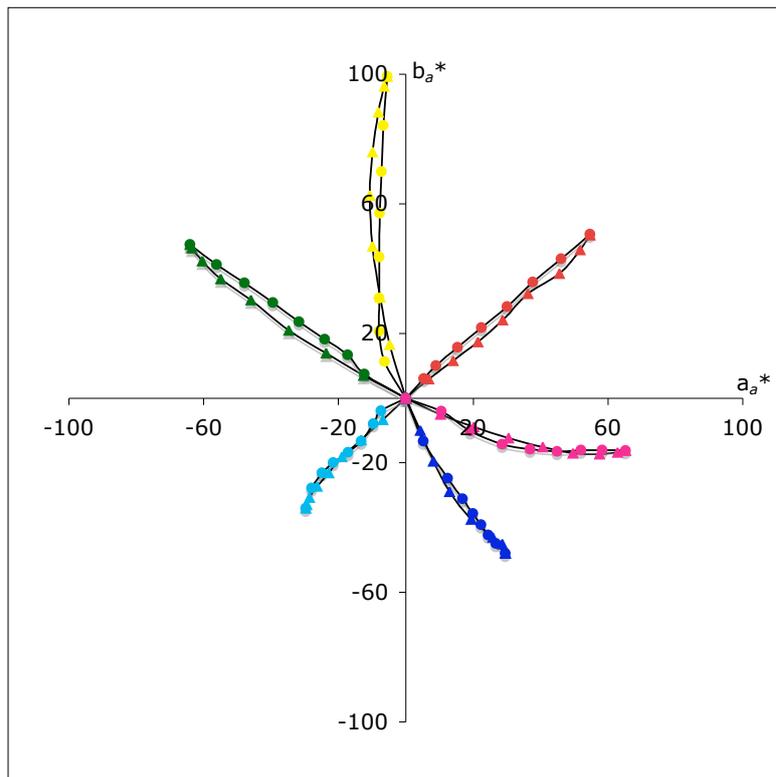
OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation im Vergleich
 VT=1.0[□] und VT=0.95[△]

E. Diagramme Ausgabegerät Nr. 5

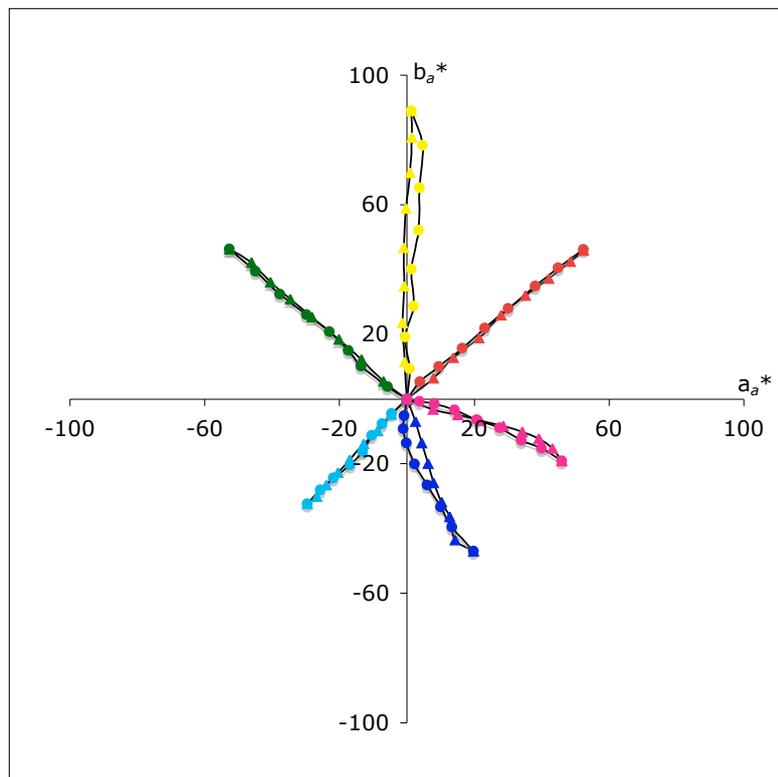


OYLCVM Bunttondreieck - Vergleich zwischen nicht linearisierter Erstausgabe[□] und linearisierter Zweitausgabe[△]

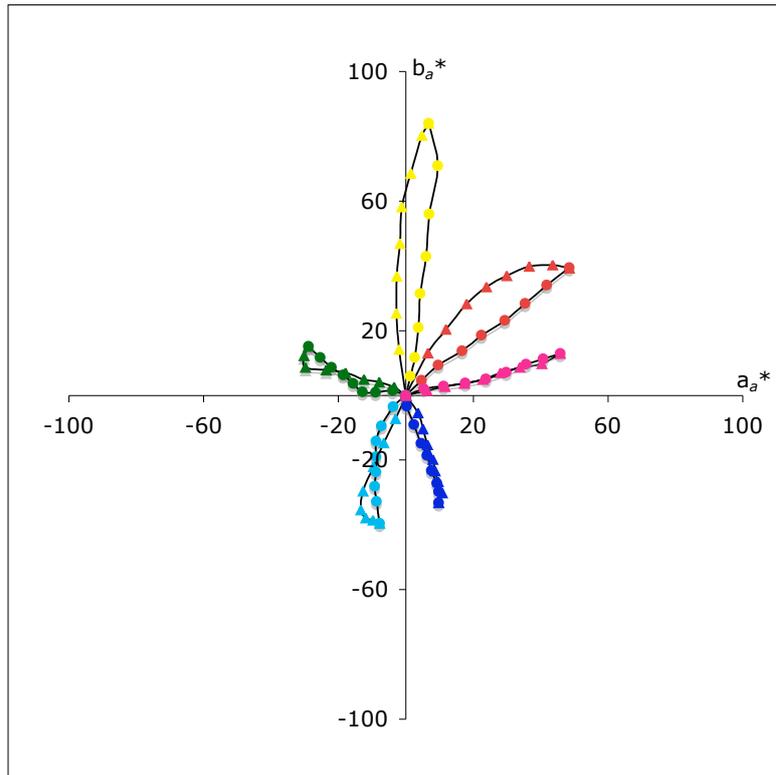
F. Diagramme Ausgabegerät Nr. 6



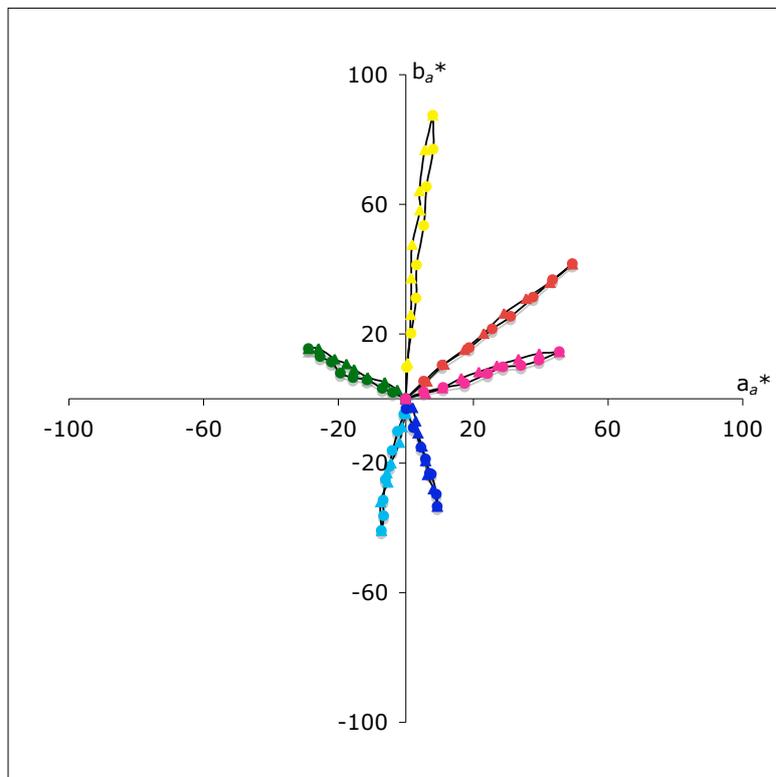
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter OLV*-Ausgabe. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



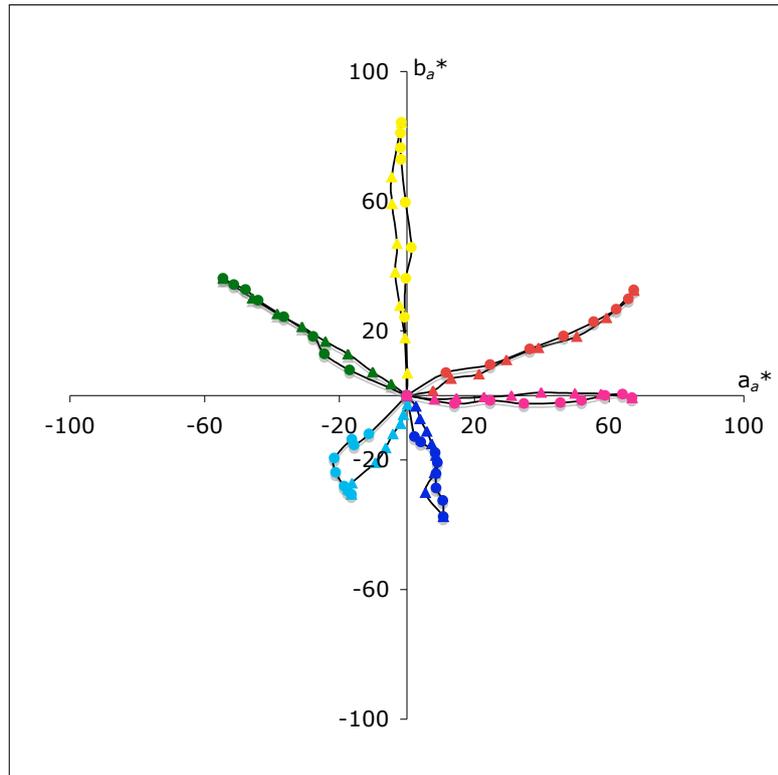
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter OLV*-Ausgabe. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



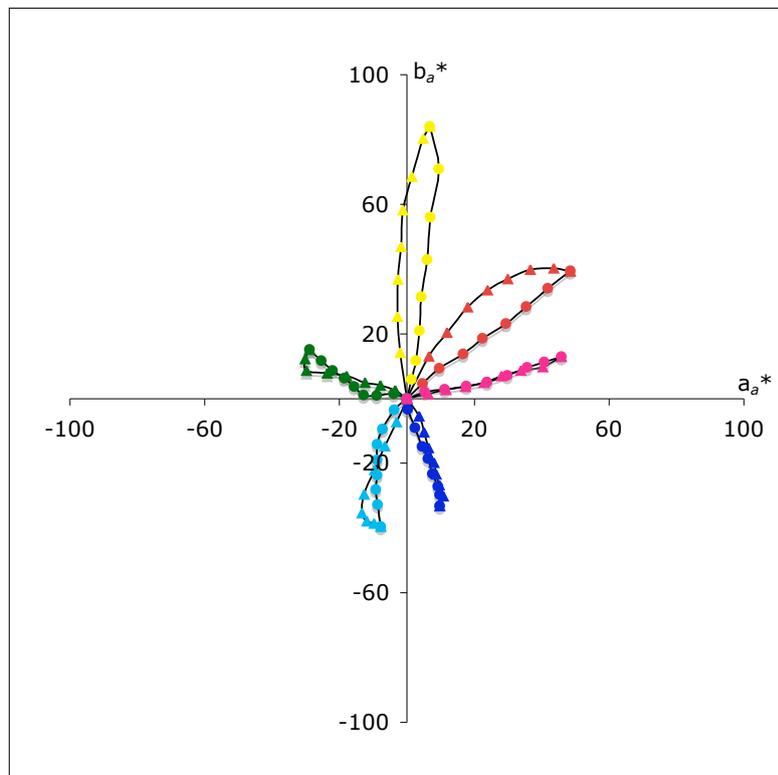
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMY0*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



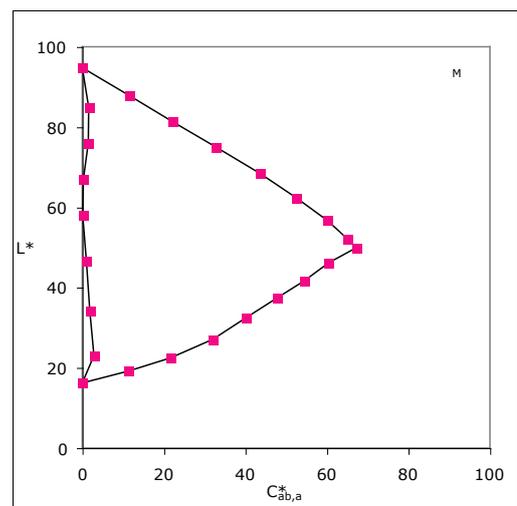
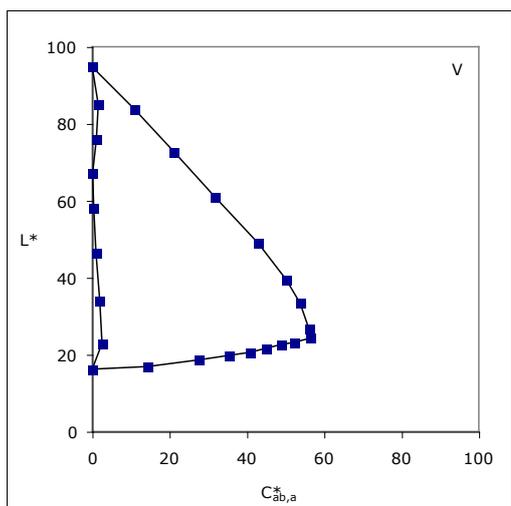
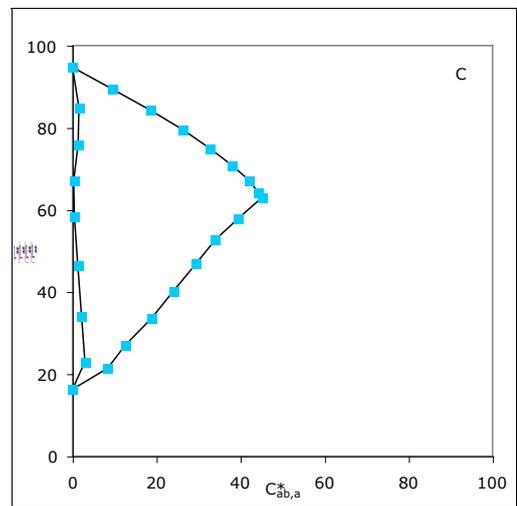
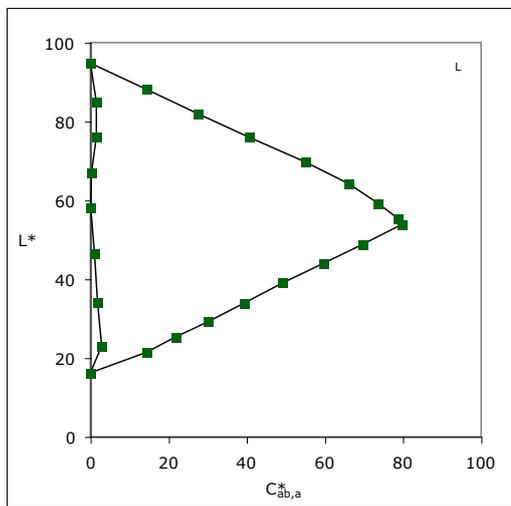
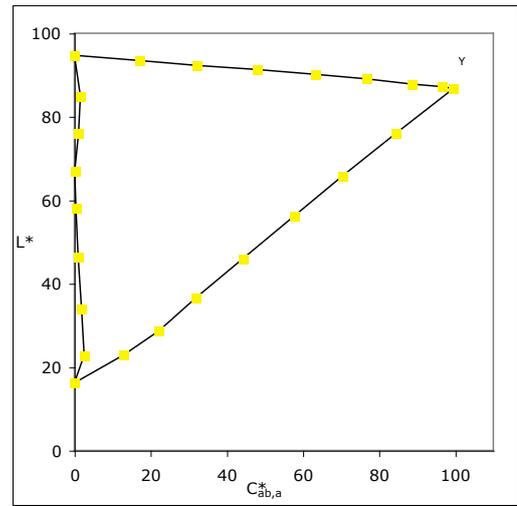
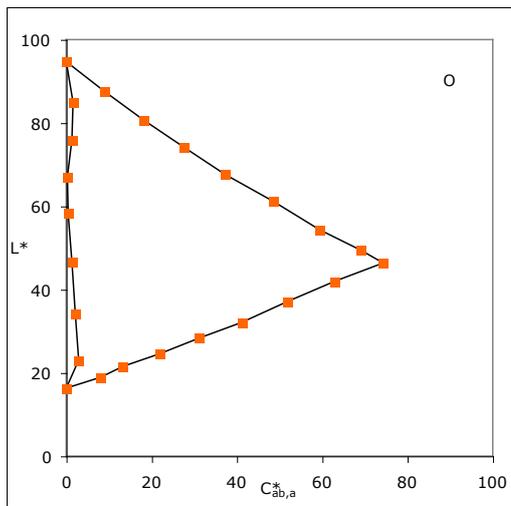
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter CMY0*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn5*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

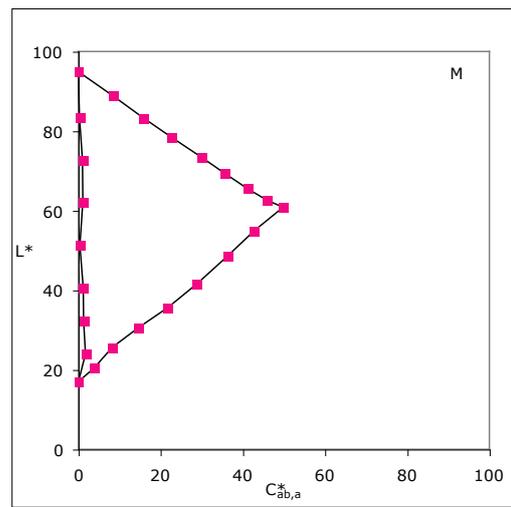
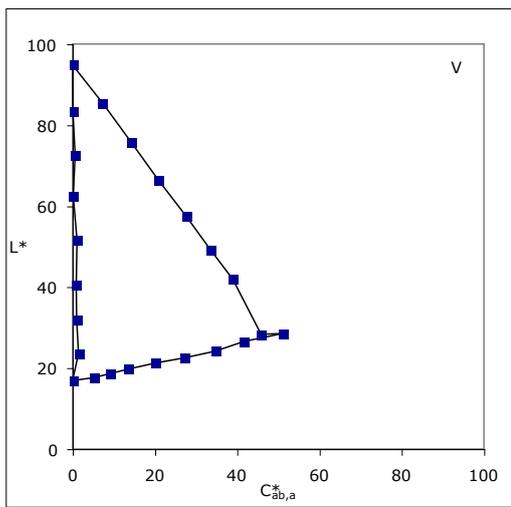
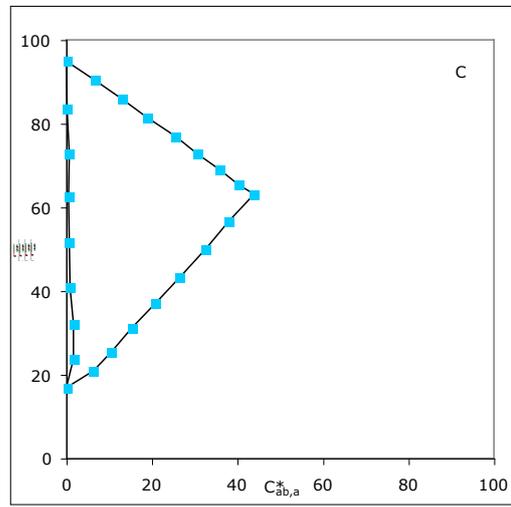
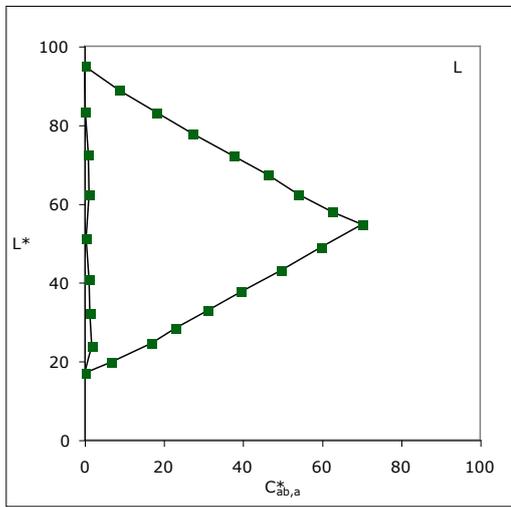
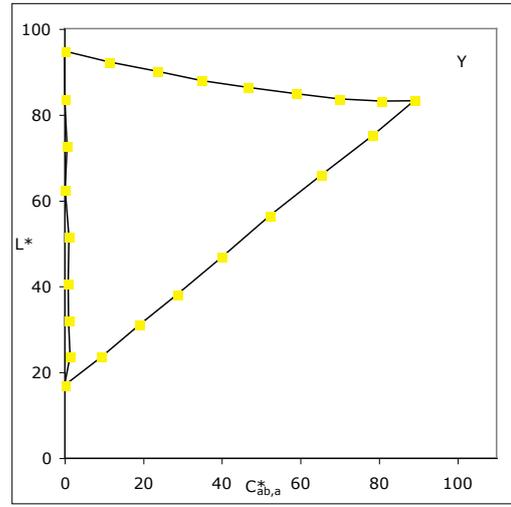
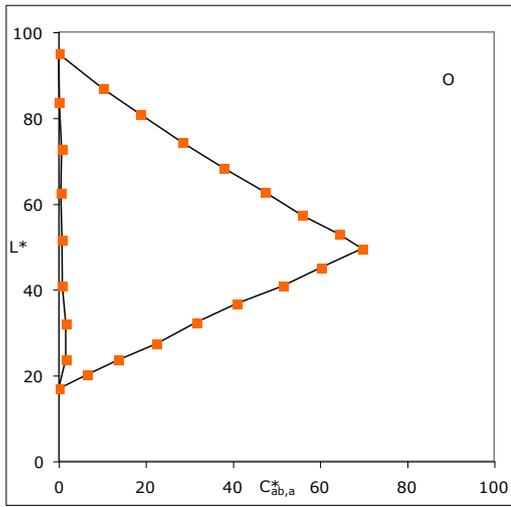


Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter CMYn5*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt

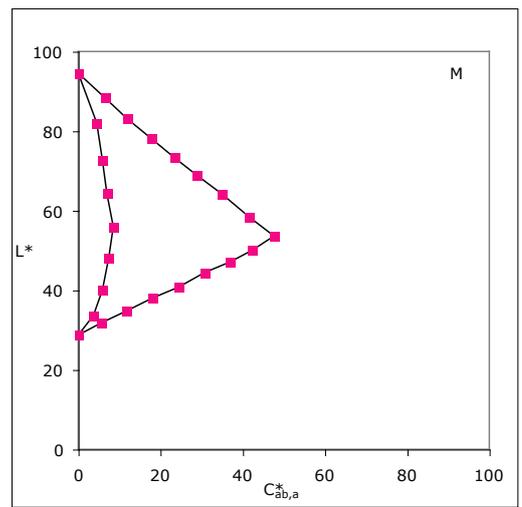
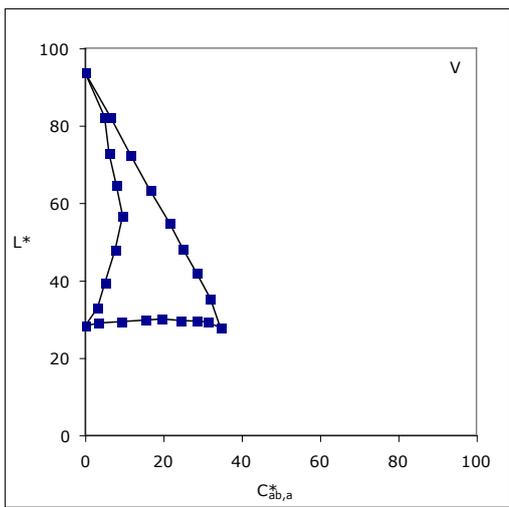
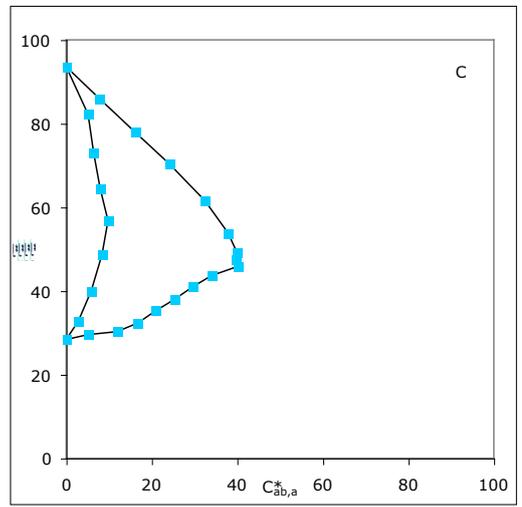
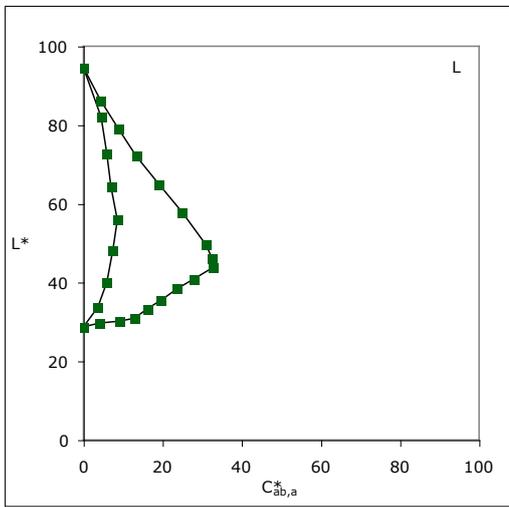
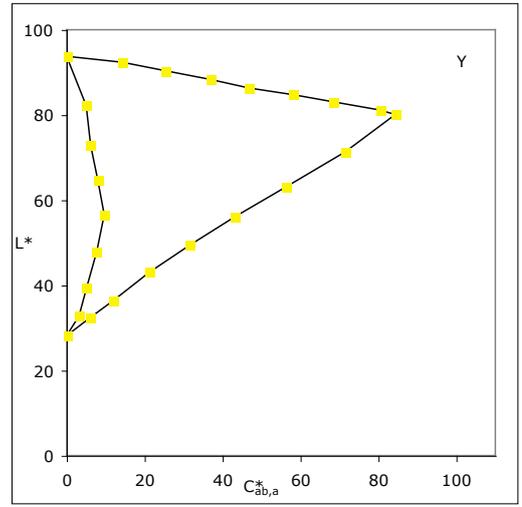
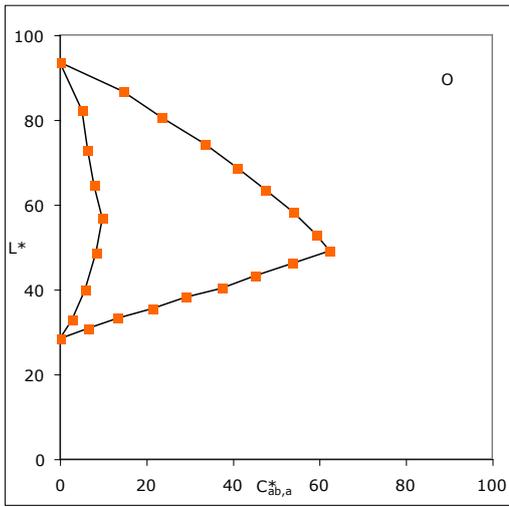


OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte OLV*-Ausgabe

F. Diagramme Ausgabegerät Nr. 6

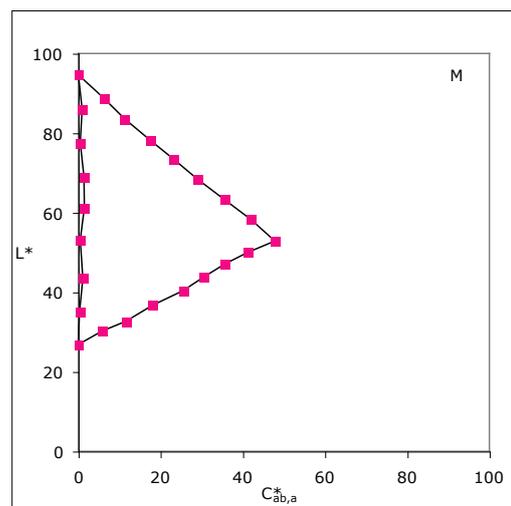
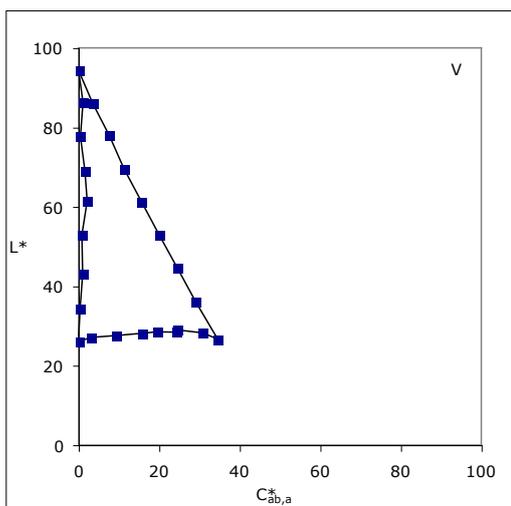
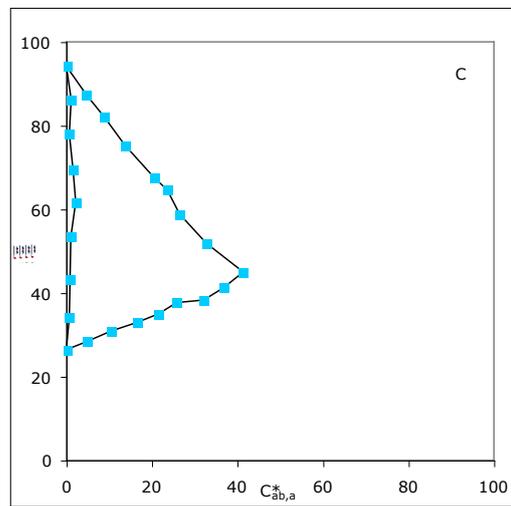
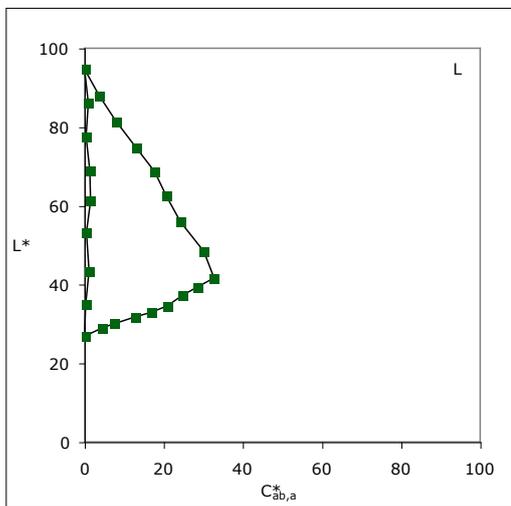
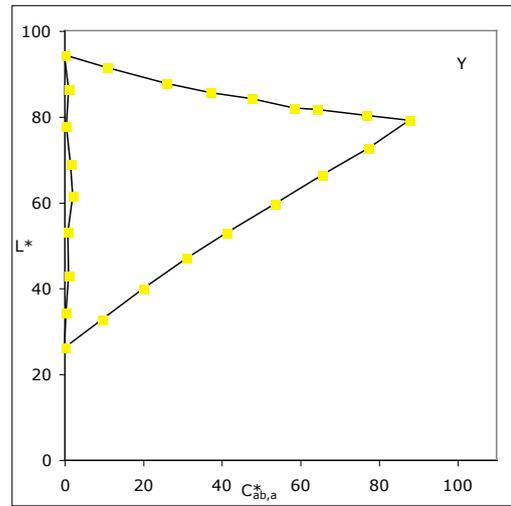
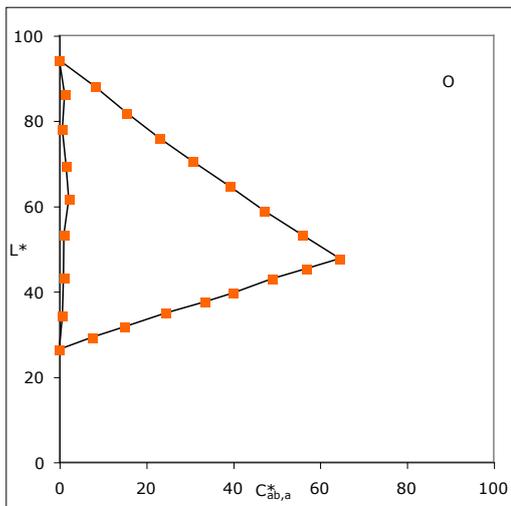


OYLCVM Bunttendreieck - linearisierte OLV*-Ausgabendcenter

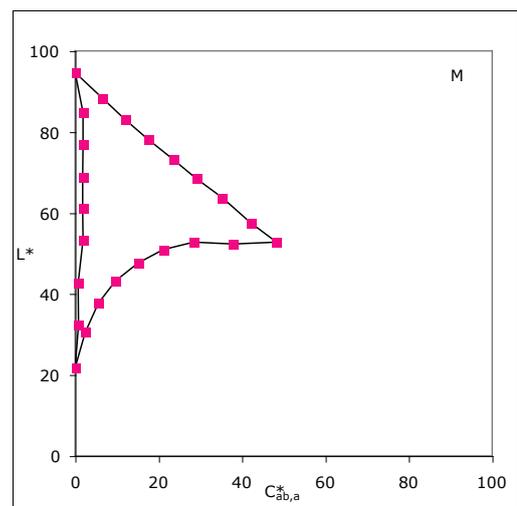
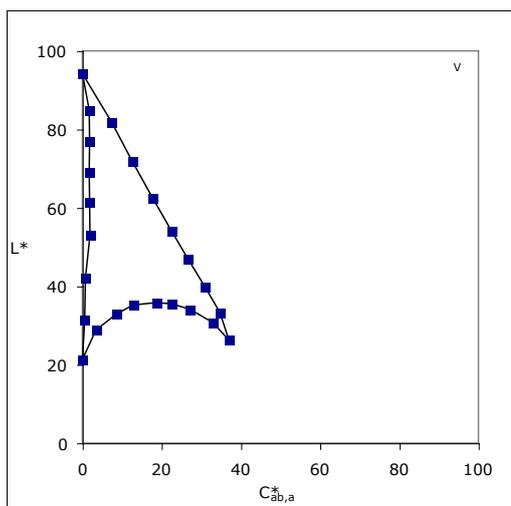
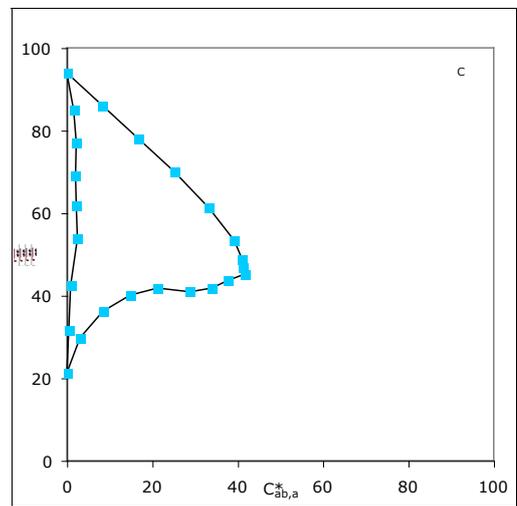
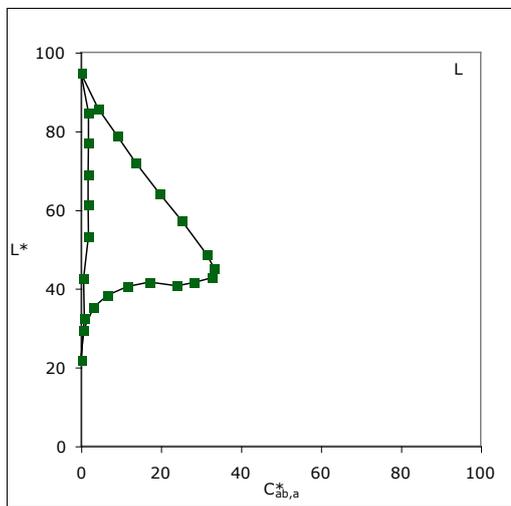
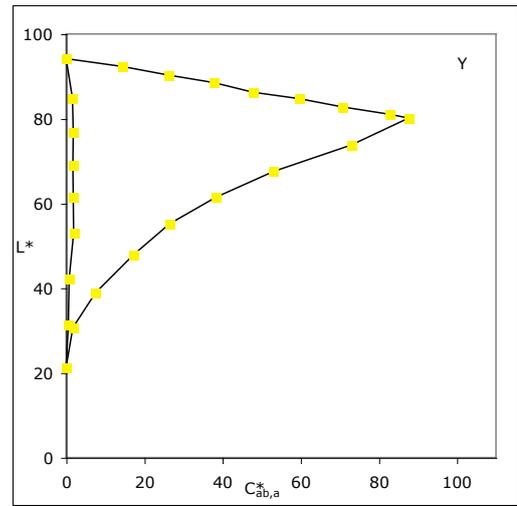
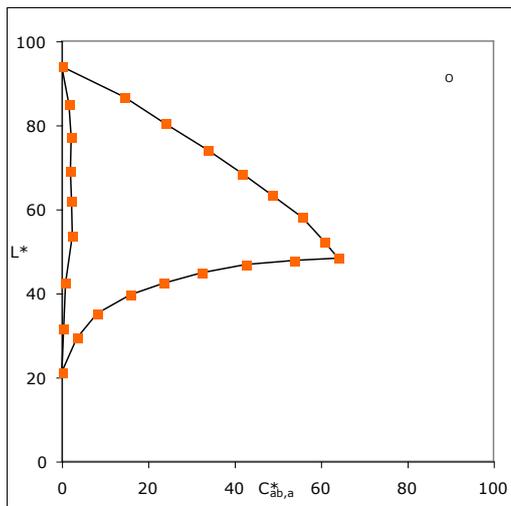


OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMY0*-Separation

F. Diagramme Ausgabegerät Nr. 6

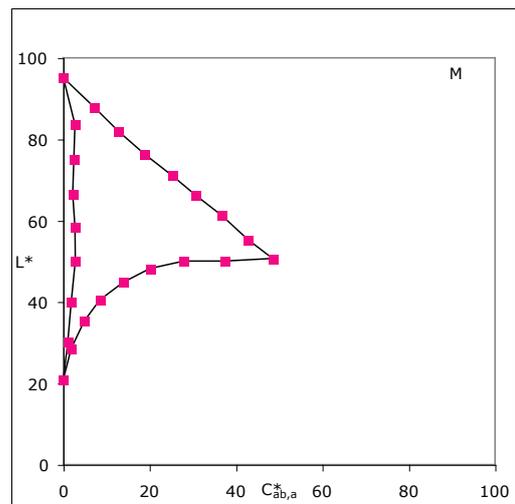
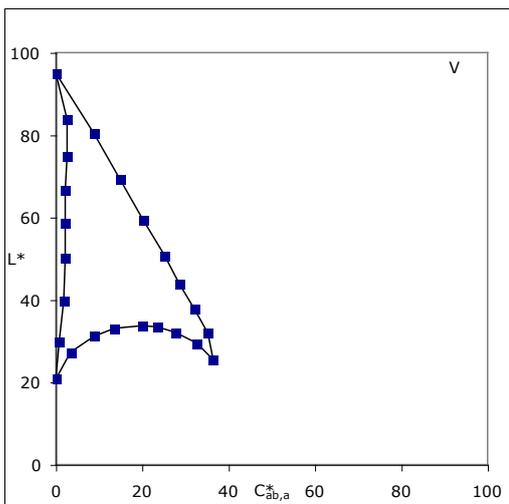
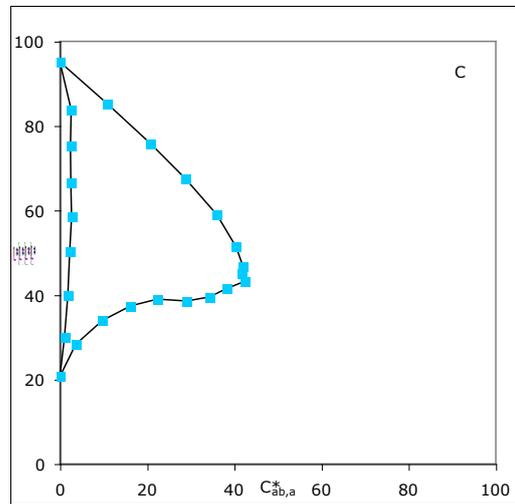
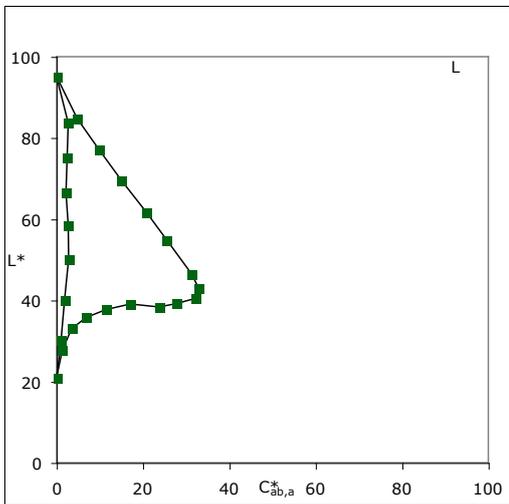
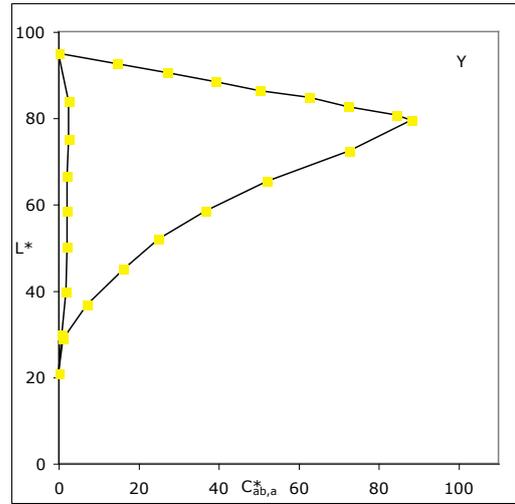
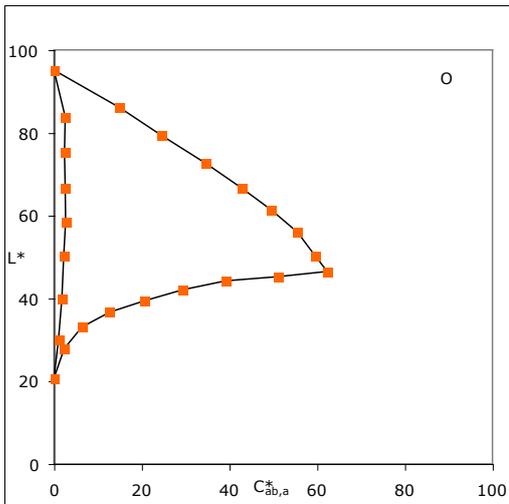


OYLCVM Bunttondreieck - linearisierte CMY0*-Separation

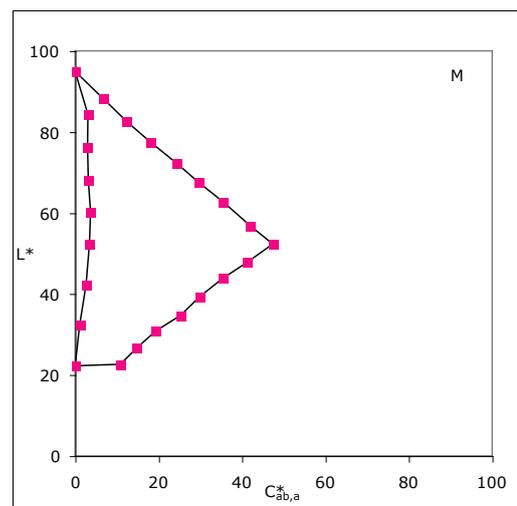
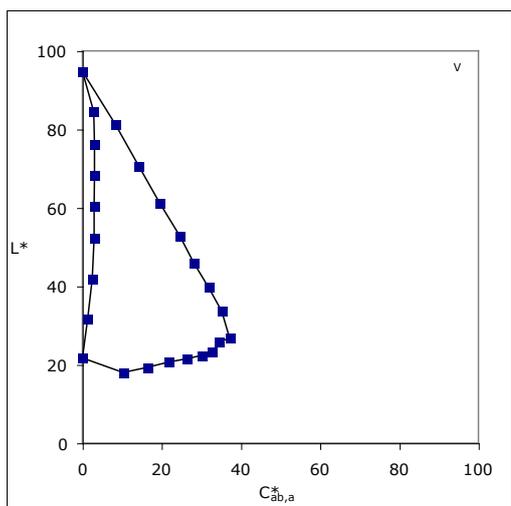
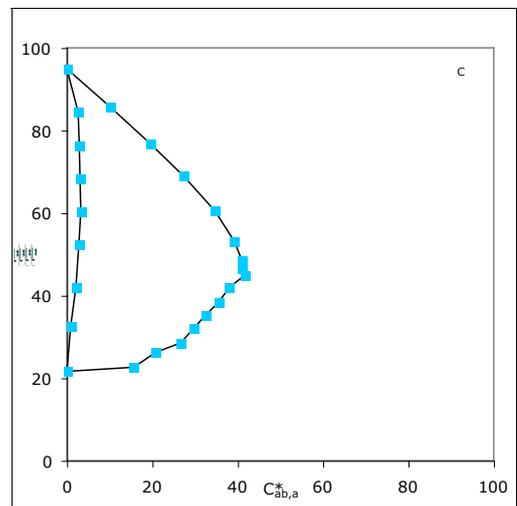
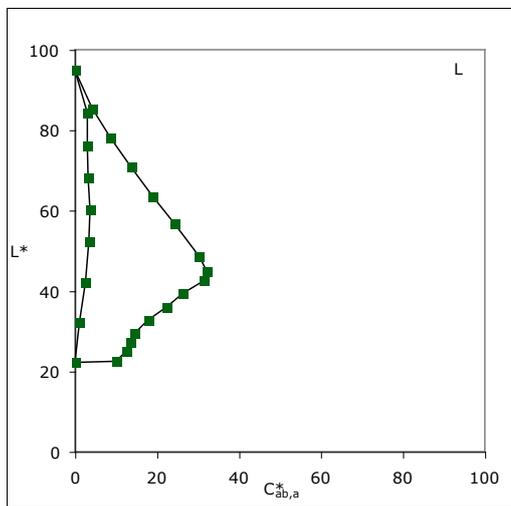
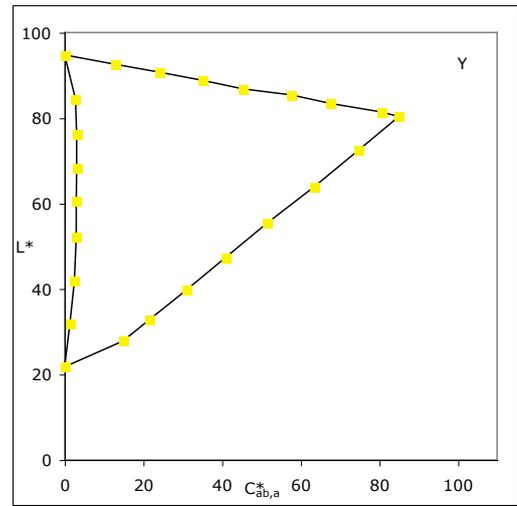
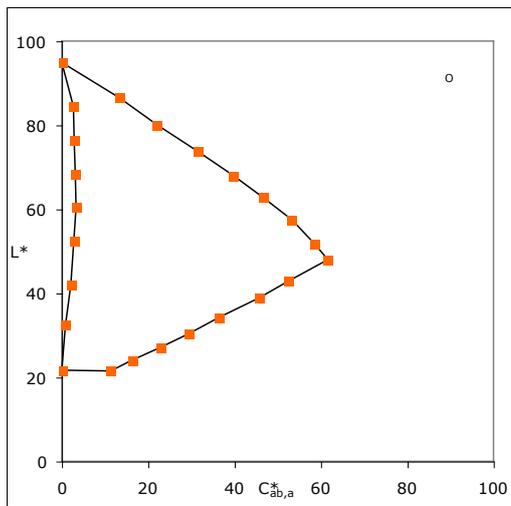


OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMYn4*-Separation

F. Diagramme Ausgabegerät Nr. 6

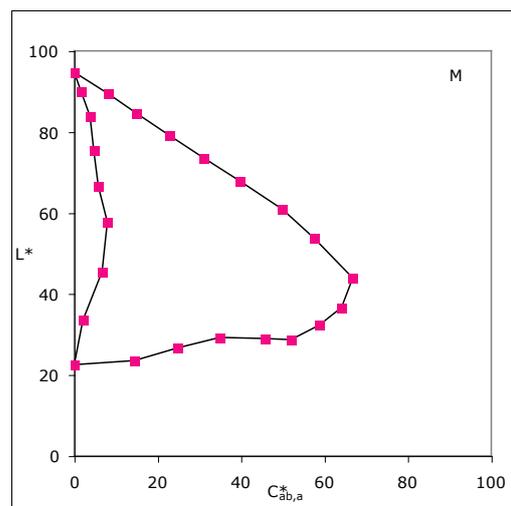
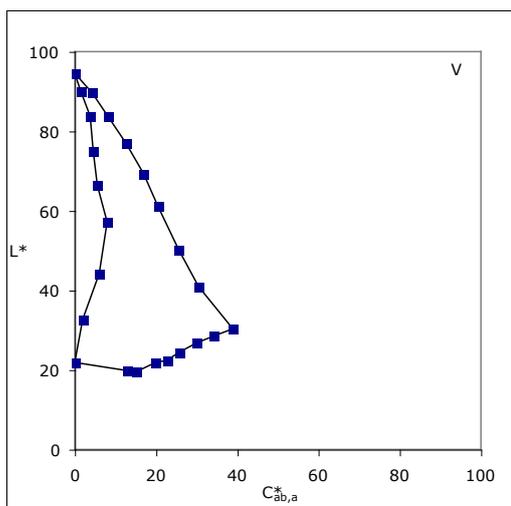
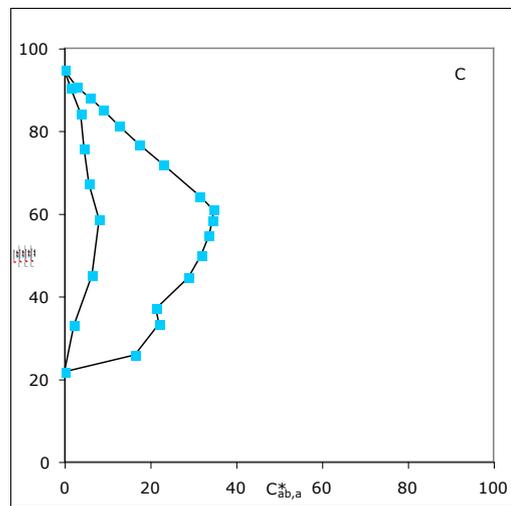
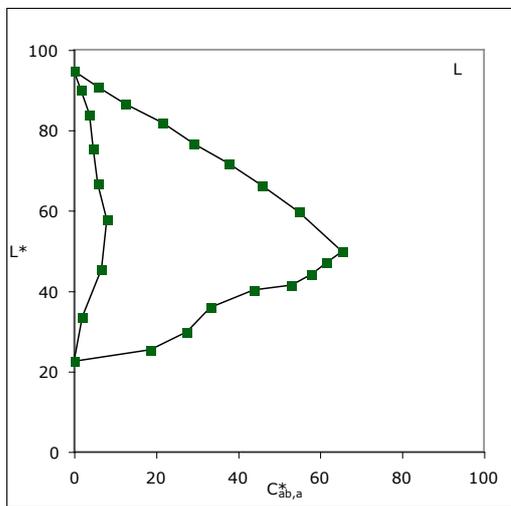
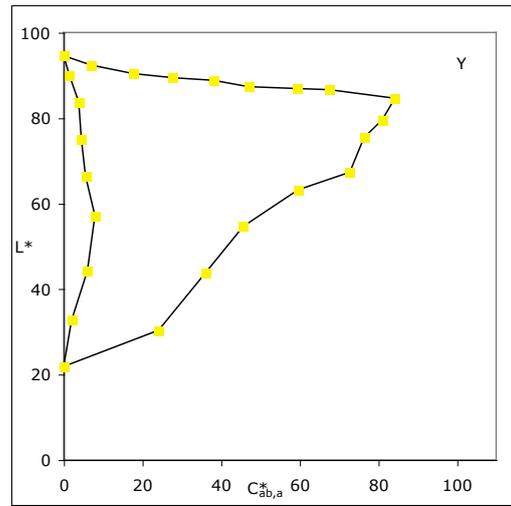
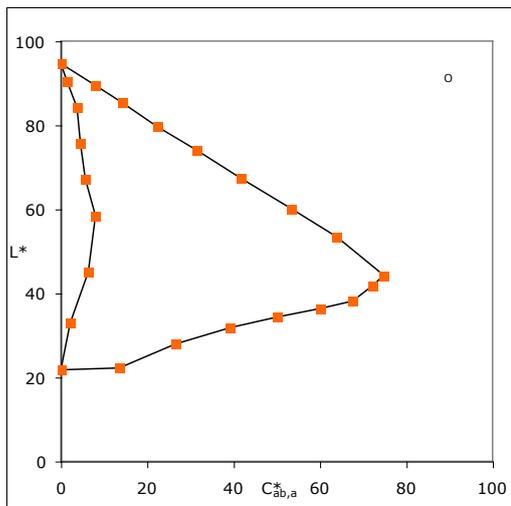


OYLCVM Bunttondreieck - linearisierte CMYn4*-Separation

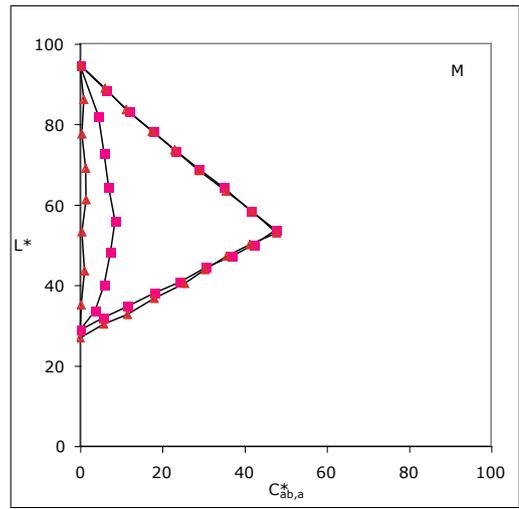
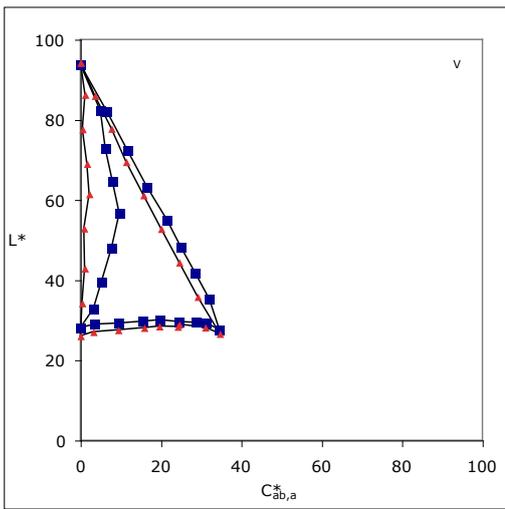
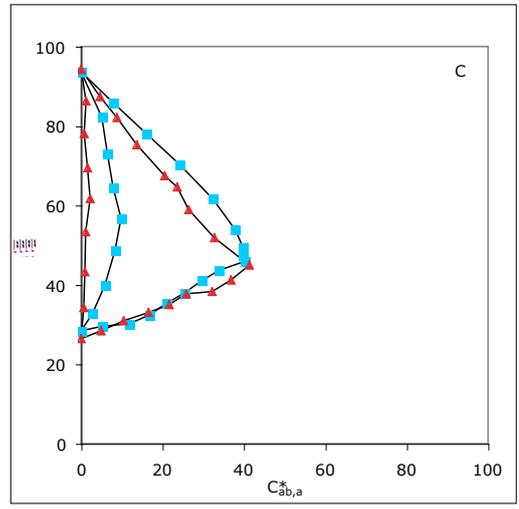
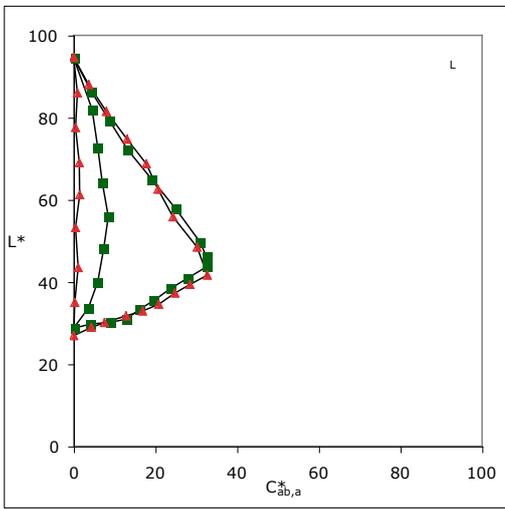
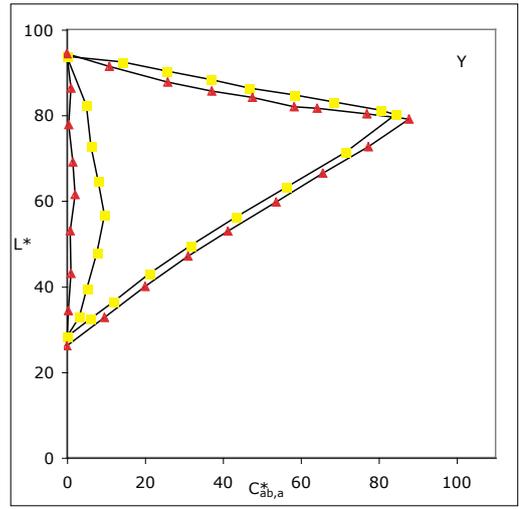
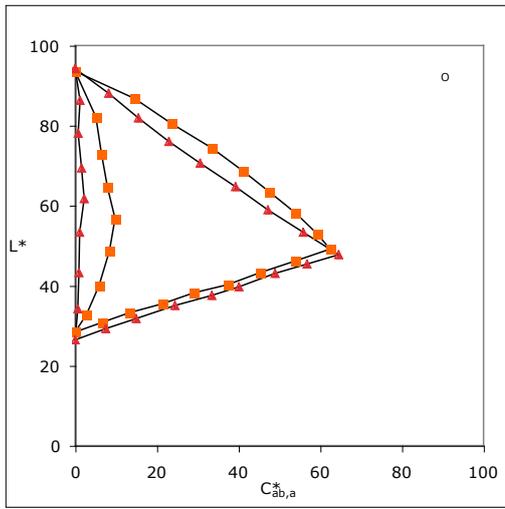


OYLCVM Bunttondreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation

F. Diagramme Ausgabegerät Nr. 6

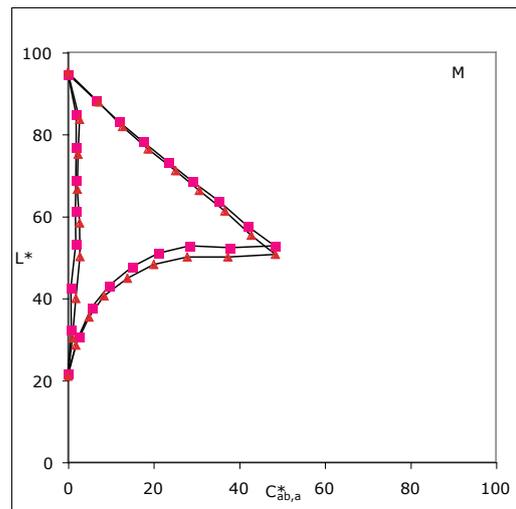
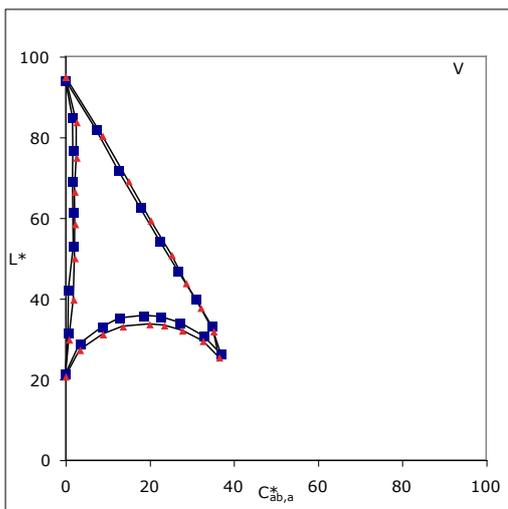
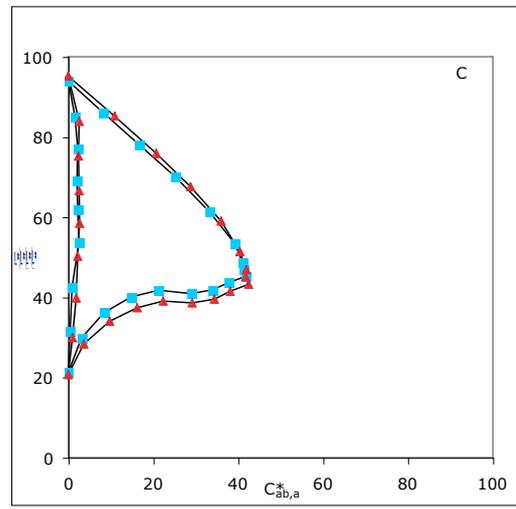
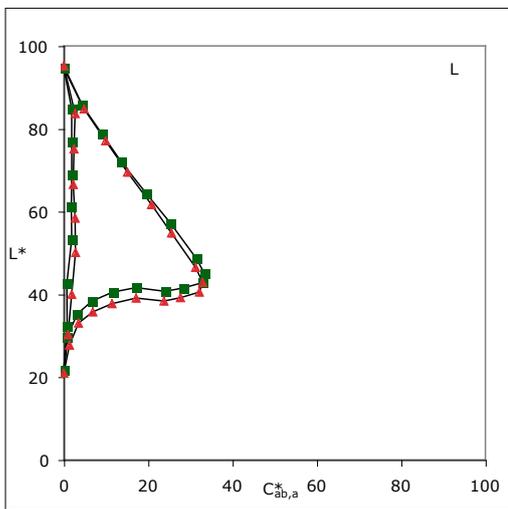
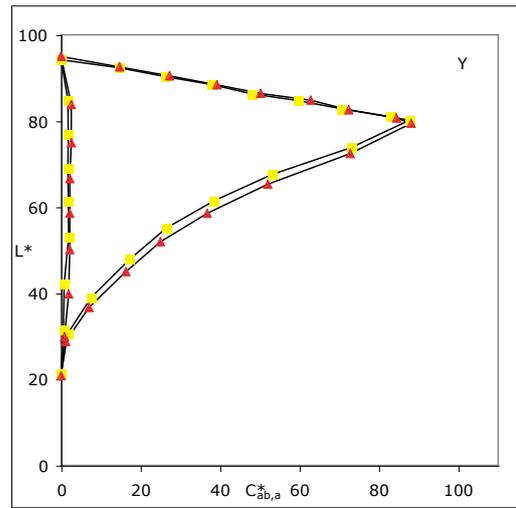
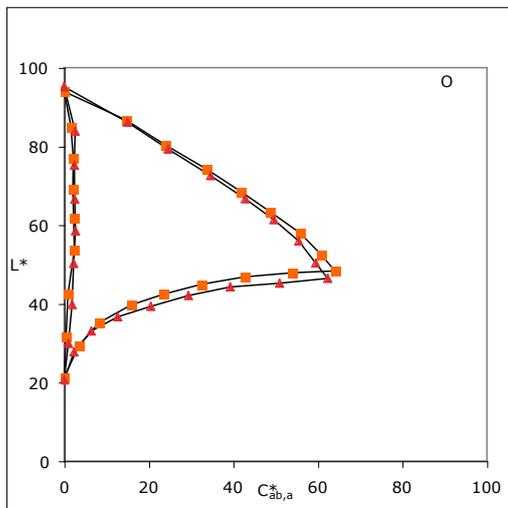


OYLCVM Bunttondreieck - linearisierter CMYn5*-Separation

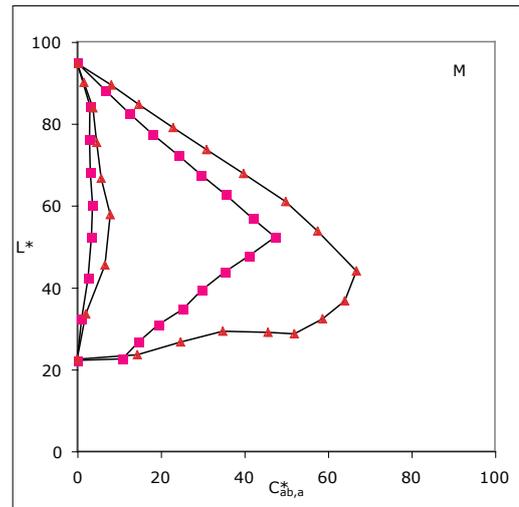
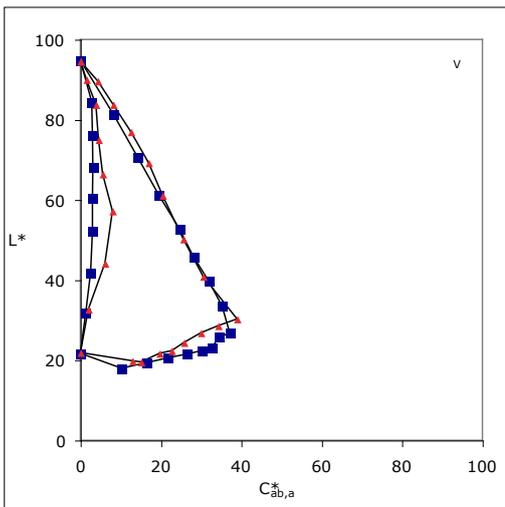
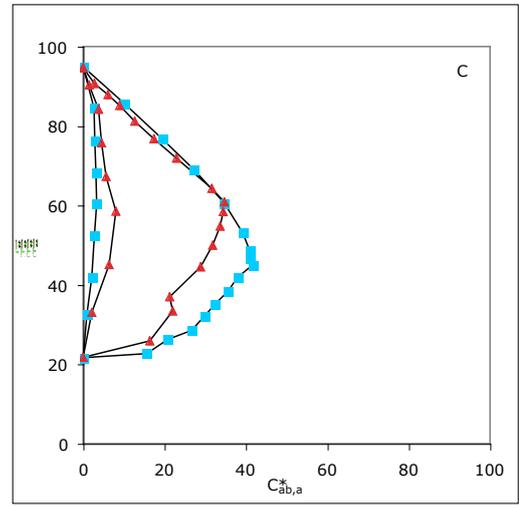
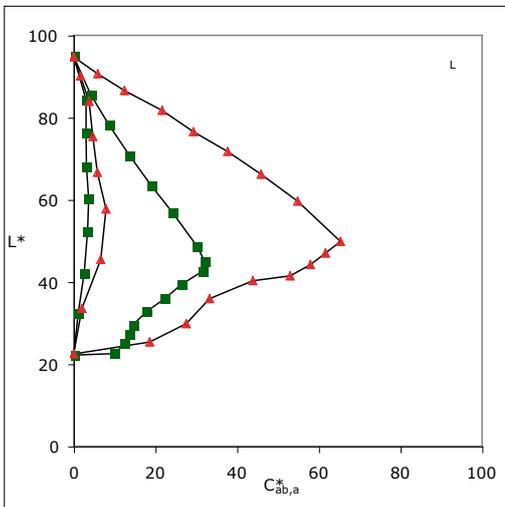
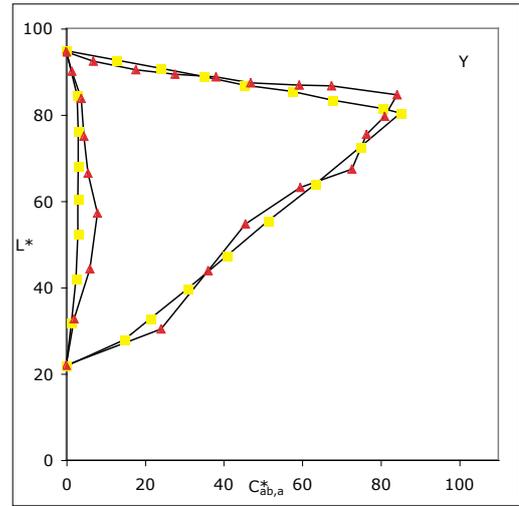
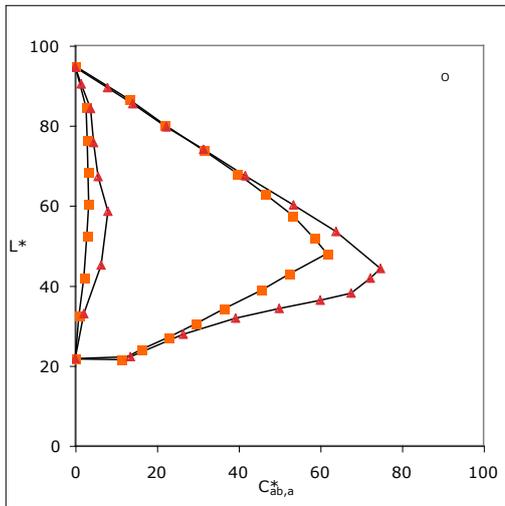


OYLCVM Bunttdreieck - CMY0*-Separation im Vergleich. Erstausgabe[□] und Zweitausgabe[△]

F. Diagramme Ausgabegerät Nr. 6

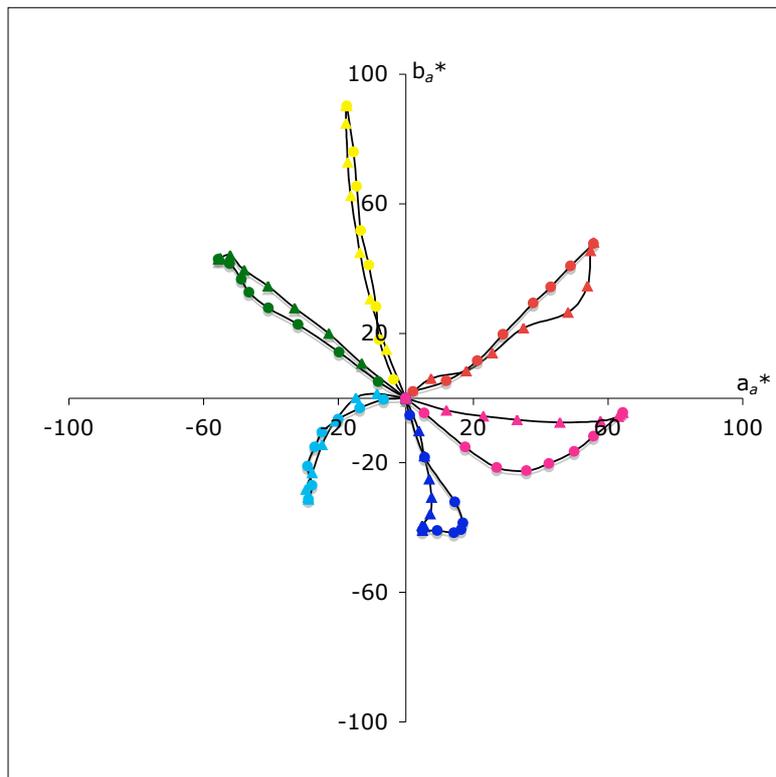


OYLCVM Bunttondreieck - CMYn4*-Separation im Vergleich. Erstausgabe[□] und
Zweitausgabe[△]

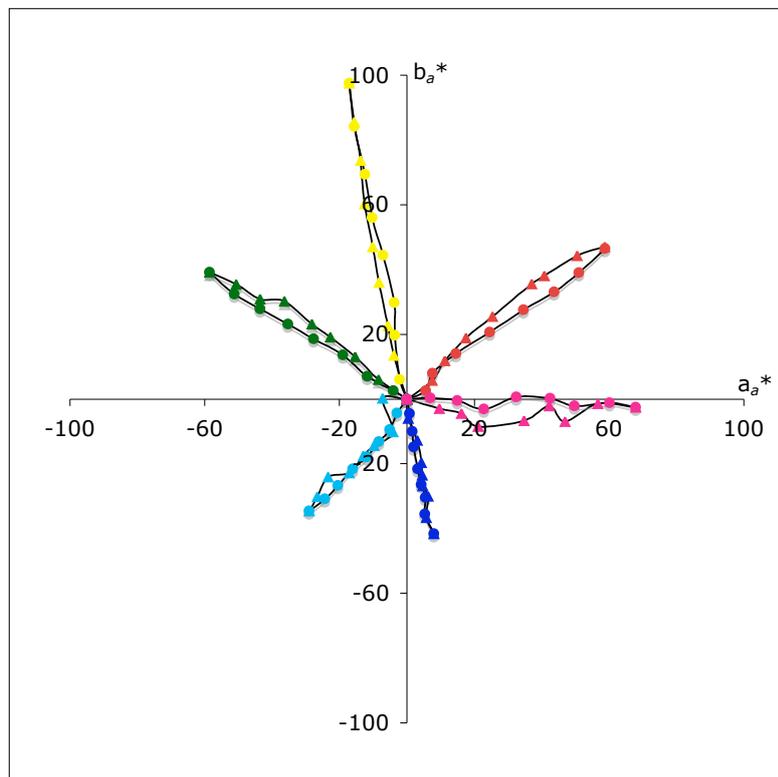


OYLCVM Bunttondreieck - CMYn5*-Separation im Vergleich. Erstausgabe[□] und Zweitausgabe[△]

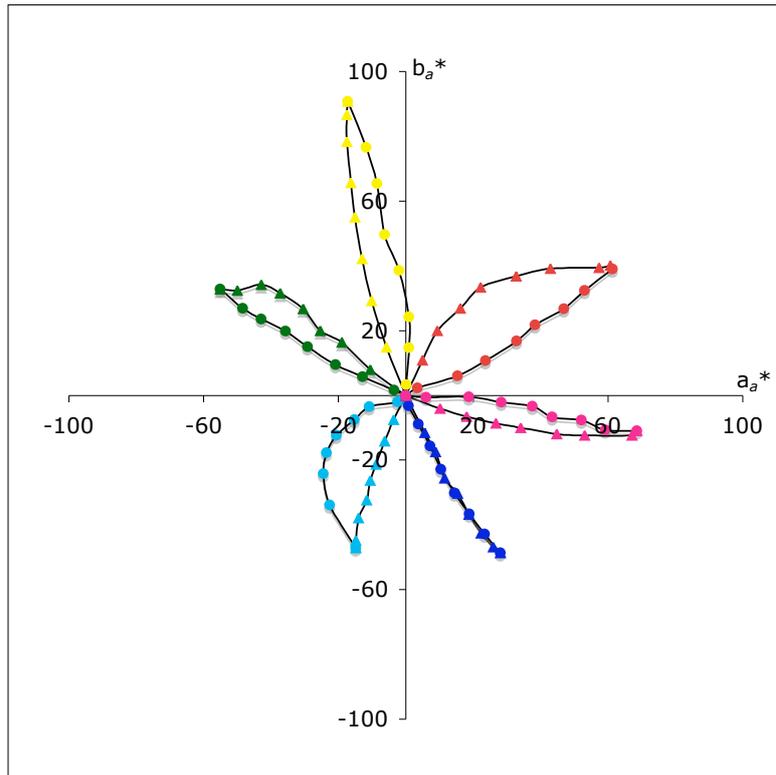
G. Diagramme Ausgabegerät Nr. 7



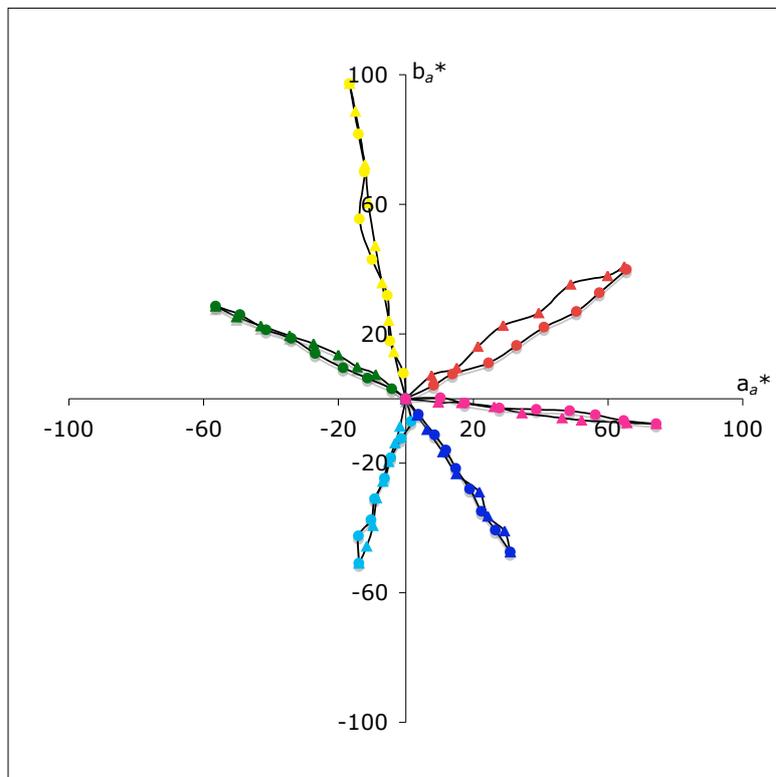
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter OLV*-Ausgabe. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



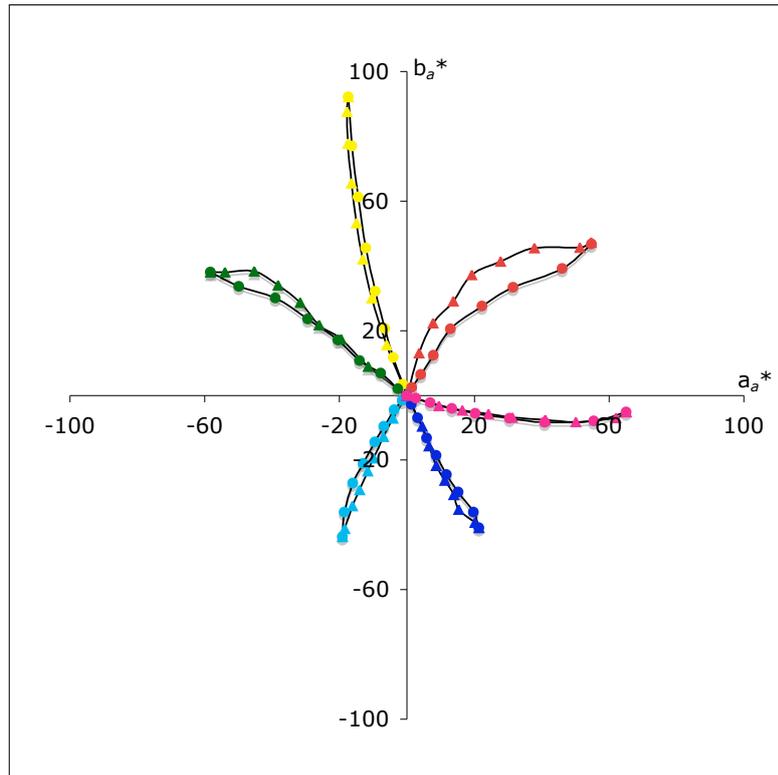
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter OLV*-Ausgabe. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



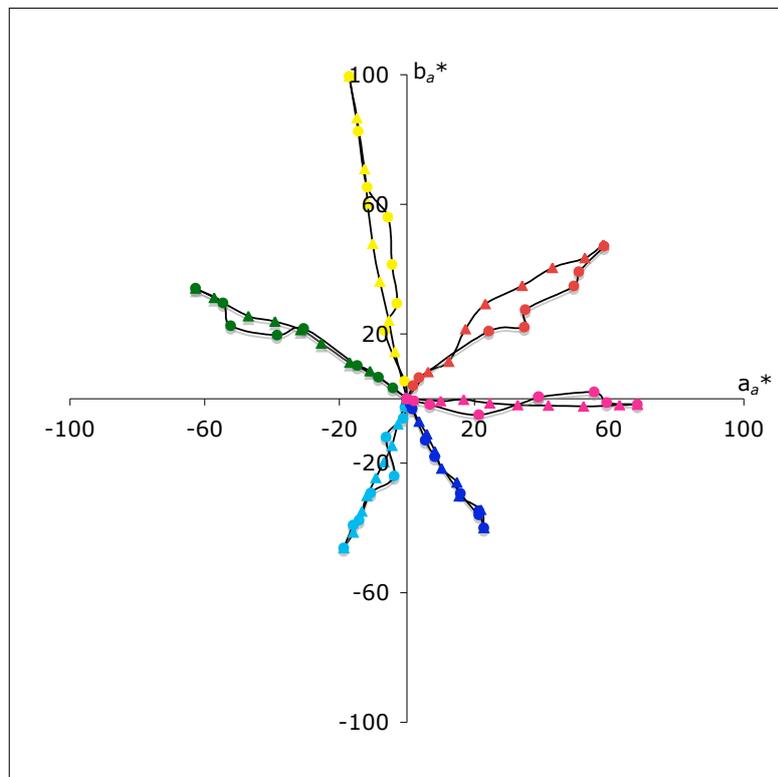
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMY0*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



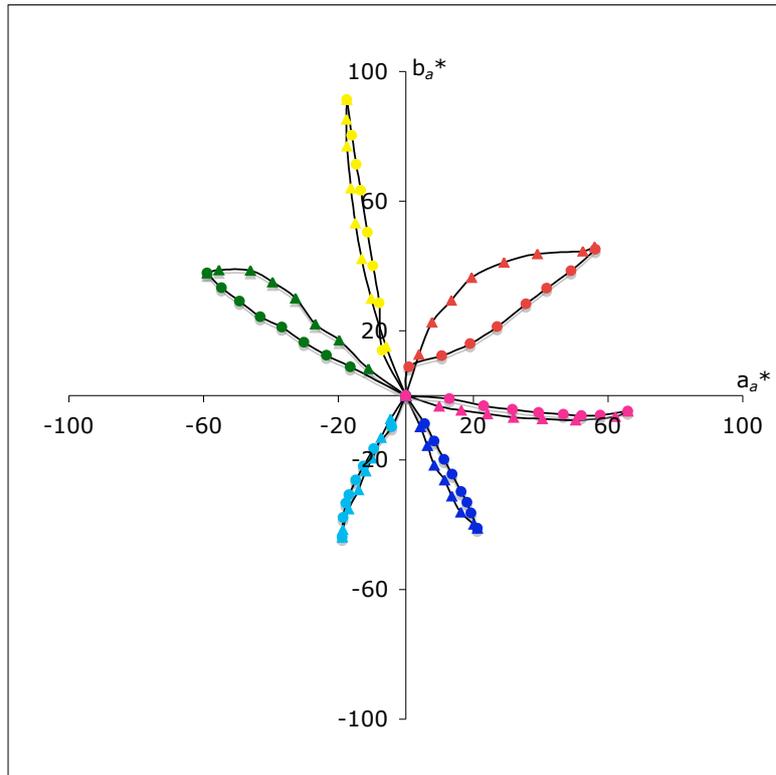
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter CMY0*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



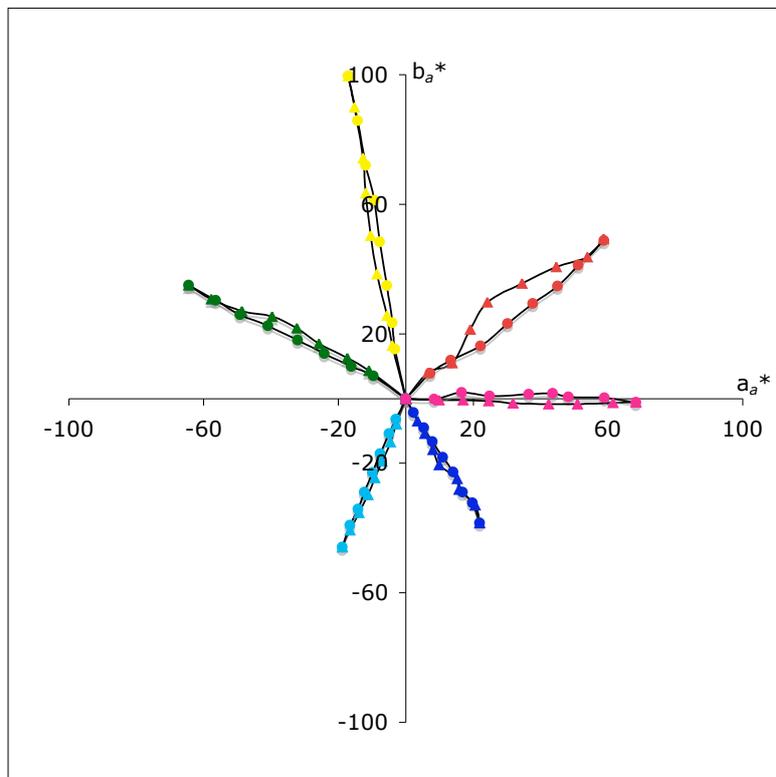
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn4*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



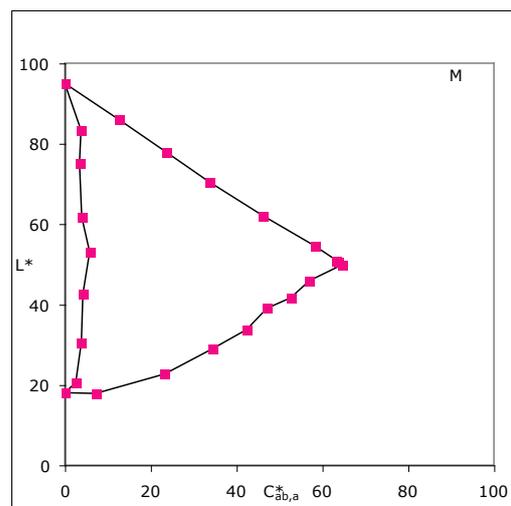
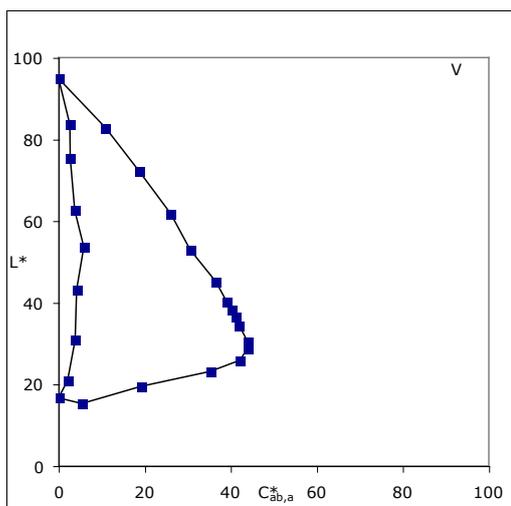
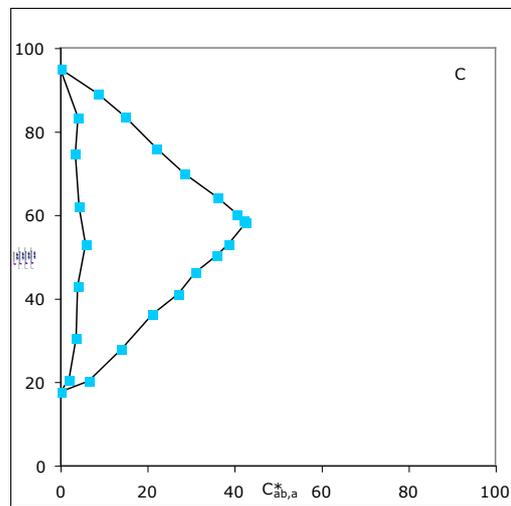
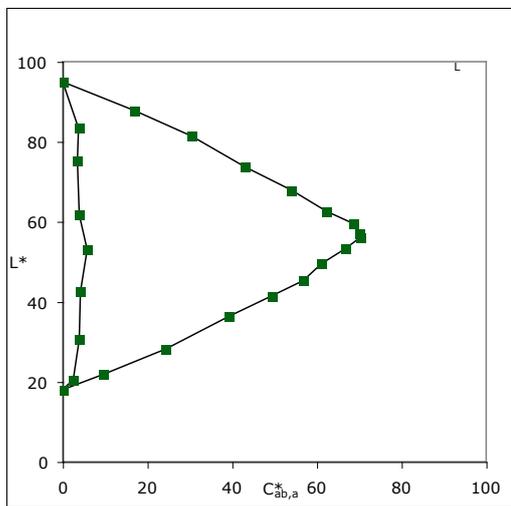
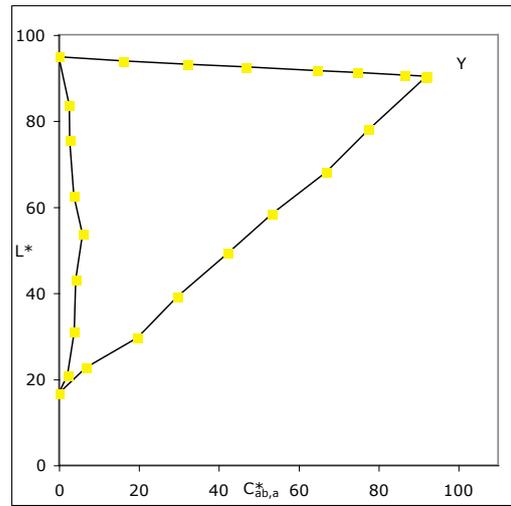
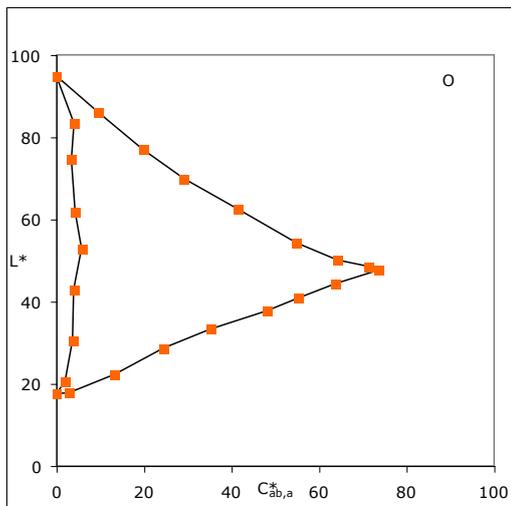
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter CMYn4*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



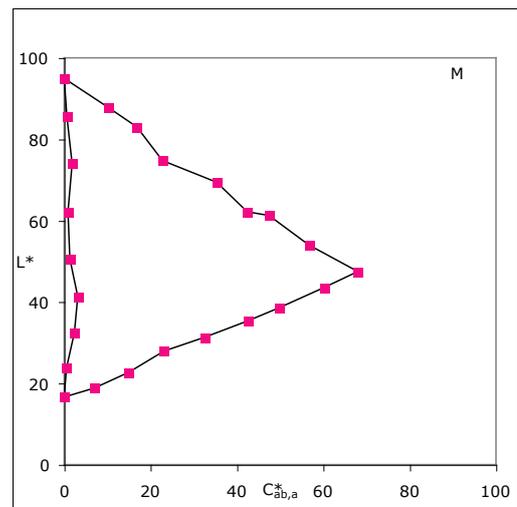
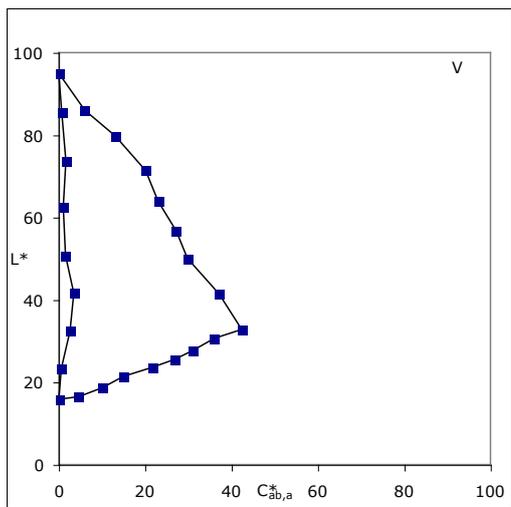
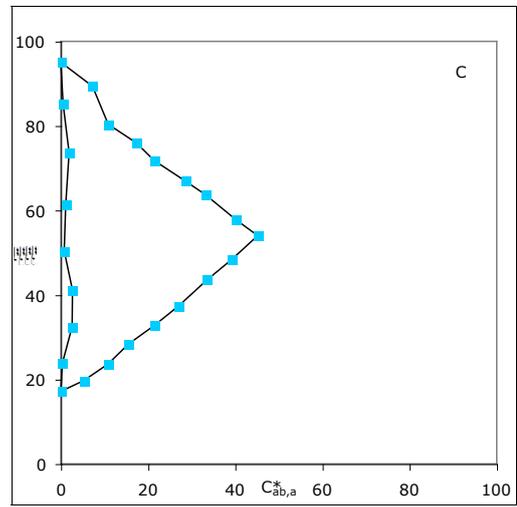
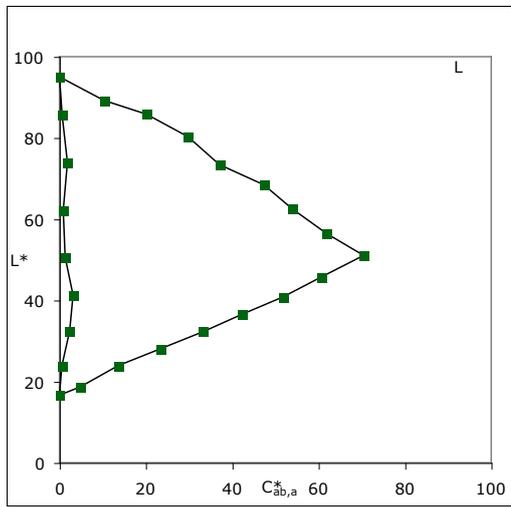
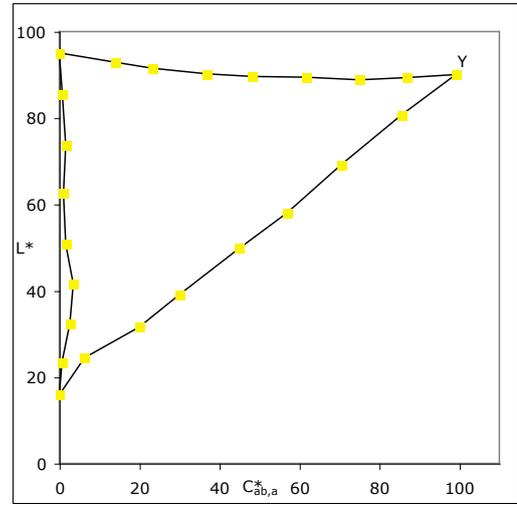
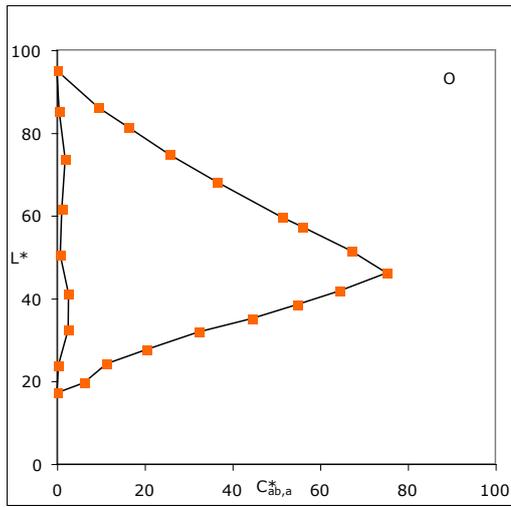
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit nicht linearisierter CMYn5*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



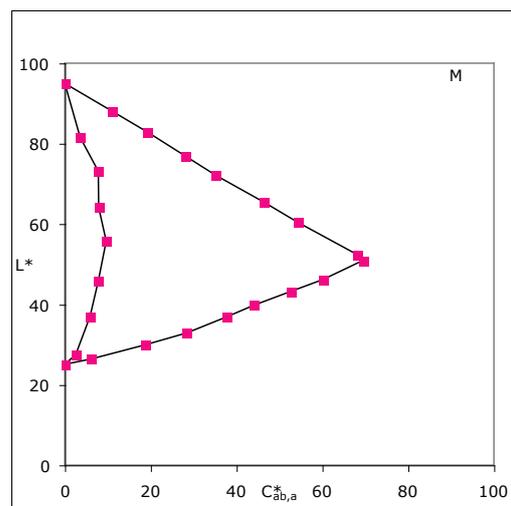
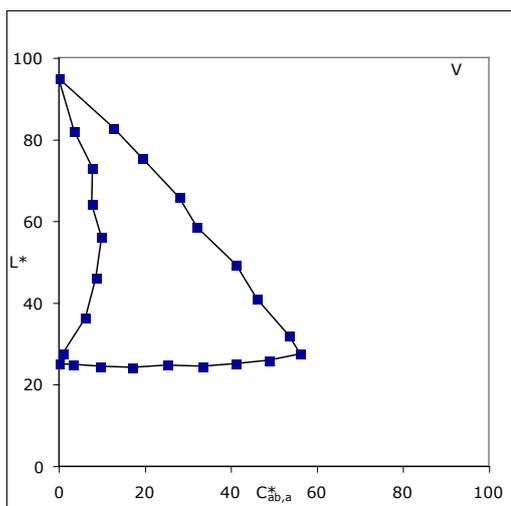
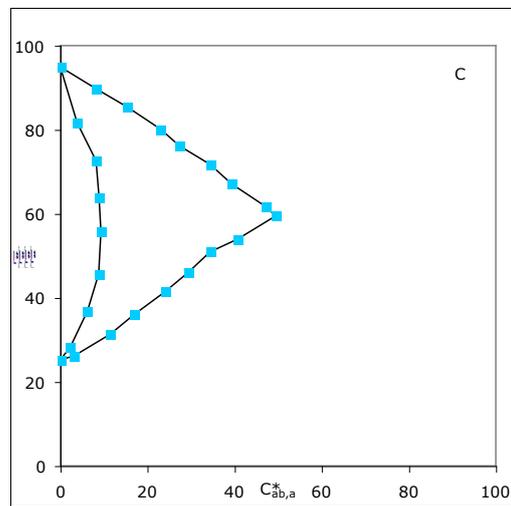
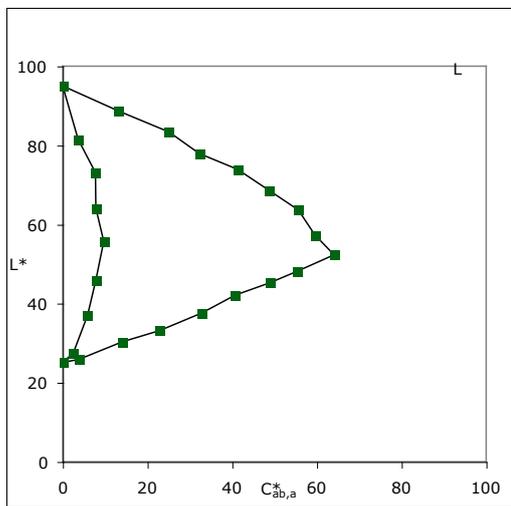
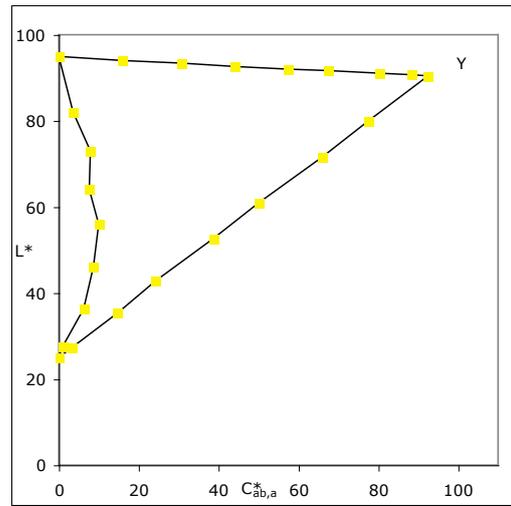
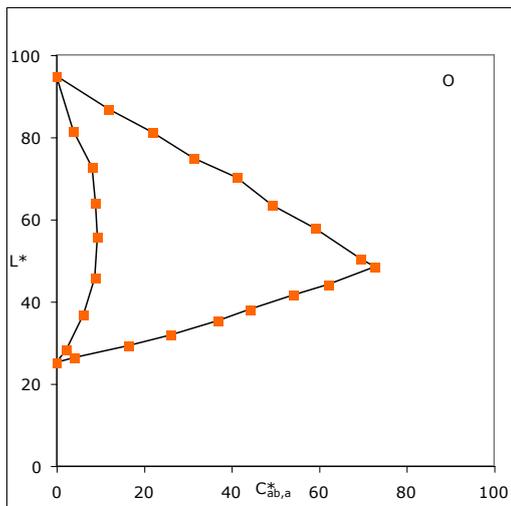
Darstellung im $a_a^*b_a^*$ -Diagramm mit linearisierter CMYn5*-Separation. \triangle - Weiß nach Bunt und \circ - Schwarz nach Bunt



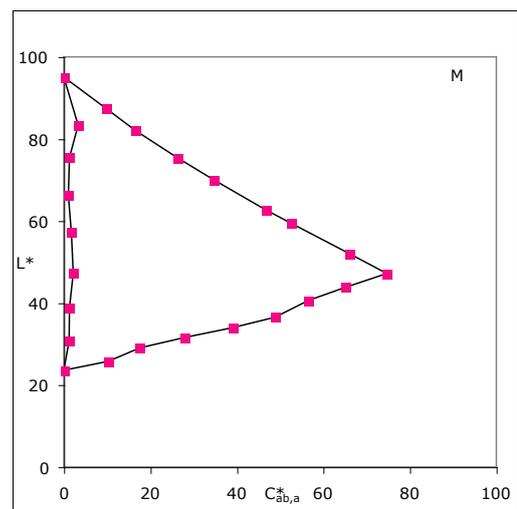
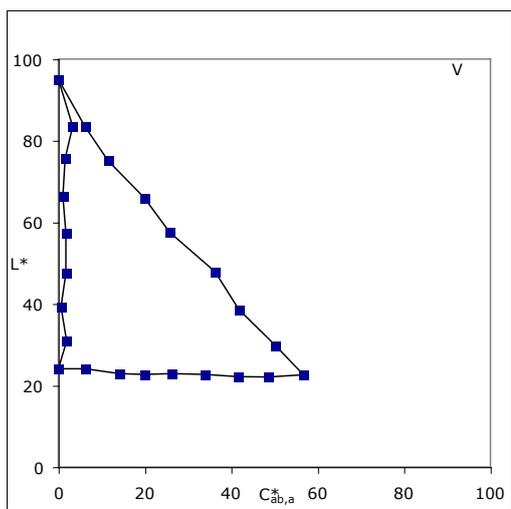
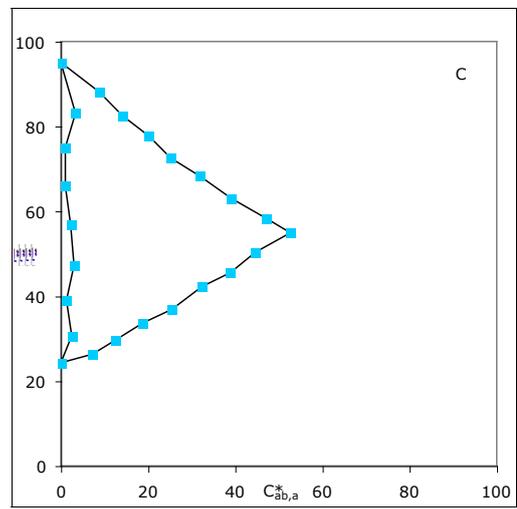
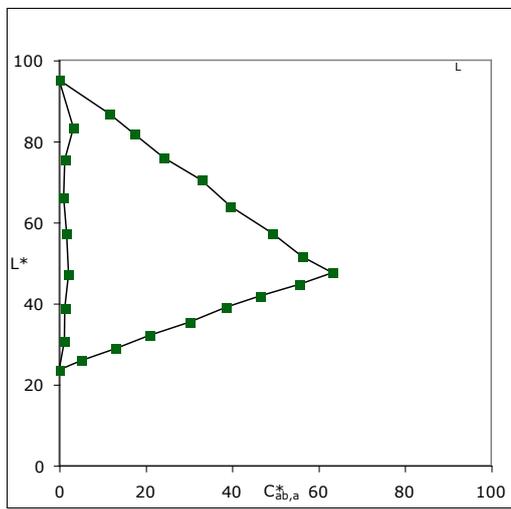
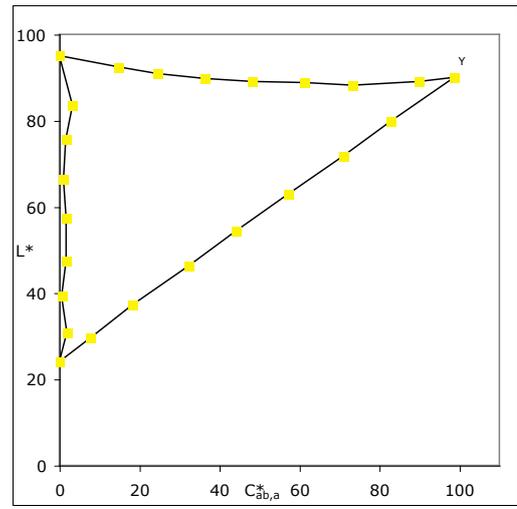
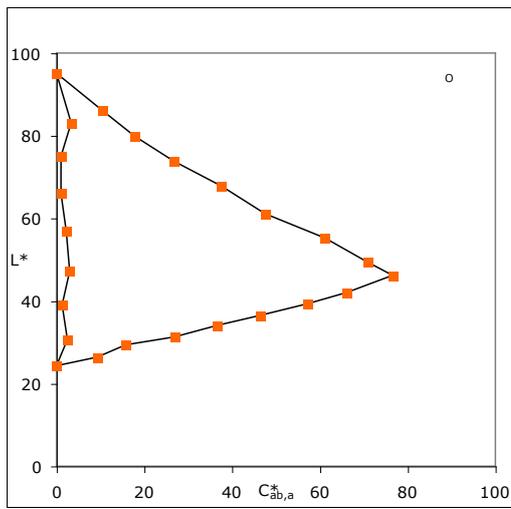
OYLCVM Bunttndreieck - nicht linearisierte OLV*-Ausgabe



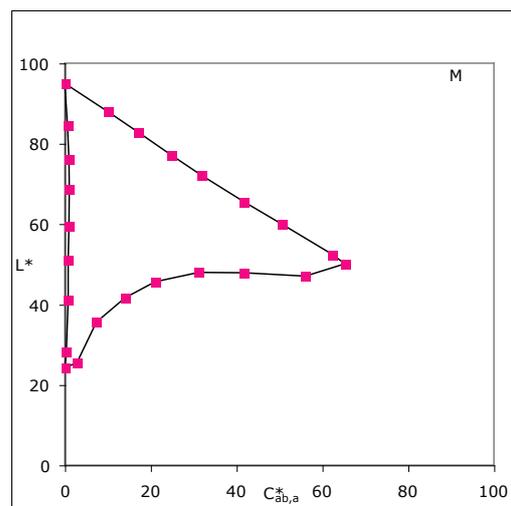
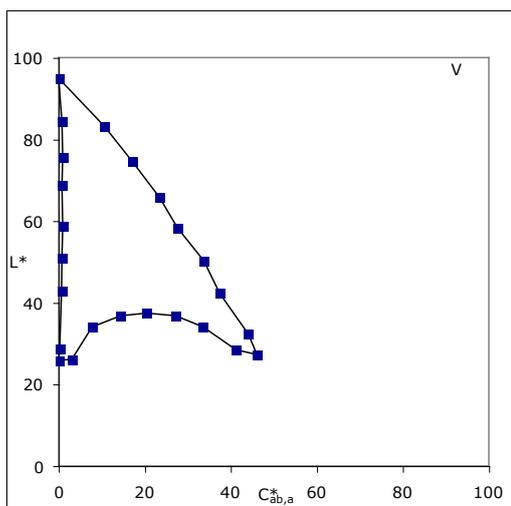
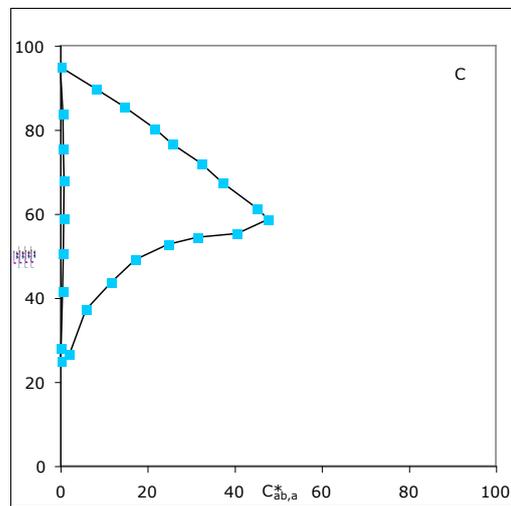
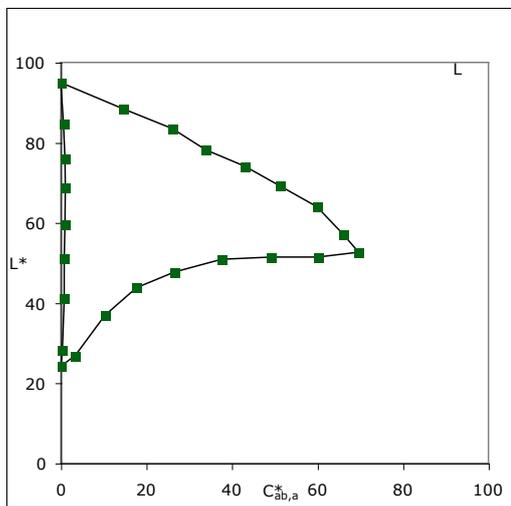
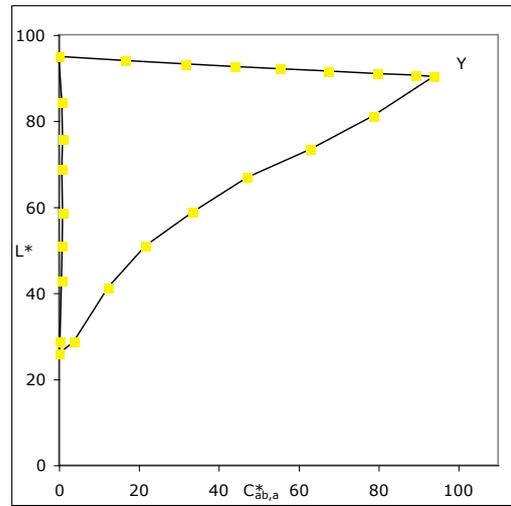
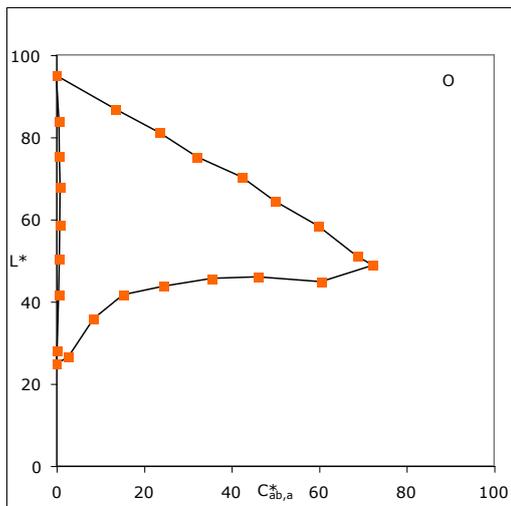
OYLCVM Bunttondreieck - linearisierte OLV*-Ausgabe



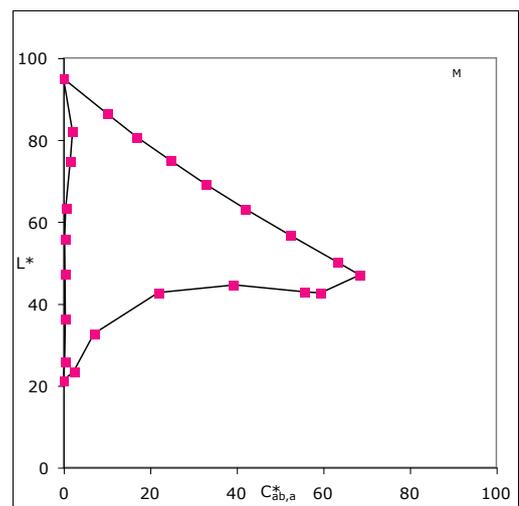
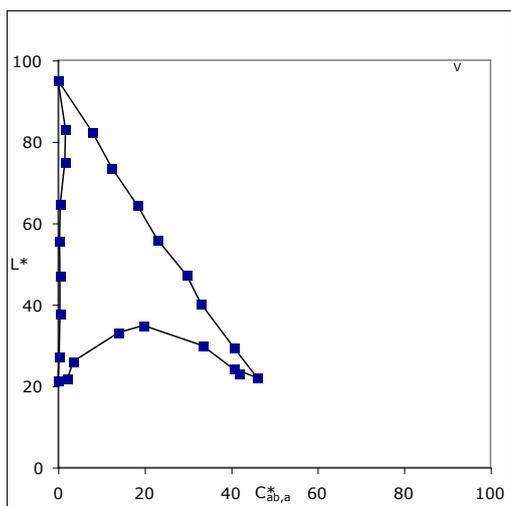
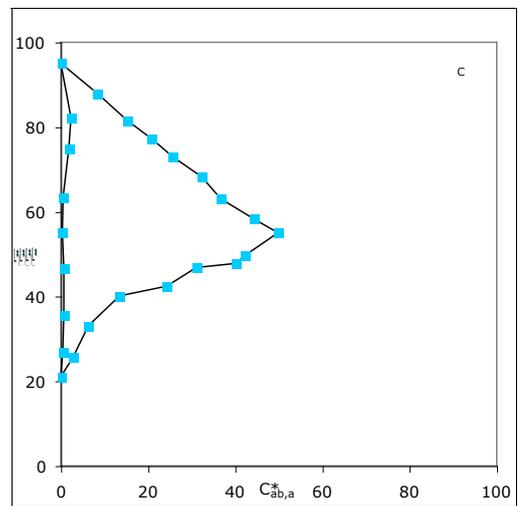
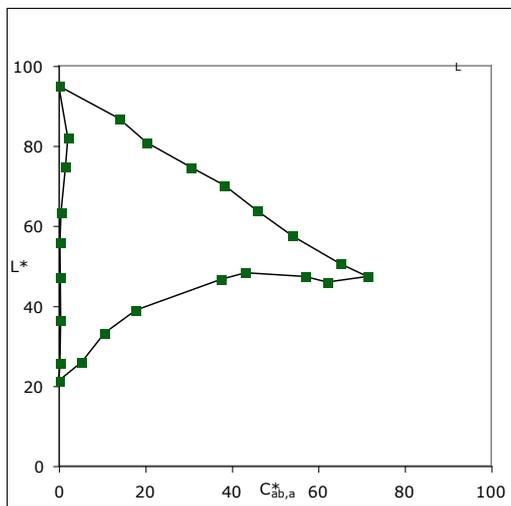
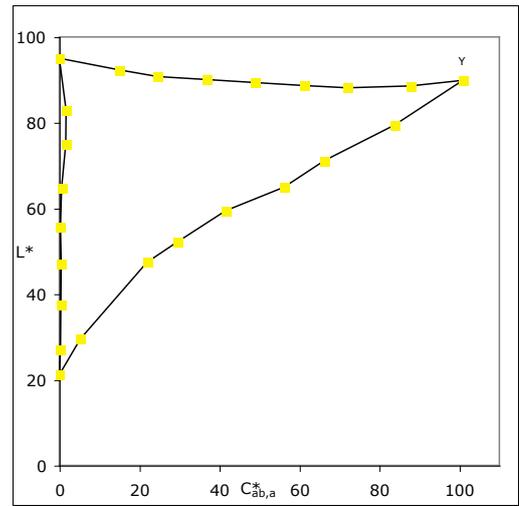
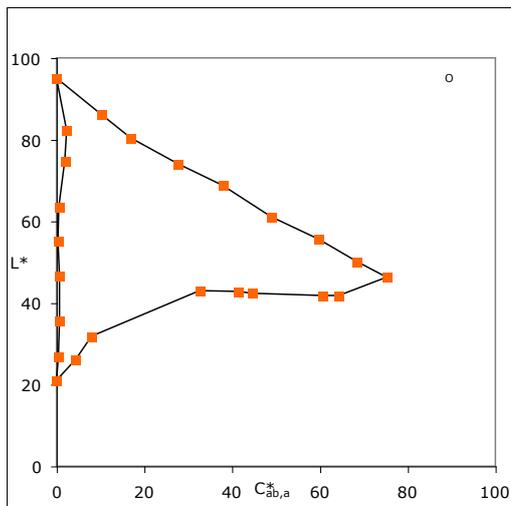
OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMY0*-Separation



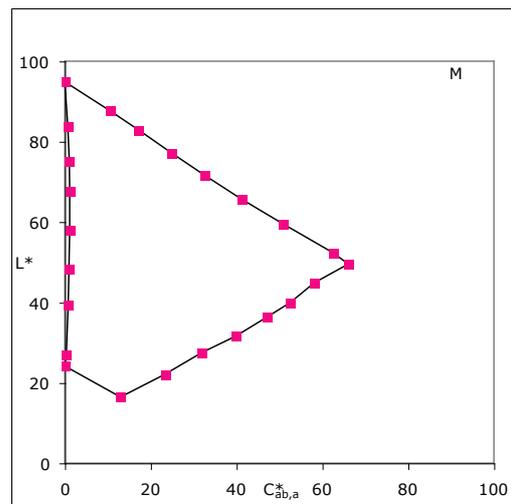
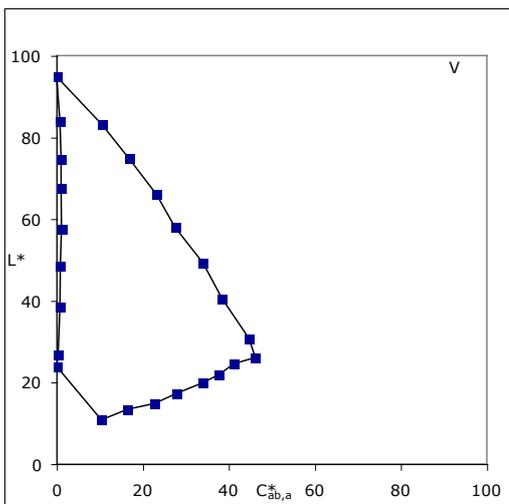
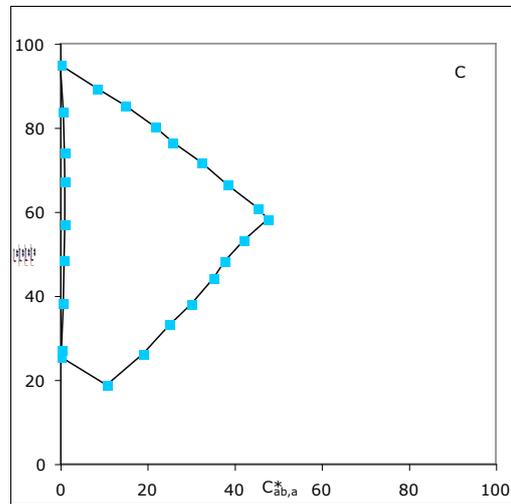
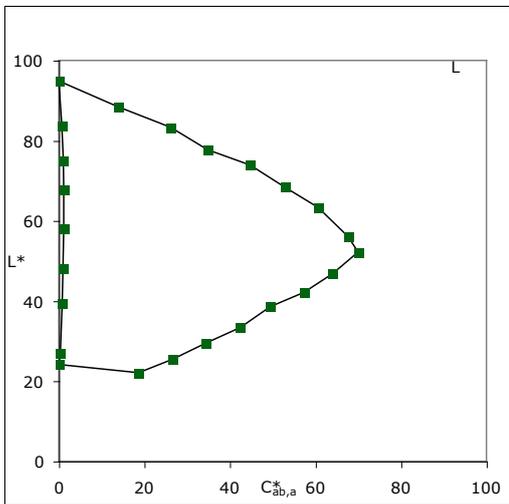
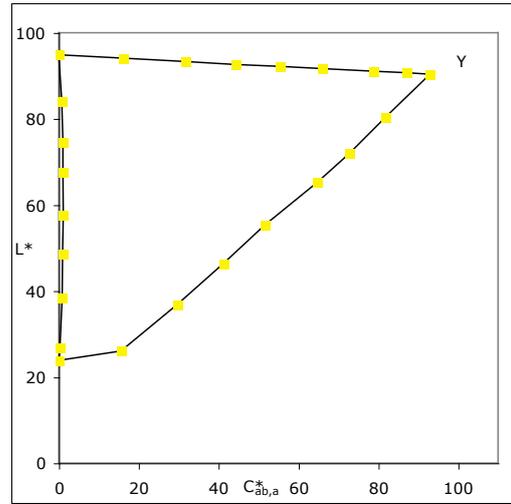
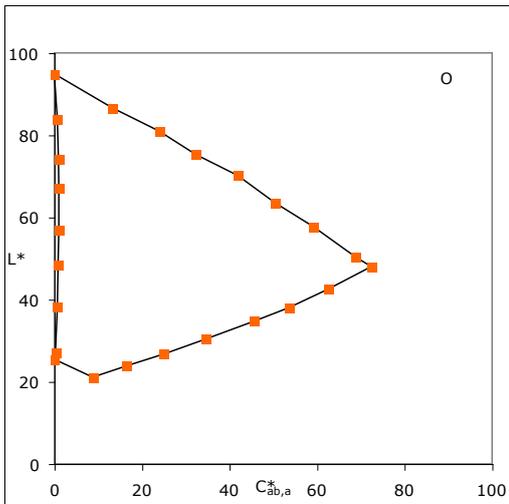
OYLCVM Bunttendreieck - linearisierte CMY0*-Separation



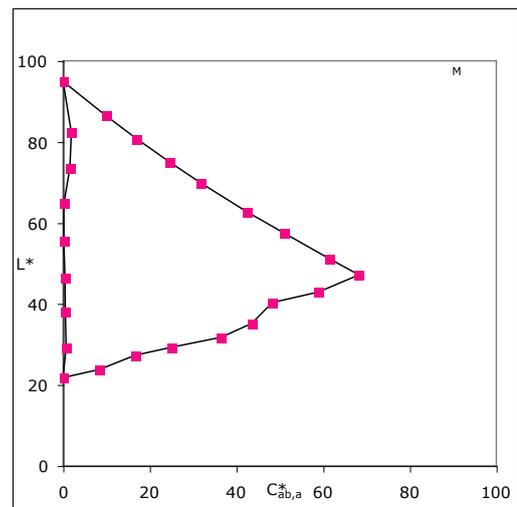
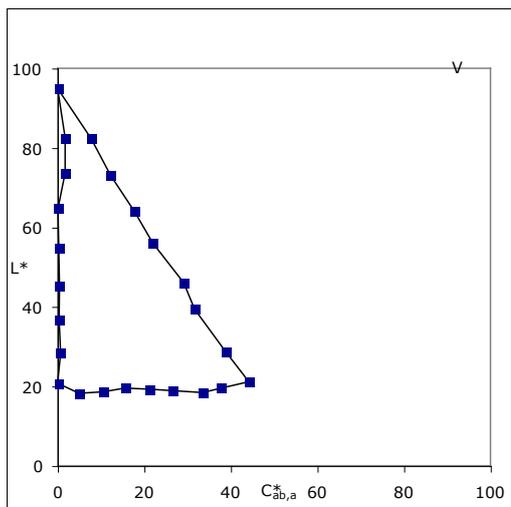
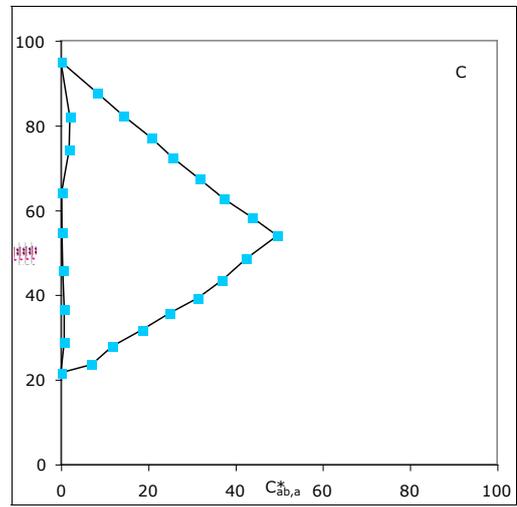
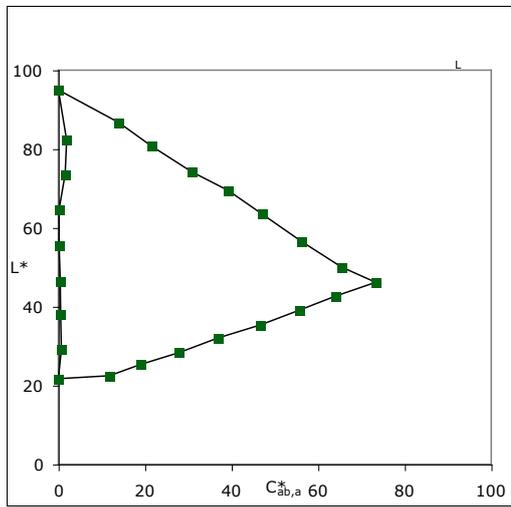
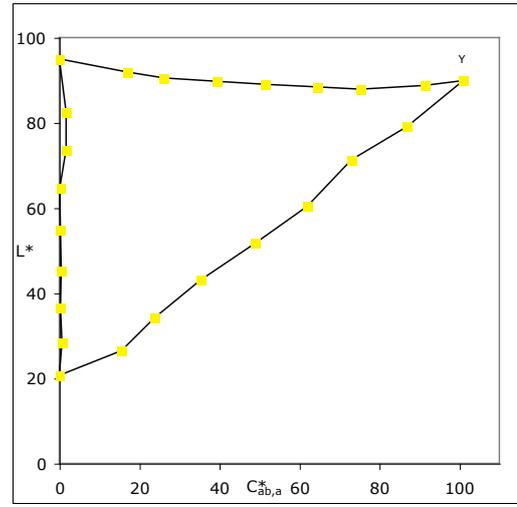
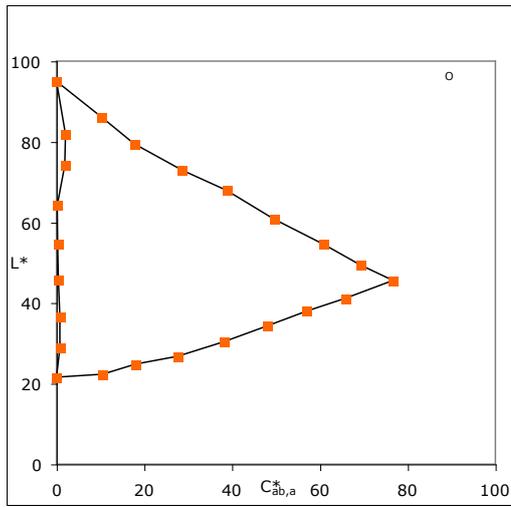
OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMYn4*-Separation



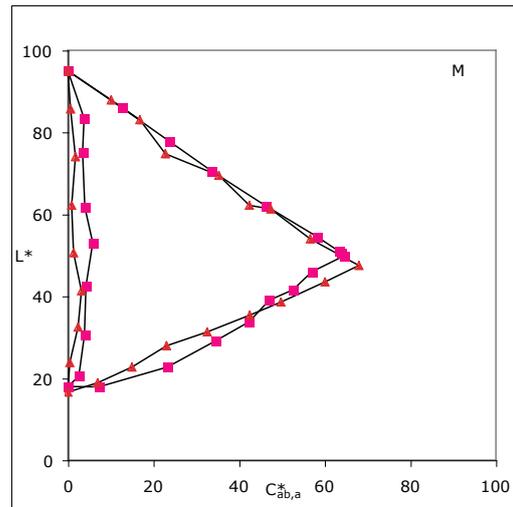
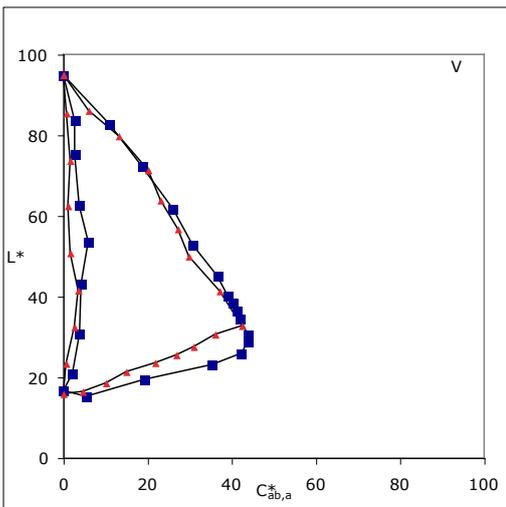
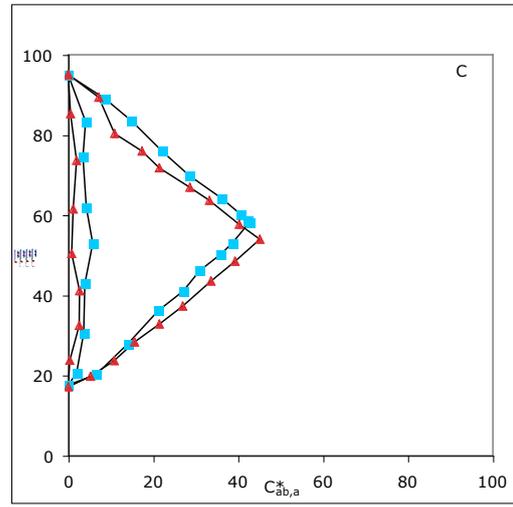
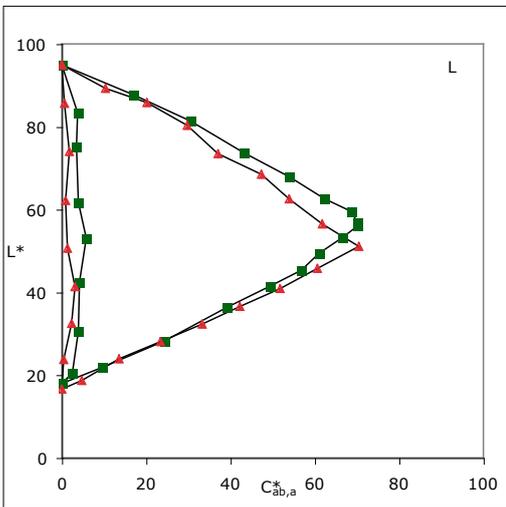
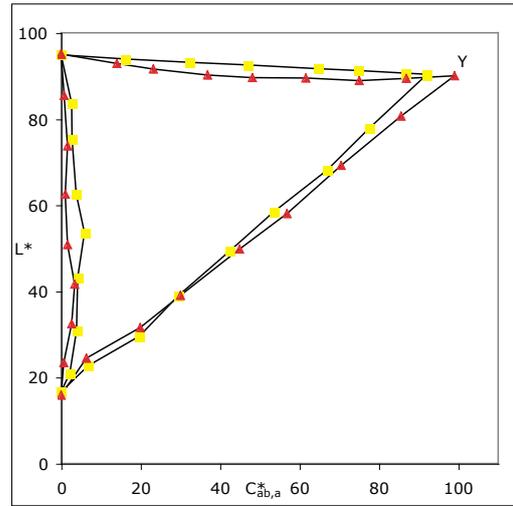
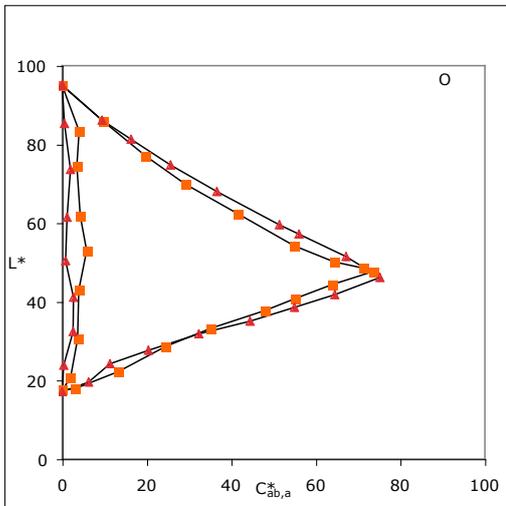
OYLCVM Bunttondreieck - linearisierte CMYn4*-Separation



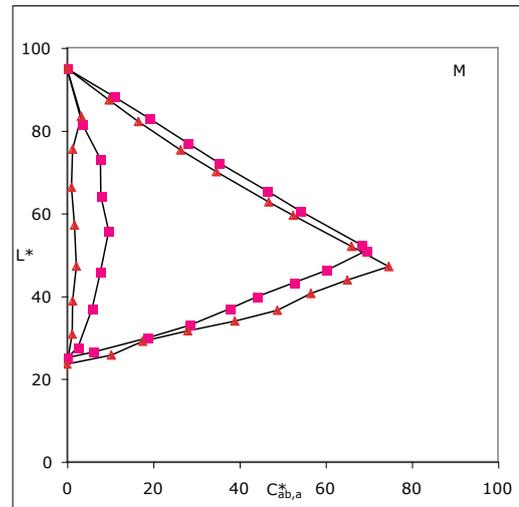
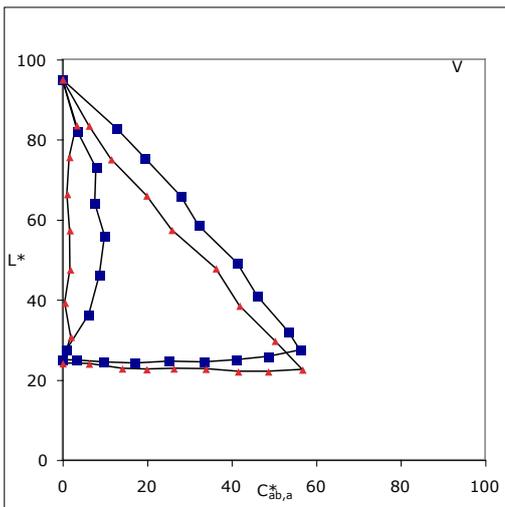
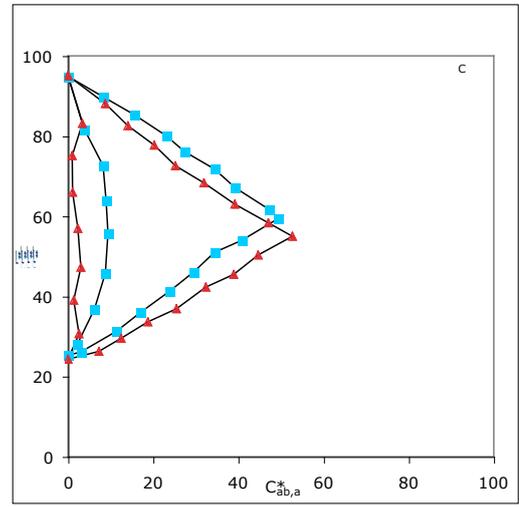
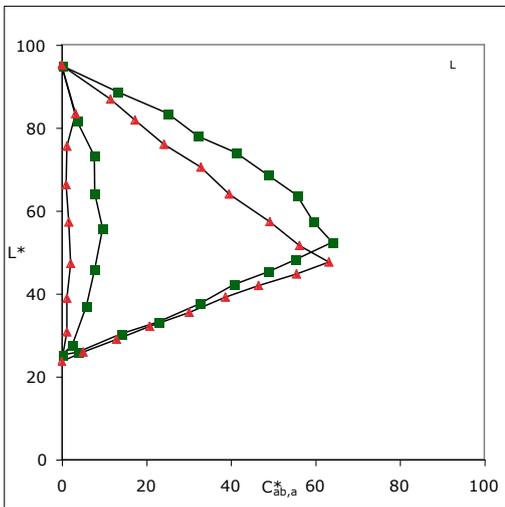
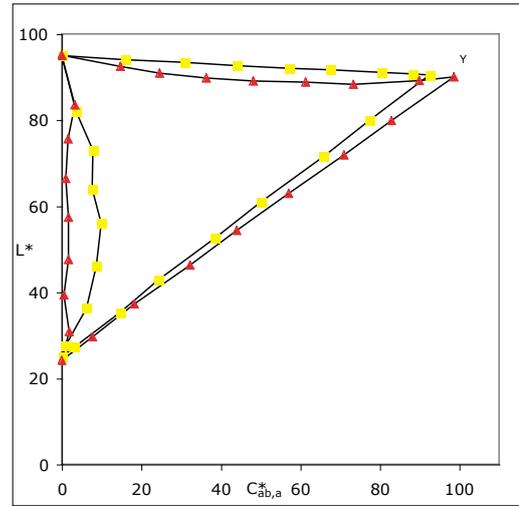
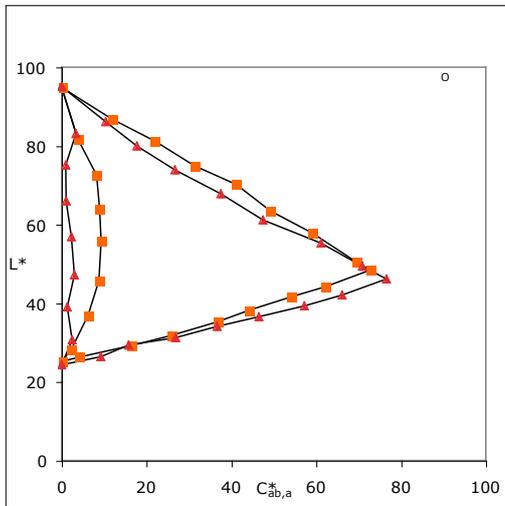
OYLCVM Bunttdreieck - nicht linearisierte CMYn5*-Separation



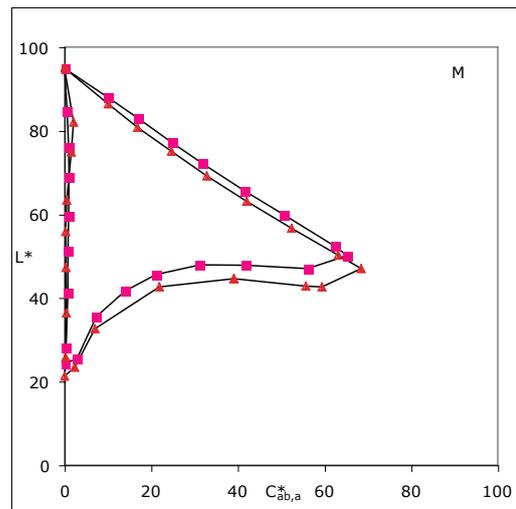
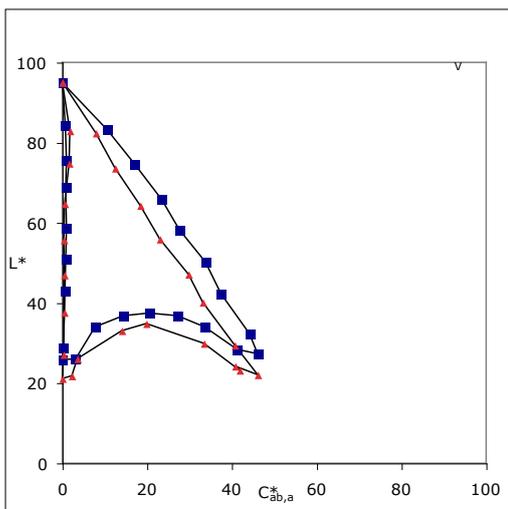
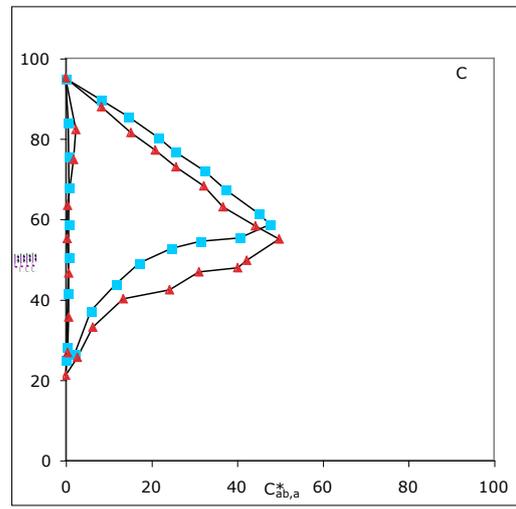
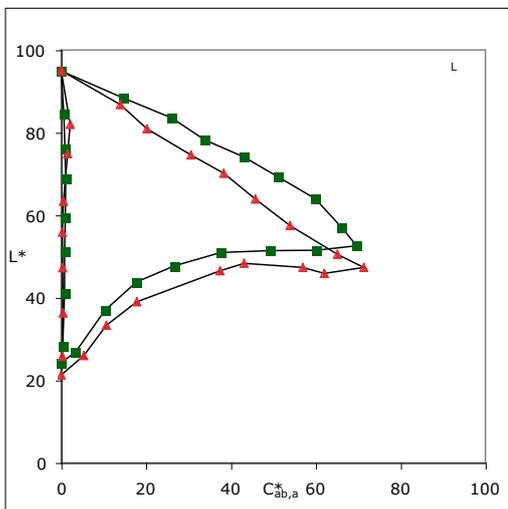
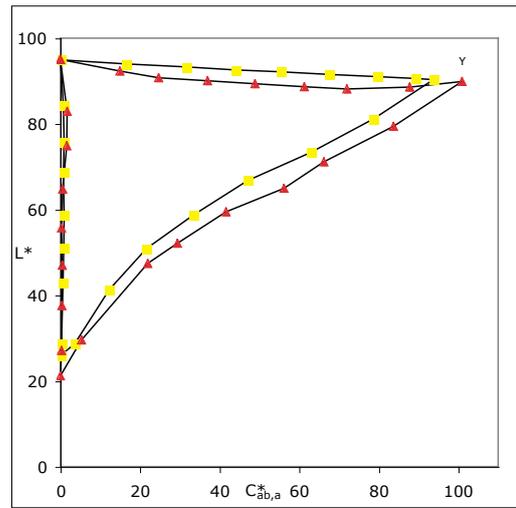
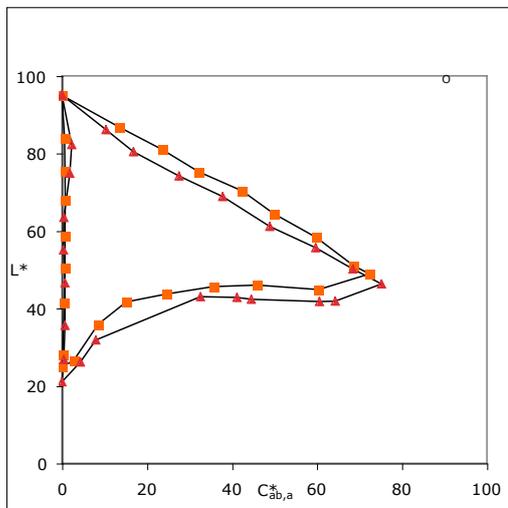
OYLCVM Bunttondreieck - linearisierter CMYn5*-Separation



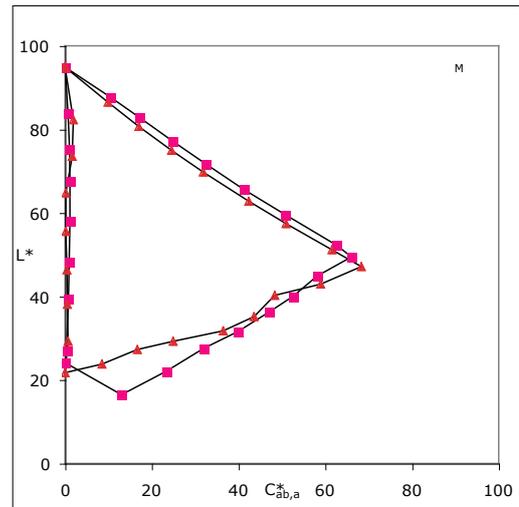
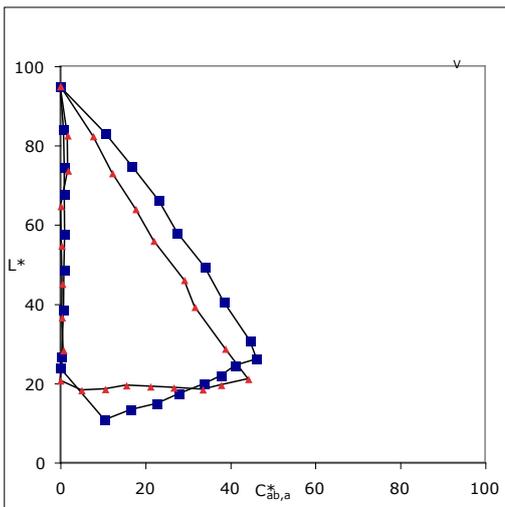
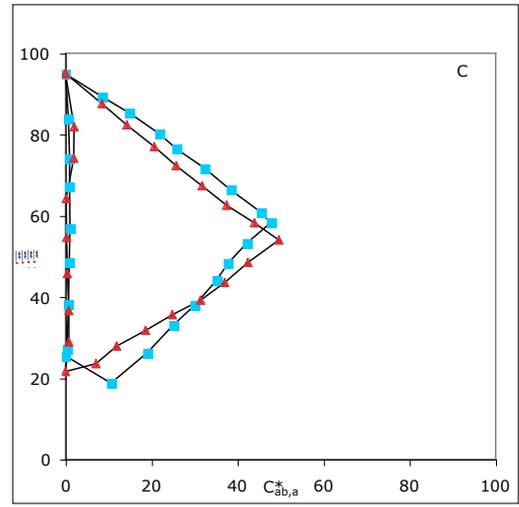
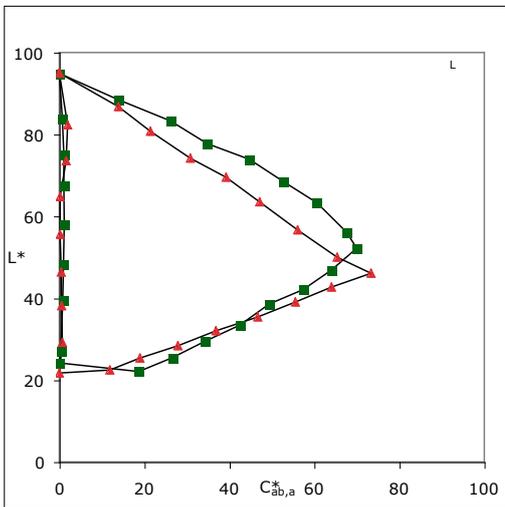
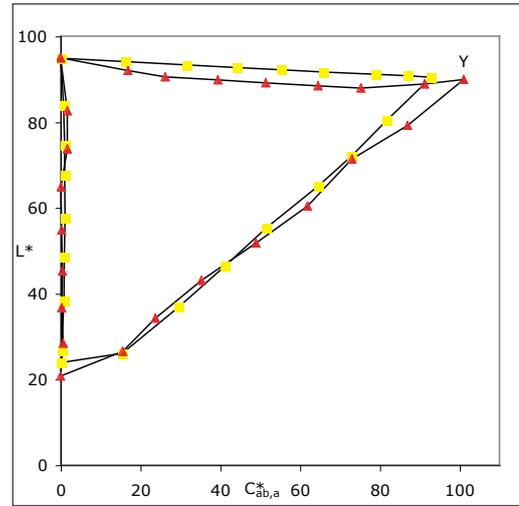
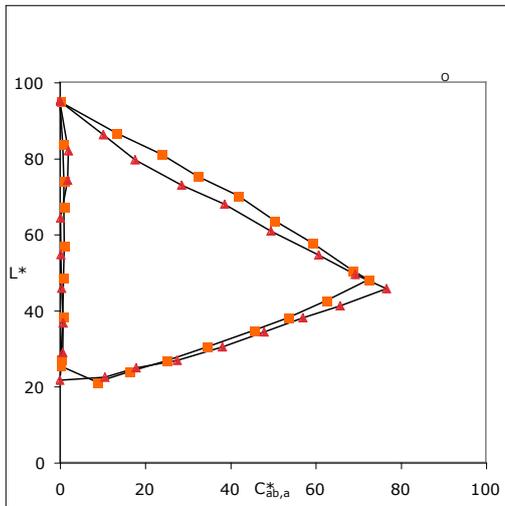
OYLCVM Bunttendreieck - nicht linearisierte OLV*-Ausgabe im Vergleich.
Erstausgabe[□] und Zweitausgabe[△]



OYLCVM Bunttdreieck - CMY0*-Separation im Vergleich. Erstausgabe[□] und Zweitausgabe[△]



OYLCVM Bunttondreieck - CMYn4*-Separation im Vergleich. Erstausgabe[□] und
Zweitausgabe[△]



OYLCVM Bunttendreieck - CMYn5*-Separation im Vergleich. Erstausgabe[□] und Zweitausgabe[△]