

Moderne Methoden der Farbmessung und Farberkennung

TU Ilmenau / ZBS e.V.: Privatdozent Dr.-Ing. habil. K.-H. Franke
 Dr.-Ing. R. Jahn

MAZeT GmbH, Jena:
Dr.-Ing. Fred Grunert
Dipl.-Ing. Frank Krumbein
Dipl.-Ing. Gunter Sieß

SilicANN Technologies
Rostock:
Dr.-Ing. F. Stüpmann

pdf der Folien wird unter <http://www.zbs-ilmenau.de> ins Netz gestellt

Farbe

- ▶ Farbwissenschaftliche Grundlagen → Newton 1672: A New Theory about Light and Colours, Young 1807, Graßmann 1853, Helmholtz 1896
- ▶ Farbe → Sinnesempfindung des menschlichen visuellen Systems
- ▶ Theoretische und praktische Grundlagen zur Farbmessung seit 1930iger Jahren (CIE, DIN, . . .)
- ▶ Messgeometrie, Glanzeffekte, räumliche Abhängigkeit von Farbreizen, Transluminiszenz
- ▶ Farbabstandsometrik und Farbabstandsempfinden → Weiterentwicklung von Farbräumen
- ▶ Umfeldabhängigkeit von Farbwahrnehmungen

Messmethoden für Farbe

- ▶ Vergleichsmethode
- ▶ Dreibereichsverfahren
- ▶ Spektralverfahren
- ▶ In jedem Falle erhält der physikalische Farbreiz $\varphi(\lambda)$ eine Bewertung, die dem menschlichen Standardbetrachter entspricht

$$F = k \cdot \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \bar{f}(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda = k \cdot \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} e(\lambda) \cdot \bar{f}^*(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda = k \cdot \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} e(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{s}^*(\lambda) \cdot d\lambda$$

Technische Anordnungen zur Farbbewertung

- ▶ Dreibereichssensorik (liefert wellenlängenintegrale Farbwerte, keine spektrale Information)
 - drei raum- oder zeitmultiplexe Transmissionfilter plus Photoempfänger
 - zeitmultiplexe Dreibereichsbeleuchtung plus Photoempfänger
 - Nutzung der spektralen Abhängigkeit der Rekombinationstiefe von Photonen in Schichtdioden
 - ortsauflösende Varianten der genannten Ansätze (Messkameras, Modellierung der geometrischen Verhältnisse, Filterräder)
- ▶ Spektralphotometrische Anordnungen
- ▶ Mehrbereichssensorik (deckt die Lücke ab, in den letzten Jahren verstärkt beachtet)

Aufgabenklassen (technisch)

- AK1:** Nachweis der Veränderung von Objekteigenschaften über Änderungen in der spektralen Charakteristik (eigentlich kein Farbproblem)
- AK2:** Überwachung der Konstanz farblicher Erscheinungen (Bezug zum visuellen System des Menschen ist gegeben, Farbabstandsproblematik ist zu beachten (Helmholtz: höhere Farbmektrik), auf Absolutanbindung kann evtl. verzichtet werden)
- AK3:** absolute Angabe der Farbvalenz F in genormten Farbräumen

Haupteinsetzfelder für Farbsensoren (Punktmessung)

- Bewertung von Oberflächen (Farbstoffschichten, Kunststoffe, Naturmaterialien, Textilien, Gemenge, . . .)
- Bewertung von Lebensmitteln
- Bewertung von Lichtquellen und Leuchtstoffen
- Kalibrierung und Überwachung bzw. Steuerung von Farbwiedergabesystemen (Drucker, Monitore, Beamer, Filme → Color-Management)

Technische Herausforderungen an Einzelsensoren und Sensorarrays

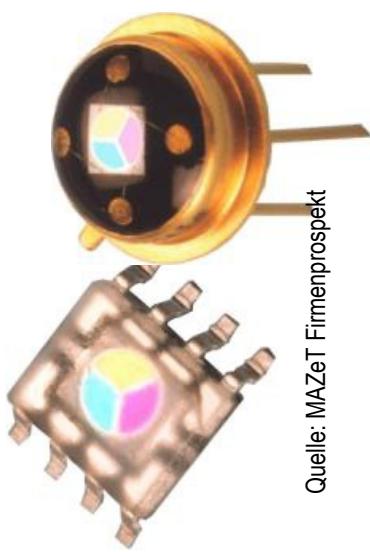
- Kostengünstige, miniaturisierte und „einfache“ Sensorik → sehr große Stückzahlen
- Augengenaue Detektion von Farbunterschieden → relative Farbmessung, Empfindungsunterschiede
- Absolute Farbmessung, Vergleich, Farbreproduktion, „True Color“ → steigende Genauigkeitsansprüche

Konsequenzen für Sensorkonzepte (Punktmessung)

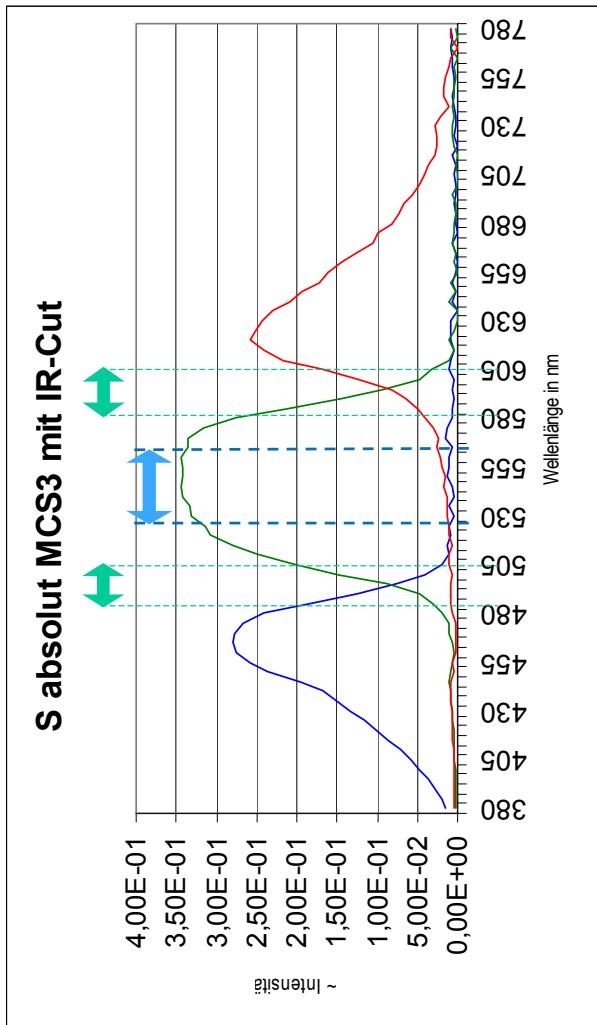
- Niedrigste Preise und hohe Stückzahlen lassen Lösungen mit spezieller spektraler Bewertung im Sinne der Aufgabenklasse **AK1** nur bei Massenanwendung zu → „Pro“-Argumentation ohne diesen Hintergrund legt oft wissenschaftliche oder technologische Defizite!
- Relativer oder absoluter Messanspruch muss erfüllt werden (**AK2** und **AK3**)
- Gerätespezifische Räume (z.B. sRGB) sind nur für unmittelbare Kopplung zur Farbwiedergabe vorteilhaft
→ dies steht bei Einzelsensorik nicht im Vordergrund → **Konsequenz: XYZ-Normalvalenzsystem**

Umsetzung der Konsequenzen in der JENCOLOUR® - Reihe von MAZeT

Ausgangspunkt: JENCOLOUR® MCS Sensoren:



Quelle: MAZeT Firmenprospekt



Filterkurven sind durch Kompromisse geprägt

- Als RGB-Sensoren starke Abweichungen zu den Spektralwertkurven

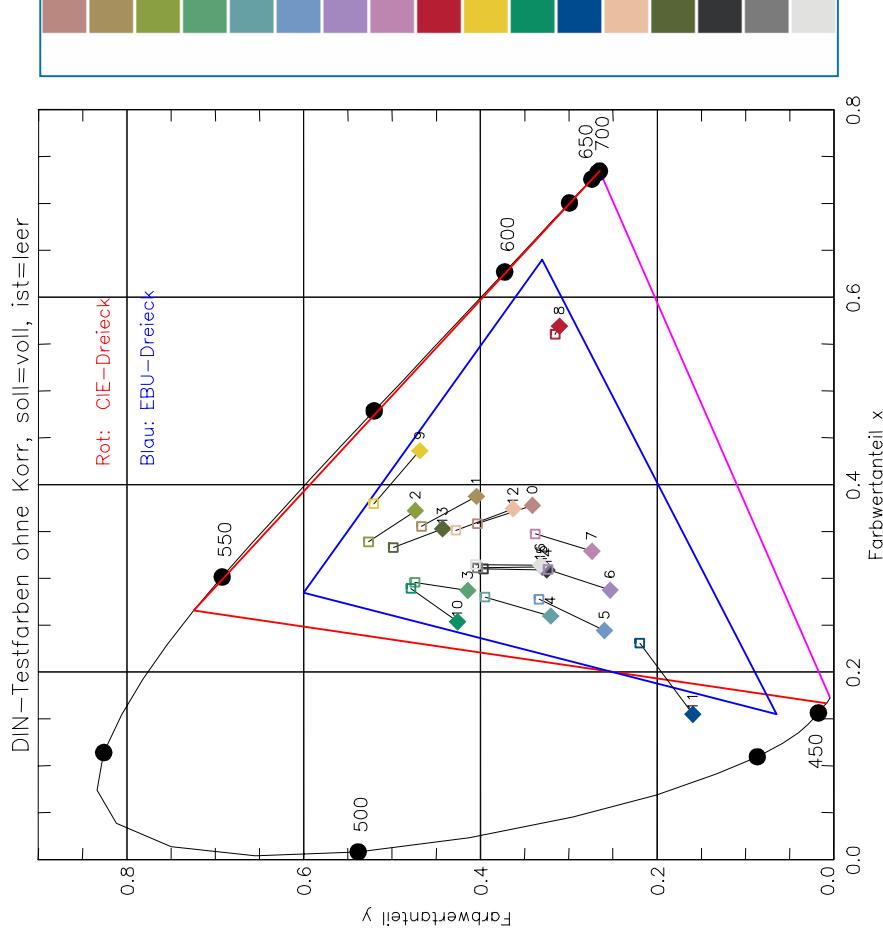
Geringe Überlappung der drei Filter

- Zusätzlicher negativer Effekt: Konstanz der Empfindlichkeitskurven im Bereich von 530 bis 575 nm

Farbmessung: Matrizerung ist erforderlich (nichtnegative, unimodale Sensorkurven)

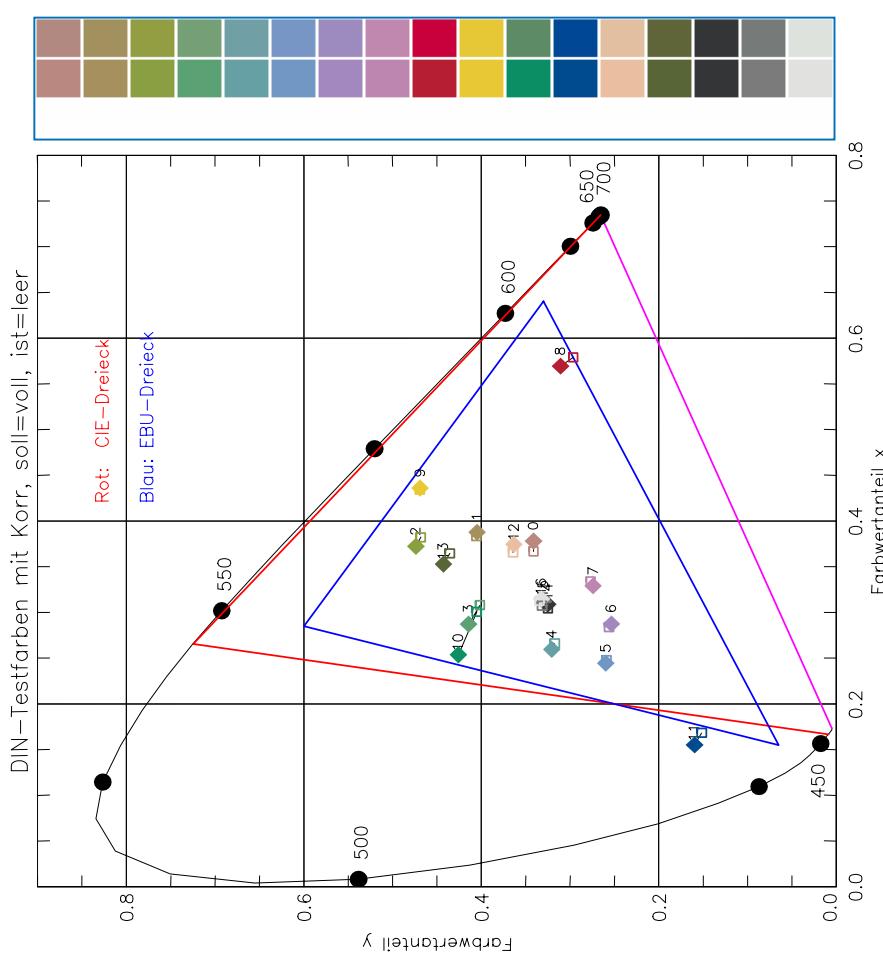
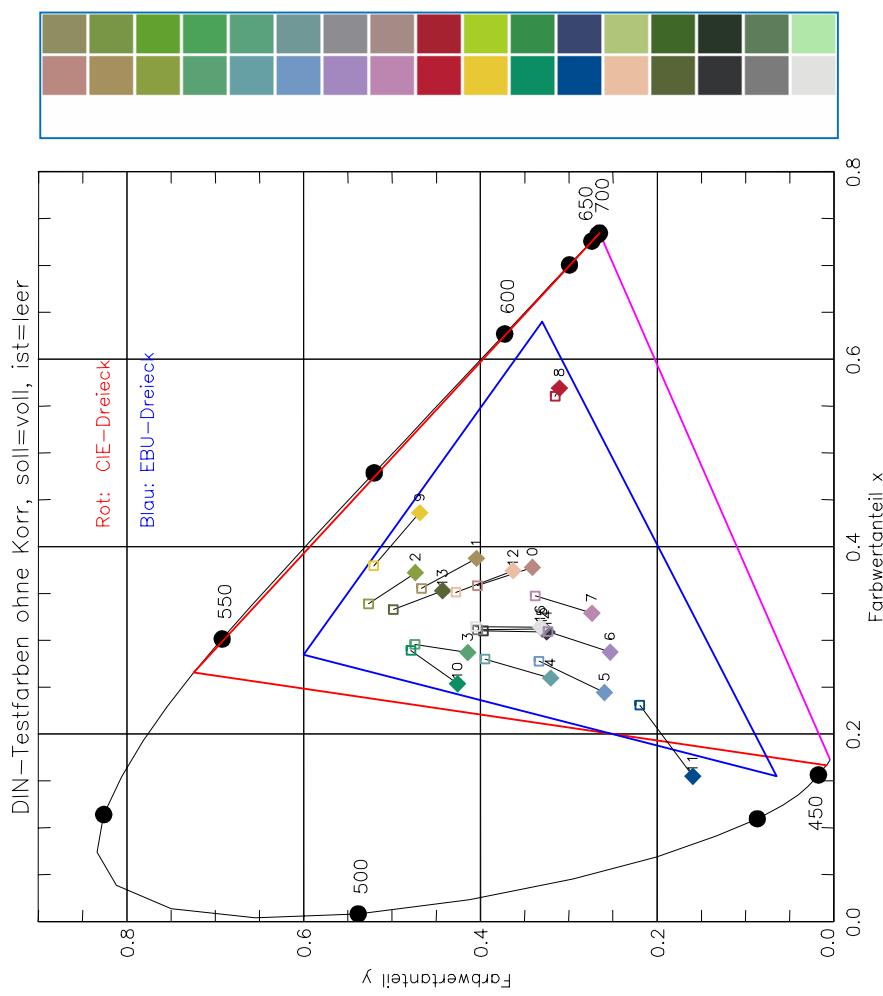
Möglichkeiten zur Verbesserung:

- Targetbezogene globale linearen Korrektur (kann mit der erforderlichen Matrizierung verbunden werden, bringt Verbesserungen aber nur bei breitbandigen Reizen)



mittleres $\Delta E = 23,3$
maximales $\Delta E = 36,9$

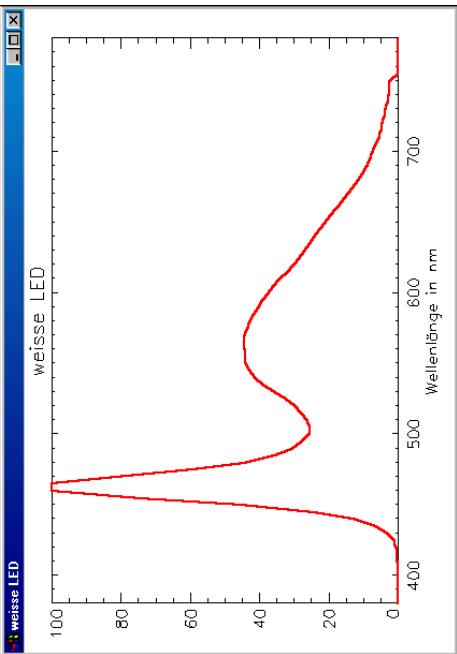
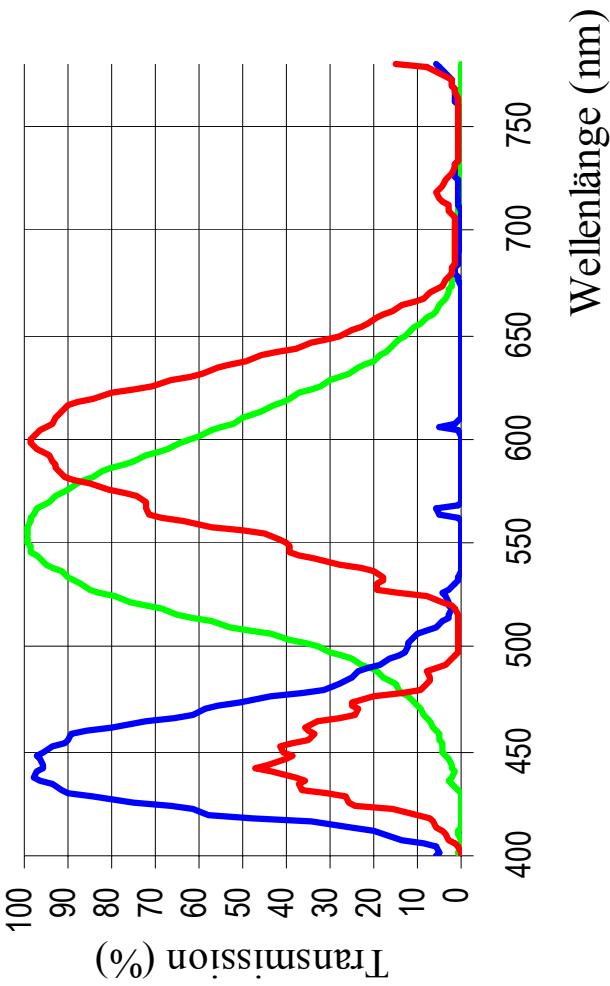
Sensor: MCS3
Korrektur: keine



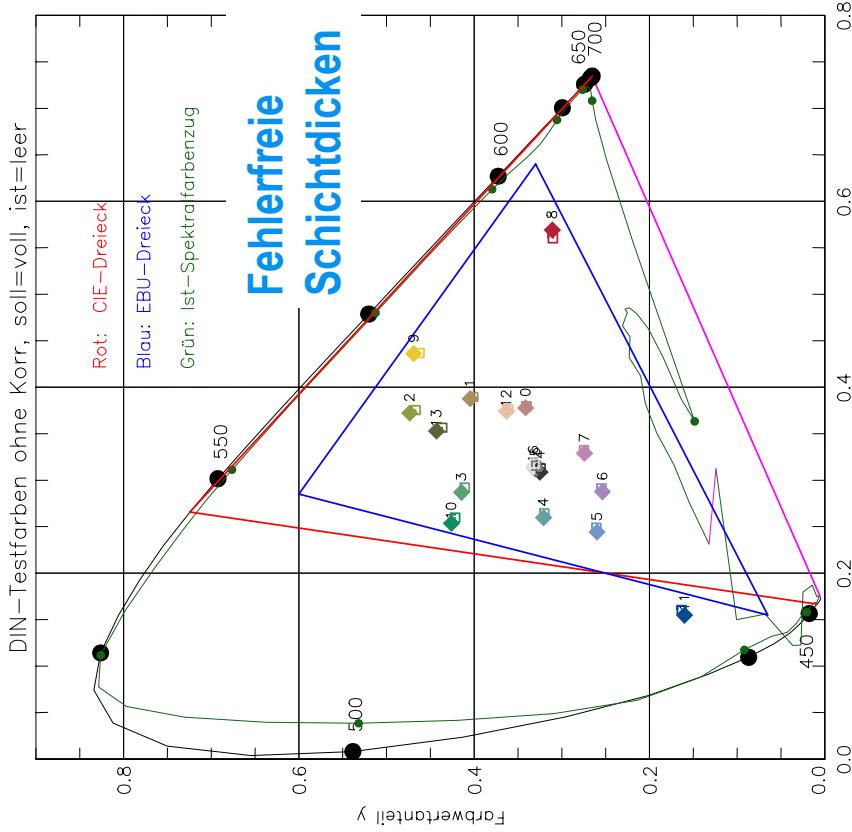
mittleres $\Delta E = 4,8$
maximales $\Delta E = 10,1$

Sensor: MCS3
Korrektur: globale Matrizierung

JENCOLOUR® True Colour Sensoren MTCS AT:



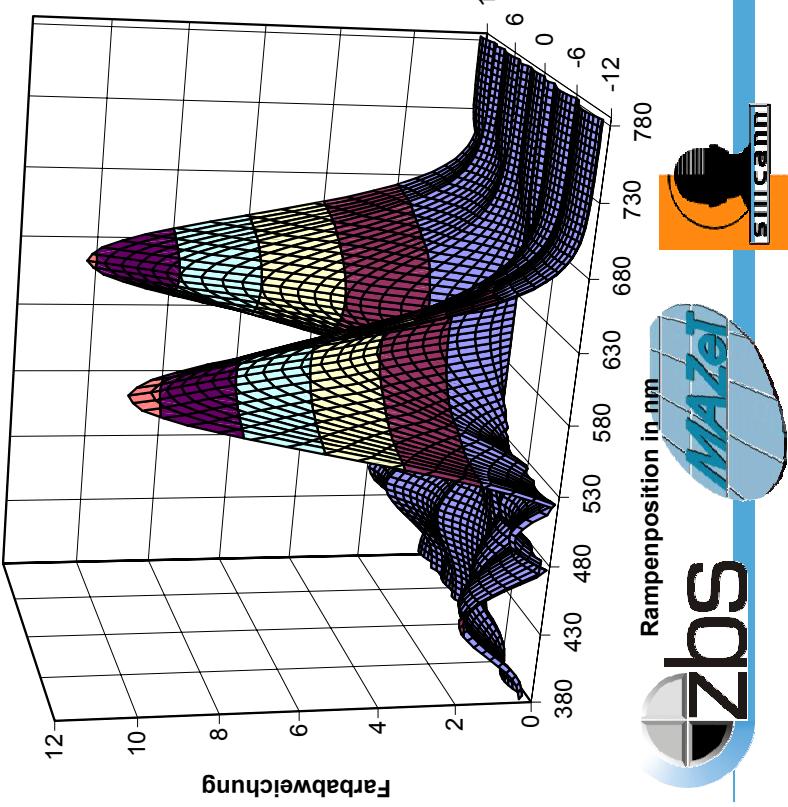
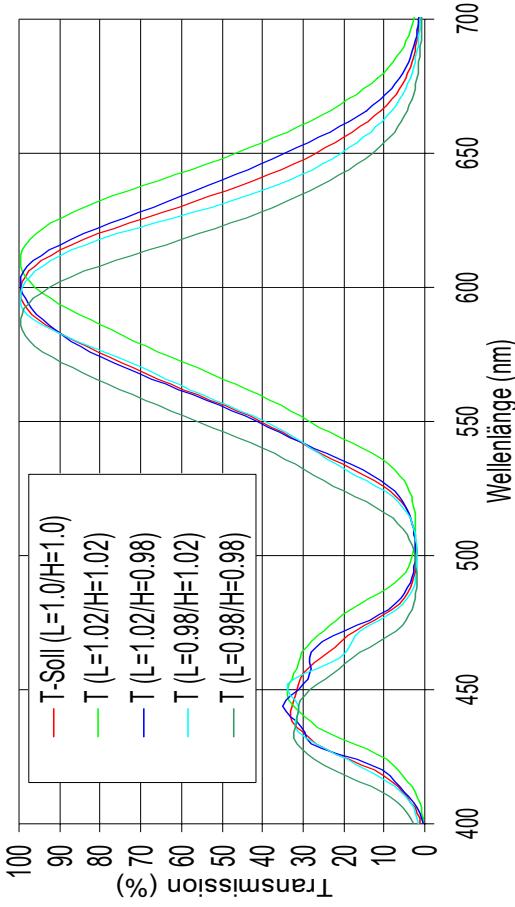
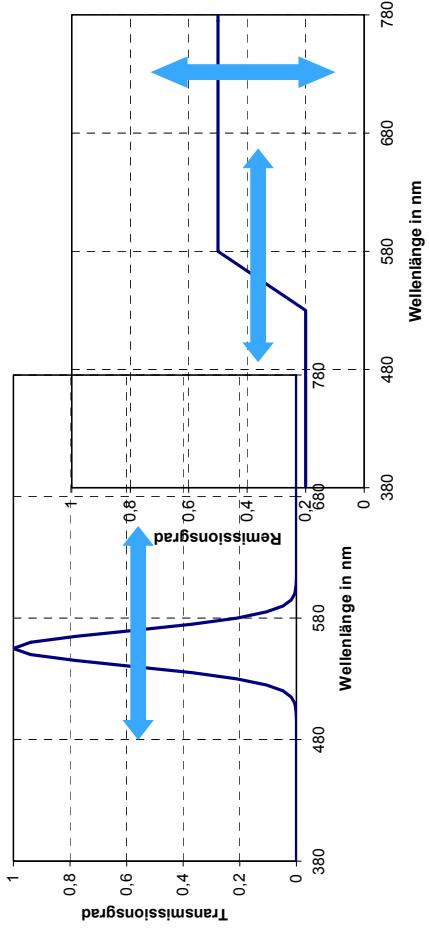
- Basis für die Bewertung (Sollfarben, Istfarben, korrigierte Farbvalenzen) sind spektral vermessene Testfarbensätze (DIN, „Color Checker von GretagMacbeth, „Vita Omega“-Zahnfarbenring).
- Als Lichtquelle wurde die Weißlicht-LED (NSPW500BS) verwendet, die auch im MAZeT-Evalboard Anwendung findet und die zur praktischen Sensorcharakterisierung diente.



mittleres $\Delta E_{CIE Lab} = 2$
maximales $\Delta E_{CIE Lab} = 4,5$

Sensor: MTCS3AT
Korrektur: keine

- Keine erkennbaren Unterschiede in den Farbbalken
- Fehlerfreie Variante wäre oft ohne Korrektur einsetzbar
- Globale lineare Korrektur liefert im fehlerfreien Fall kaum Gewinn:
- Sensor: MTCS AT
 Korrektur: globale Matrizierung
- mittleres $\Delta E_{CIE Lab} = 0,9$
 maximales $\Delta E_{CIE Lab} = 2$
- Problem und Herausforderung besteht in der Beherrschung der **Fertigungstoleranzen**.
- Variation in der Schichtdicke bis zu 2%
- Ermittlung und Bewertung der sekundären Toleranzen durch eine entsprechende **Toleranzanalyse**.



- Die Abweichungen sind über große Bereiche (Wellenlänge vrs. Filterkurvenverschiebung) klein
- In kritischen Bereichen aber dennoch erheblich (12 nm entspricht 2% Dicke Toleranz)
- Maximalabweichung bei kontrastärmer Rampe (entspricht Mehrzahl der natürlichen Remittanzen):

$$\Delta E_{CIE\text{ Lab max}} = 10 \text{ (unkorrigiert)}$$



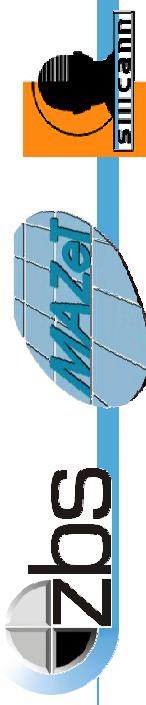
■ ■ ■ 49. IWK: Moderne Methoden der Farberkennung und Farbmessung vom MTCS3AT zum MTCSiAT

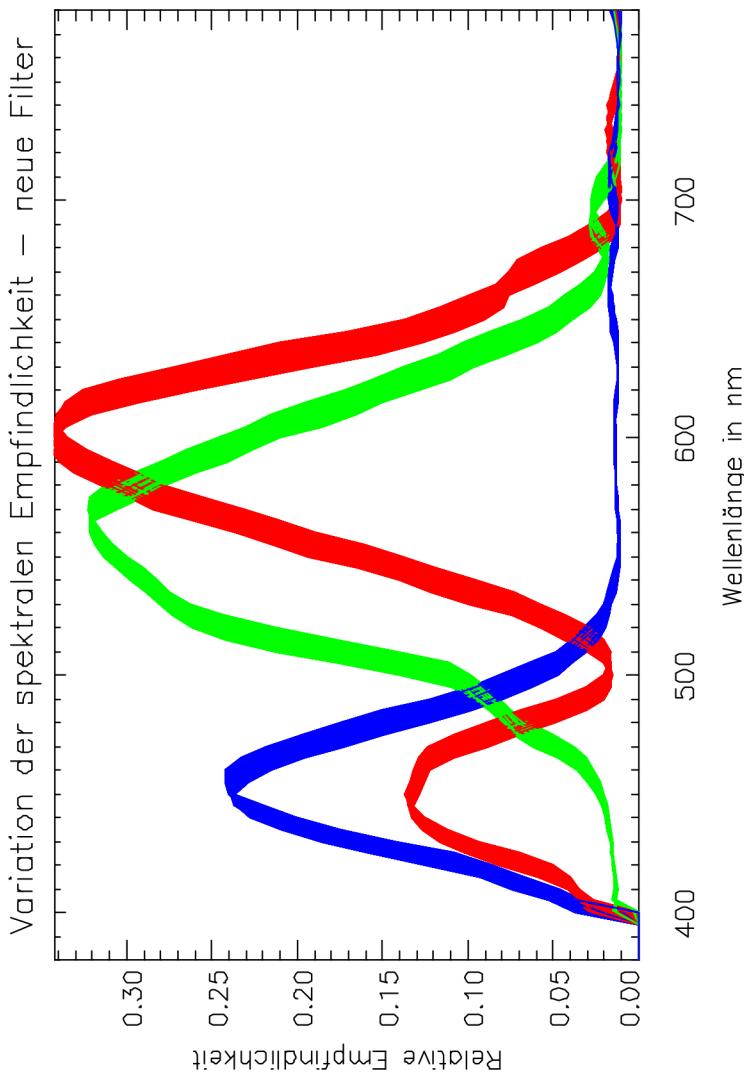
- ▶ Stärker als Feinheiten in den Filterkurven beeinflussen die technologiebedingten Verschiebungen der Kurven (Schichtdickentoleranzen) die maximalen Fehler
- ▶ Konsequenz: Suche nach einer Technologie, die **geringere Toleranzen in den Schichtdicken** zulassen
- ▶ Ergebnis → MTCS iAT (Reduzierung von 2% auf 1% Schichtdickentoleranz)

- ▶ Die Grundaussage der Untersuchungen mit Modellremmittanzen bleiben erhalten
- ▶ Maximaler Fehler in kleinem Bereich Wellenlänge bei maximaler Verschiebung um nun 6 nm:
 $\rightarrow \Delta E_{\text{CIE Lab max}} = 5$

Womit muss man bei realen Farbstoffen ähnlich DIN-TF, Color Checker und Zahntfarbenring rechnen?

- ▶ Monte-Carlo-Simulation (1000 Proben)
- ▶ Maximale Schichtdickenvariation $\pm 1\%$
- ▶ Unabhängige, gleichzeitige Variation aller drei Transmissionskurven für X, Y und Z und farbmetrische Auswertung:
$$\tau^*(\lambda) = \tau\left(\frac{\lambda}{1+\delta}\right), \quad \delta \in [-0.01; 0.01], \text{ gleichverteilt}$$

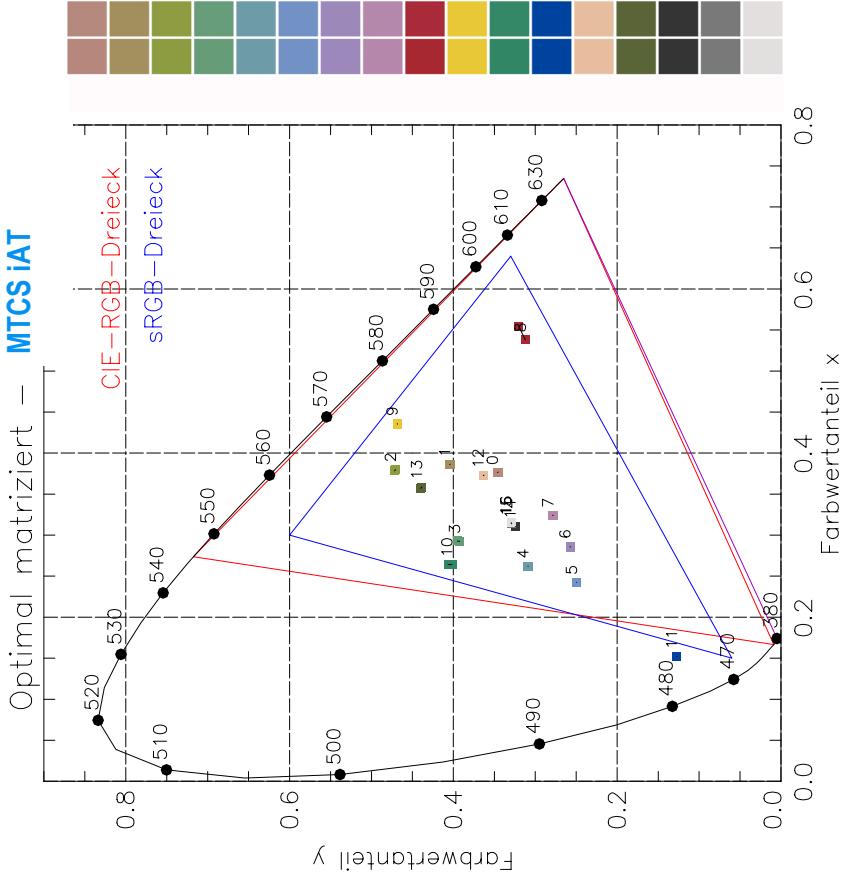




- ▶ MTCS iAT - Filter weisen stärkere Abweichungen von den XYZ-Transmissionen auf als bei MTCS AT.
- ▶ Insbesondere fällt der Offset auf!
- ▶ Die maximale Schichtdickenvariation ist mit $\pm 1\%$ aber wesentlich geringer als bei MTCS AT

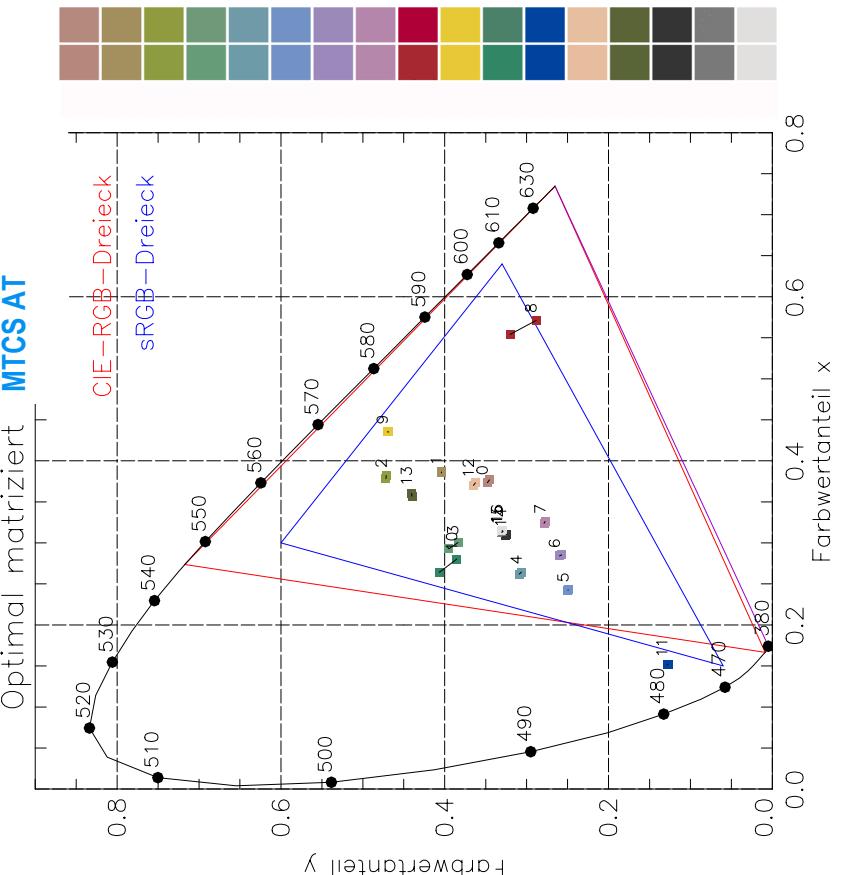
- Verglichen werden MTCS AT und MTCS iAT (ausgewählte Beispiele)
- ▶ ohne Fehler in der Schichtdicke (Skalierung und Matrizierung) → systematischer Fehler
 - ▶ bei fehlerhafter Schichtdicke (matriziert auf den Einzelsensor und die DIN-Testfarben / Abweichungen von den Istfarborten bei Sollschichtdicken) → zufälliger Fehler

Schichtdicke fehlerfrei



mittleres $\Delta E_{CIE Lab} = 0,66$
maximales $\Delta E_{CIE Lab} = 4,4$

Sensor: MTCS iAT
Korrektur: Matrizierung

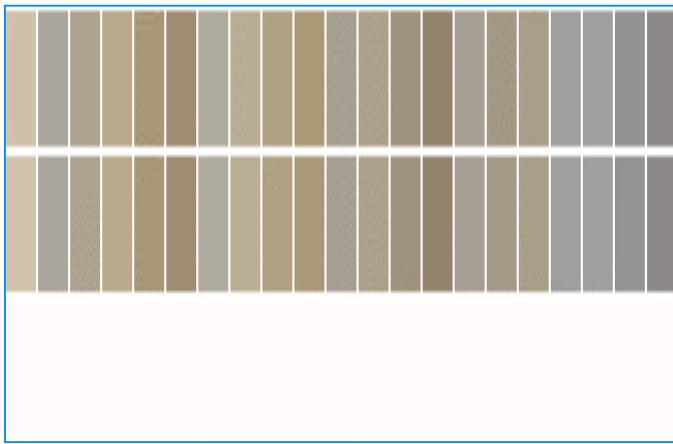


mittleres $\Delta E_{CIE Lab} = 2,7$
maximales $\Delta E_{CIE Lab} = 13,1$

Sensor: MTCS AT
Korrektur: Matrizierung

	MTCS AT	MTCS iAT
	mittl. $\Delta E_{\text{CIE Lab}}$	$\Delta E_{\text{CIE Lab max}}$
Color Checker	2,8	9,48
Zahnfarbenring	0,45	0,69

„Color Checker
von GretagMacbeth

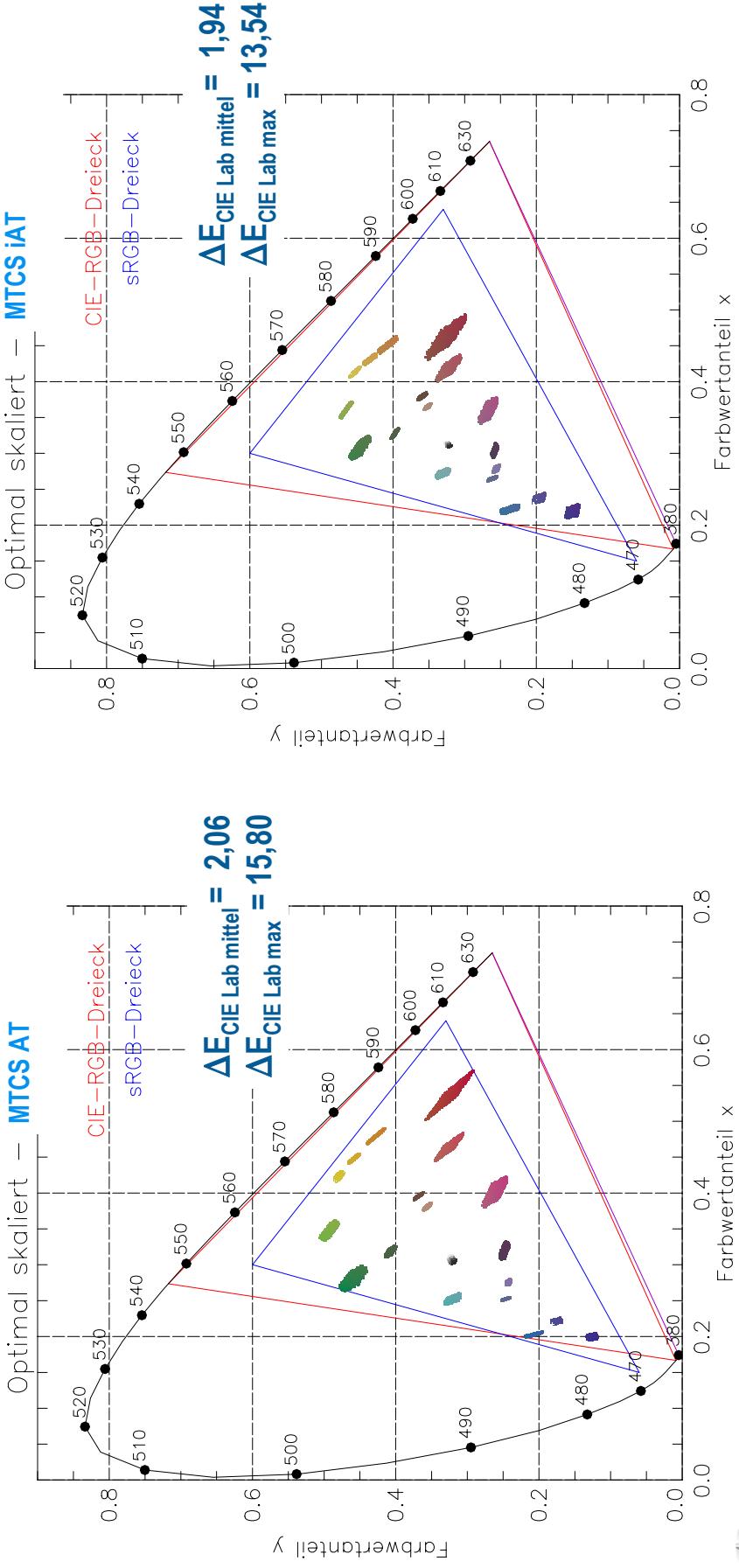


„Vita Omega“
Zahnfarbenring

■ ■ ■ 49. IWK: Moderne Methoden der Farberkennung und Farbmessung

Fehlerhafte Schichtdicken → Beispiel: „Color Checker“ von GretagMacbeth

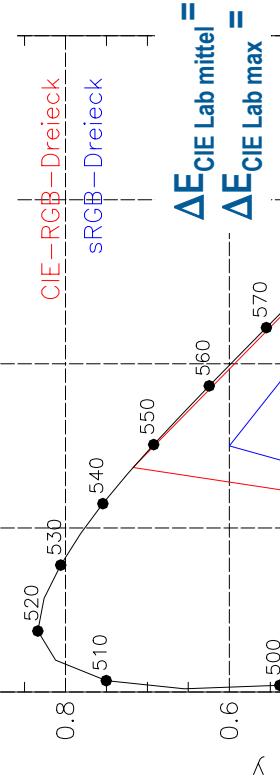
- ▶ Toleranzanalyse für fehlerhafte Filter (Monte-Carlo-Ansatz, 1000 simulierte Fehlervarianten)
- ▶ Nur Skalierung, keine Kalibrierung → Streuungsfiguren in der Farbtafel
- ▶ Bezug sind die Istfarborte (Konzentration auf den stochastischen Anteil)



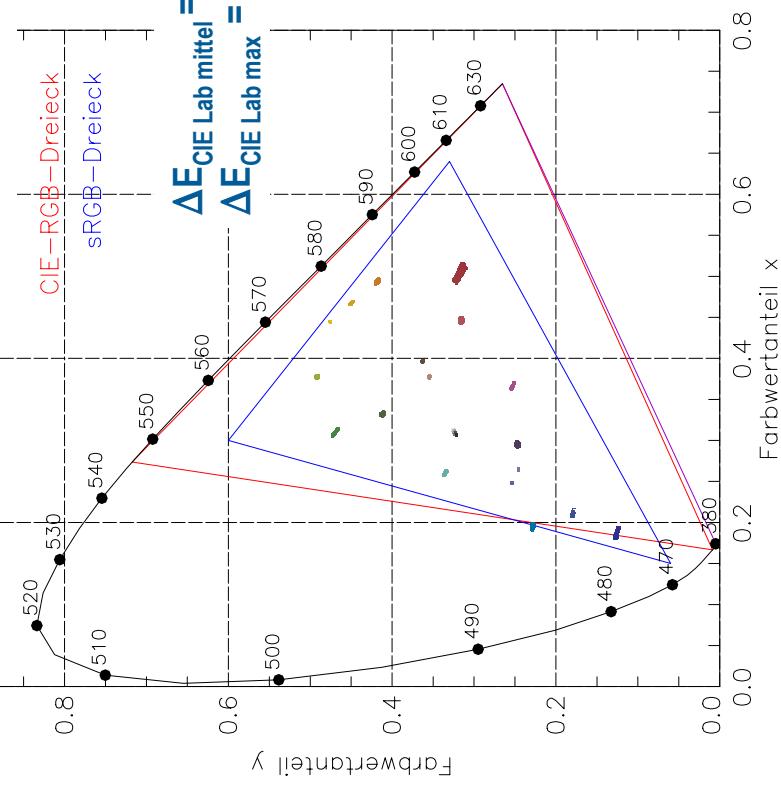
Fehlerhafte Schichtdicken → Beispiel: „Color Checker“ von GretagMacbeth

- ▶ Matrizierung auf DIN TF in jedem Einzelfall → Streuungsfiguren in der Farbtafel
- ▶ Nur stochastischer Anteil !

Optimal matriziert – MTCS AT

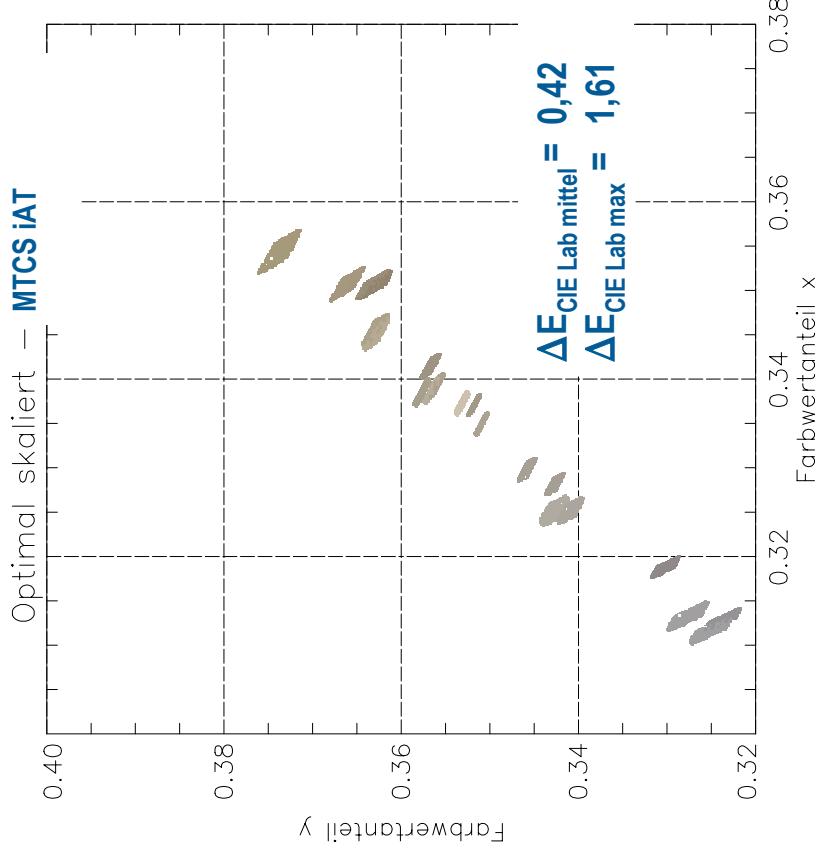
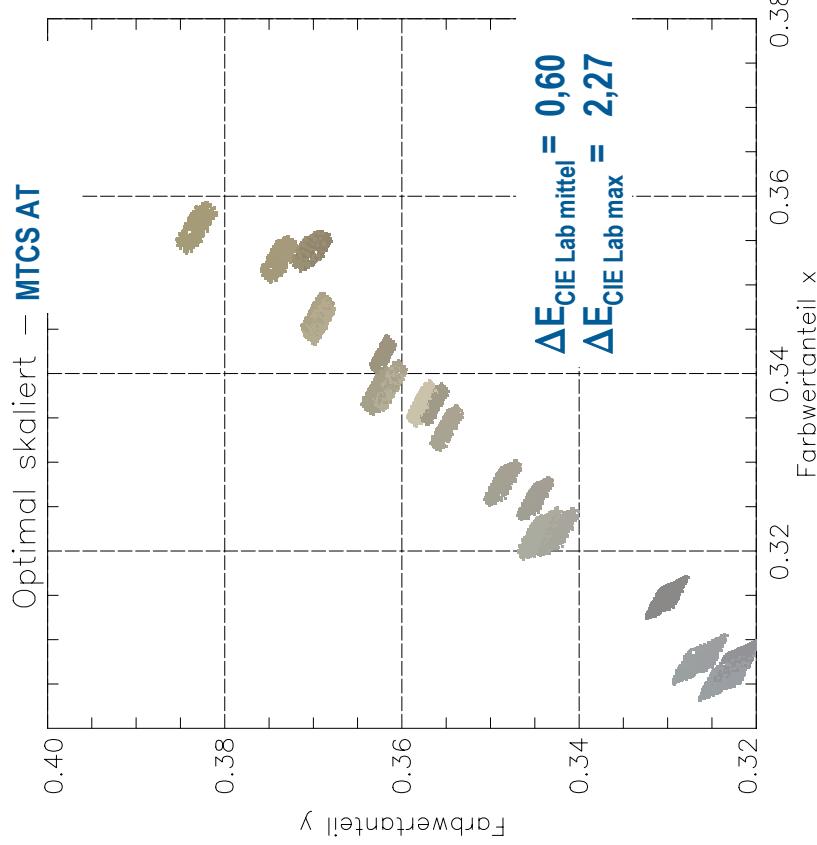


Optimal matriziert – MTCS iAT



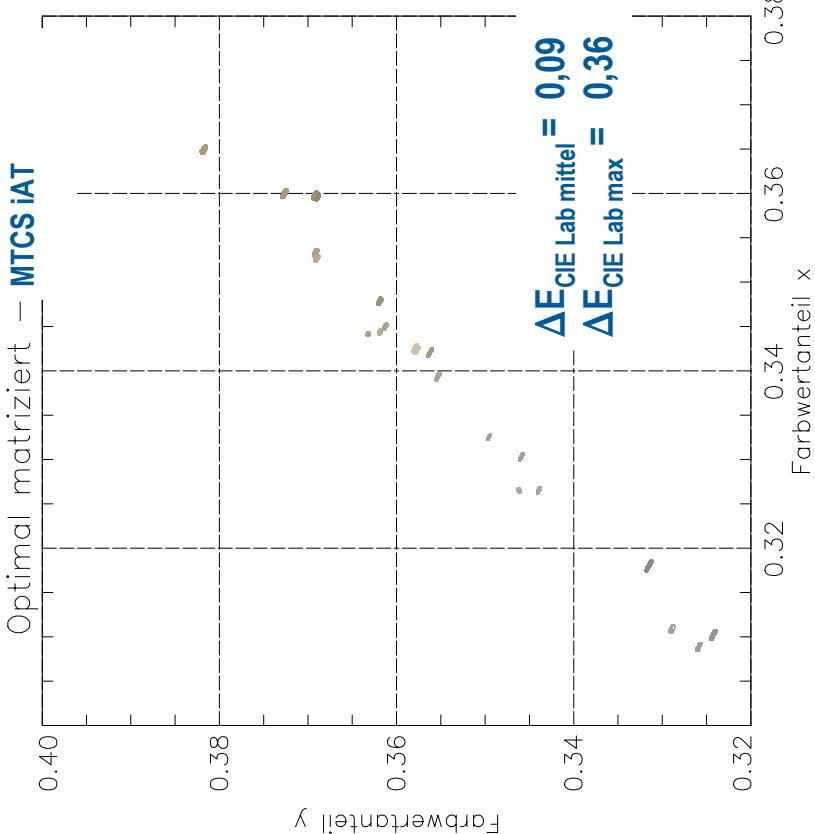
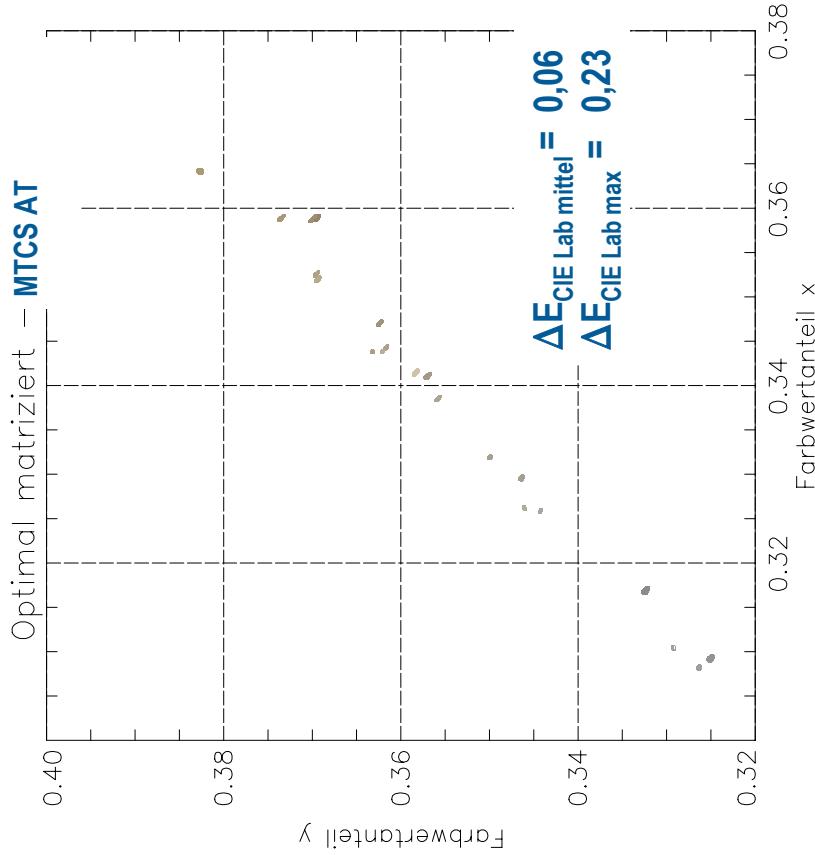
Fehlerhafte Schichtdicken → Beispiel: „Vita Omega“ Zahnfärberring

► Nur Skalierung, keine Kalibrierung → Streuungsfiguren in der Farbtafel (relevanter Ausschnitt)



Fehlerhafte Schichtdicken → Beispiel: „Vita Omega“ Zahnfärberring

- ▶ Matrizierung in jedem Einzelfall auf DIN Testfarben → Streuungsfiguren in der Farbtafel
- ▶ Nur stochastischer Anteil !



		MTCS AT			MTCS iAT		
		mittl. $\Delta E_{CIE\text{ Lab}}$	$\Delta E_{CIE\text{ Lab max}}$	mittl. $\Delta E_{CIE\text{ Lab}}$	$\Delta E_{CIE\text{ Lab max}}$	$\Delta E_{CIE\text{ Lab max}}$	
DIN-TF	syst. Fehler	2,67	13,01	0,66		4,42	
	zuf. Fehler	0,46 (0,92)	4,04 (8,08)	0,46		6,93	
	worst case	3,13 (3,59)	17,05 (21,09)	1,1		11,35	
Color Checker	syst. Fehler	2,8	9,48	0,53		2,27	
	zuf. Fehler	0,46 (0,92)	3,31 (6,62)	0,51		4,16	
	worst case	3,26 (3,72)	12,79 (16,1)	1,04		6,43	
Zahnfarbenring	syst. Fehler	0,45	0,69	0,09		0,13	
	zuf. Fehler	0,06 (0,12)	0,23 (0,46)	0,09		0,36	
	worst case	0,51 (0,57)	0,92 (1,15)	0,18		0,49	

Fazit: → wesentliche Fortschritte sind erreicht, MTCS iAT ist Spitzenprodukt
 → weitere Verbesserungen im Filterdesign sind im begrenzten Umfang möglich
 → Perspektiven sind im mehrkanaligen Bereich zu sehen

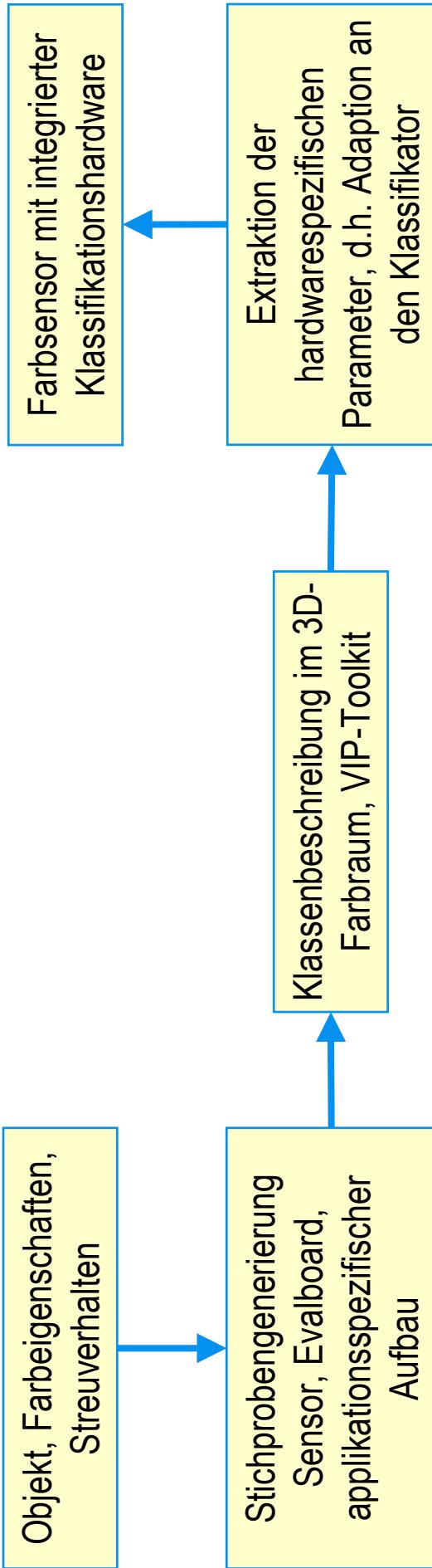
Teil 2:

**Farberkennung (Klassifikation) durch
integriertes Sensor-Klassifikator-Konzept**

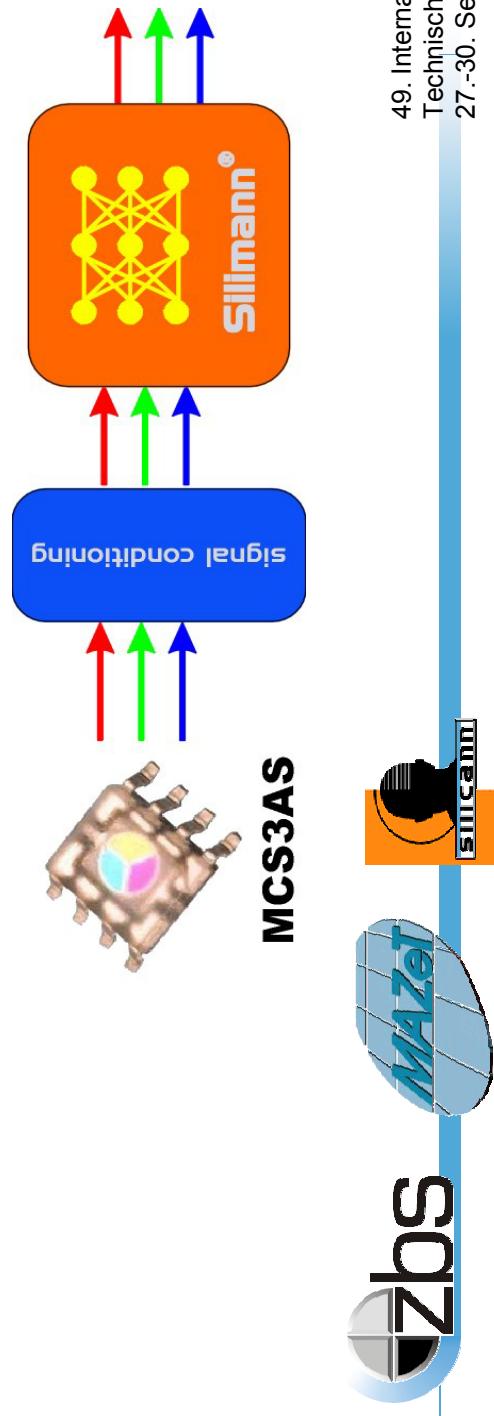
und

Demonstrator

Aufbereitung des Erkennungsproblems



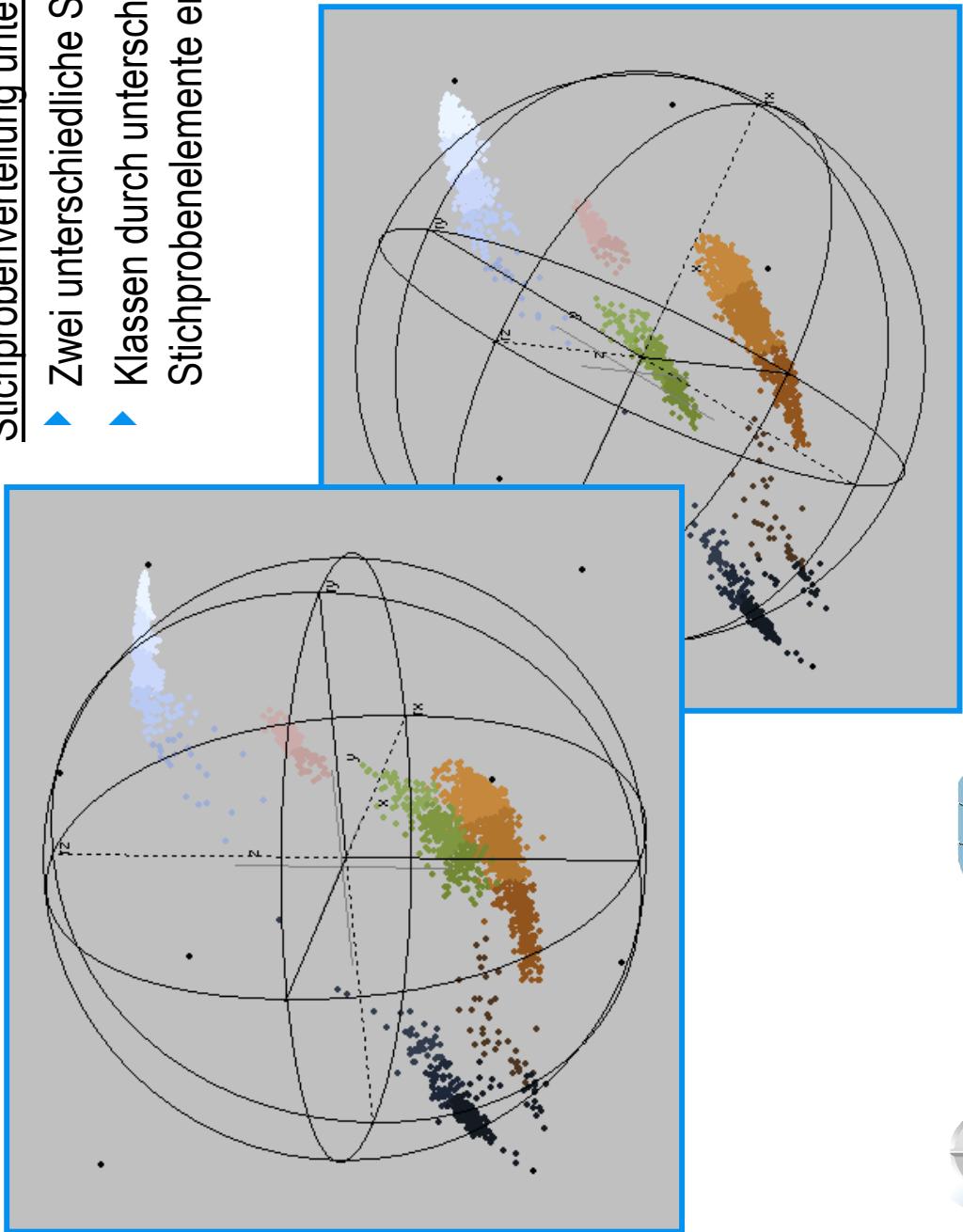
Kannphase am Beispiel Sillmann



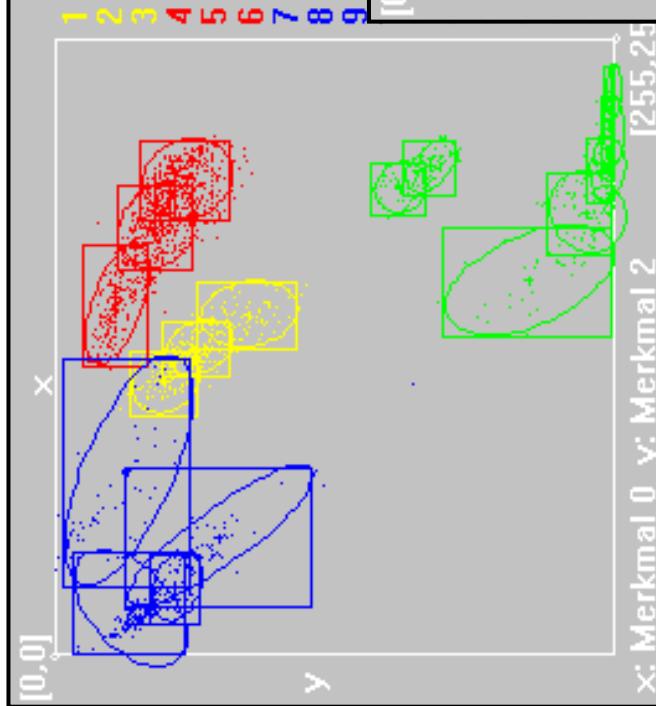
Stichprobenverteilung unterschiedlicher Klassen im Farbraum

- ▶ Zwei unterschiedliche Sichten in den 3D-Raum
- ▶ Klassen durch unterschiedliche Grundfärbung der Stichprobenelemente erkennbar
- ▶ Partitionen werden indirekt sichtbar durch Einfärbung mit Valenz des jeweiligen Zentrums

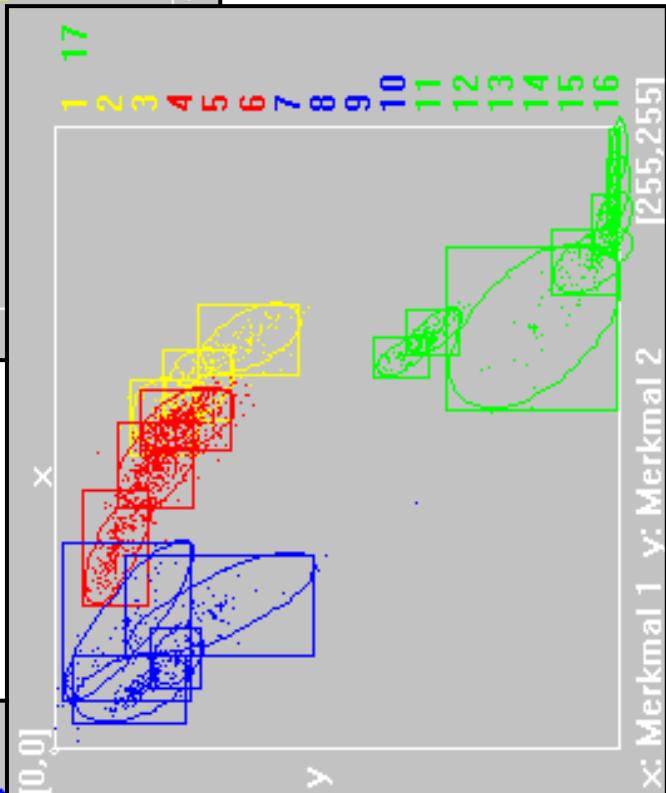
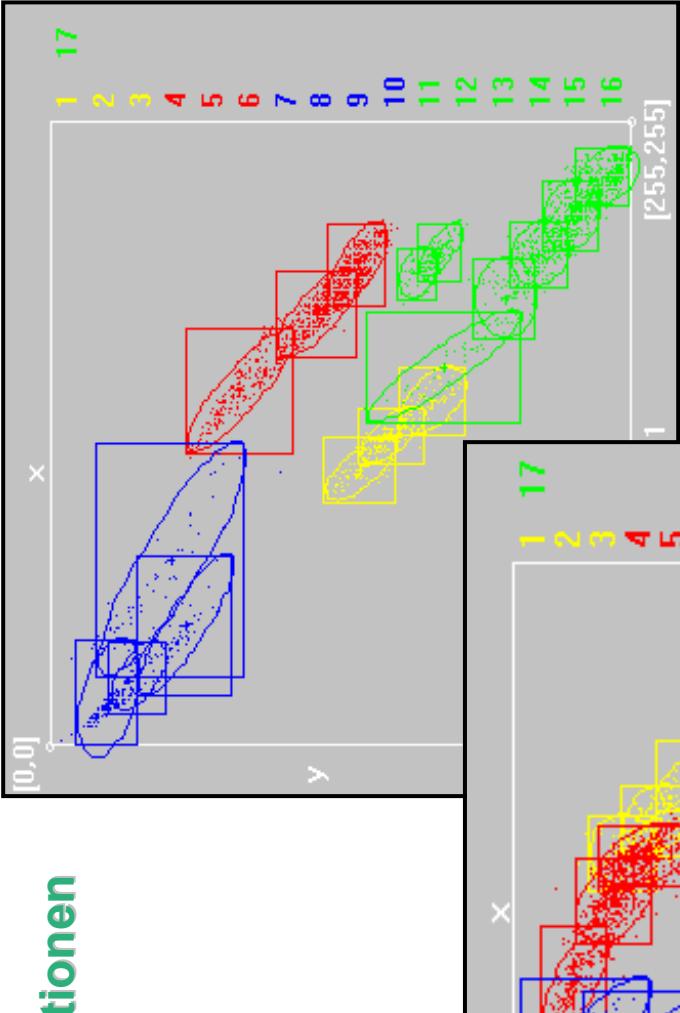
Partitionen nach dem k-Mean-Austauschverfahren:



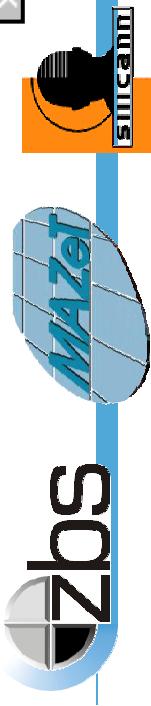
Klassenbeschreibung und Clusterpartitionen



x : Merkmal 0 y : Merkmal 2 [255, 25]



Partitionen nach dem k-Mean-Austauschverfahren
► 2D-Randdichten



Zur Klassenbeschreibung sind Cluster- und Klassifikationsansätze nutzbar → in VIP – Toolkit verfügbar
(perspektivisch als Softwareoption zum Evalboard oder spezieller Trainings- / Lernstation):

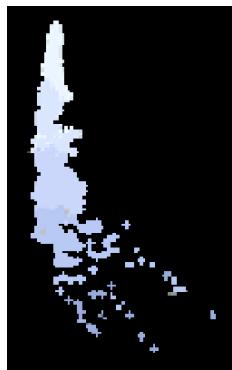
- ▶ Partitionierender Clusteralgorithmus
- ▶ Maximum-Likelihood-Ansatz
- ▶ Mischverteilungsansatz
- ▶ KNN (z.B. Backpropagation)
- ▶ Polynomansatz
- ▶ Hyperebenenansatz
- ▶ Hyperquaderansatz
- ▶ 1D- / 2D-LUT
- ▶ Interaktives, manuelles Clustern

Nächster Schritt: Abbildung der extrahierten Clusterbeschreibung auf die integrierbare Klassifikationshardware

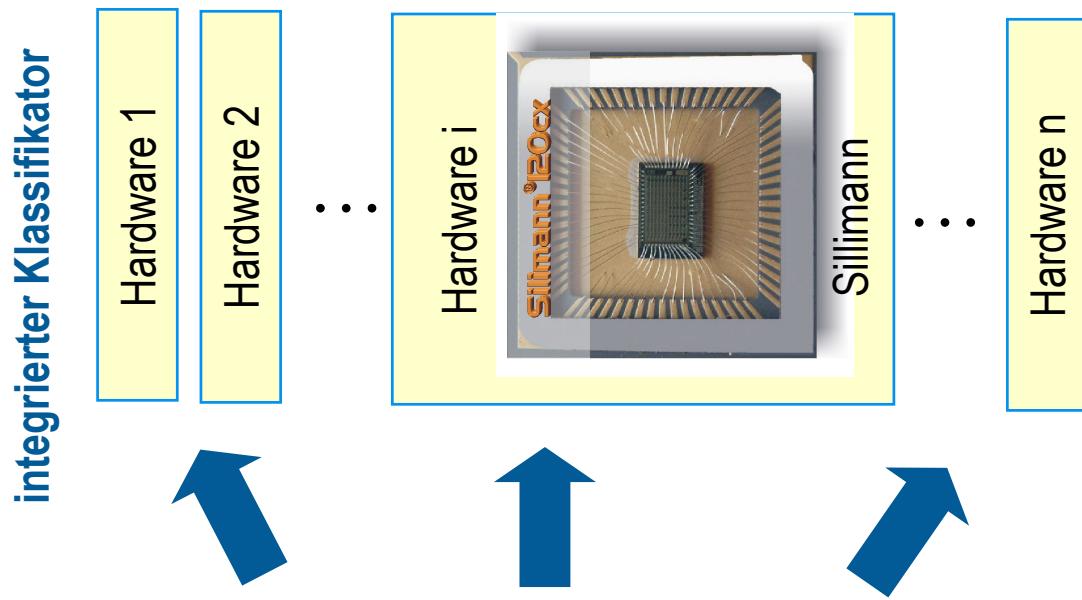
integrierter Klassifikator

Abbildung der Klassenbeschreibung auf die Hardware (Parametrierung)

Beispiel-Klasse
(siehe vorn)

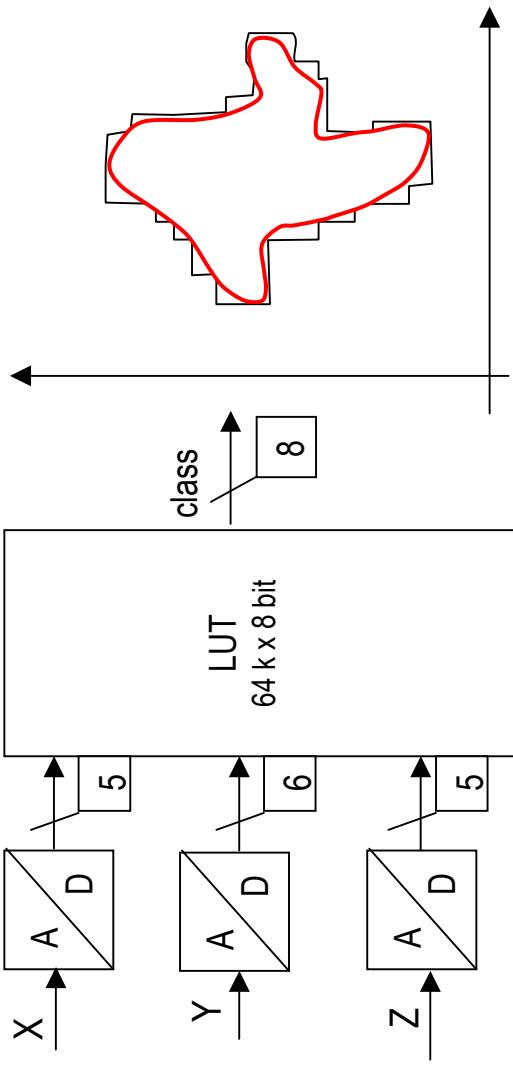


- ▶ Direkt bei identischem Algorithmus
- ▶ Ableiten von Trennfunktionen des Klassifikators aus der mathematischen Beschreibung der Cluster
- ▶ Konstruktion von virtuellen Gegenklassen zur guten Ausformung der Trennfunktionen nach bekannten Lernalgorithmen für die Hardware
-

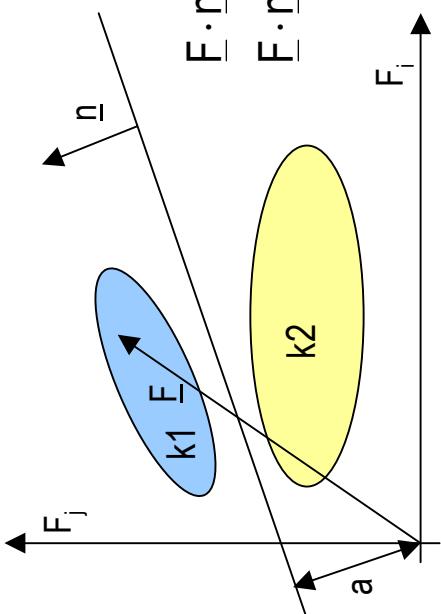


Beispiel: Abbildung auf Zielhardware LUT:

- Ausgangspunkt für Cluster → 3D-Punktwolke der Stichprobe
- Clusterformung und Bildung der LUT für Kannphase → dreidimensionale morphologische CLOSING-Operation
- Downloaden der LUT auf integrierte Klassifikationshardware



Beispiel: Abbildung des Ergebnisses partitionierender Clusterung auf KNN



$$\begin{aligned} F \cdot n - a &> 0 \\ F \cdot n - a &< 0 \end{aligned} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \text{Klasse 1} \\ \text{Klasse 2} \end{aligned} \Rightarrow$$

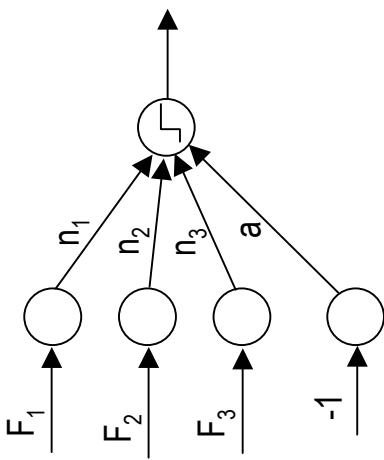
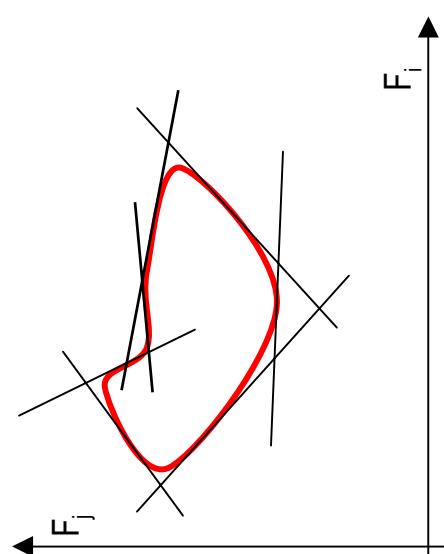
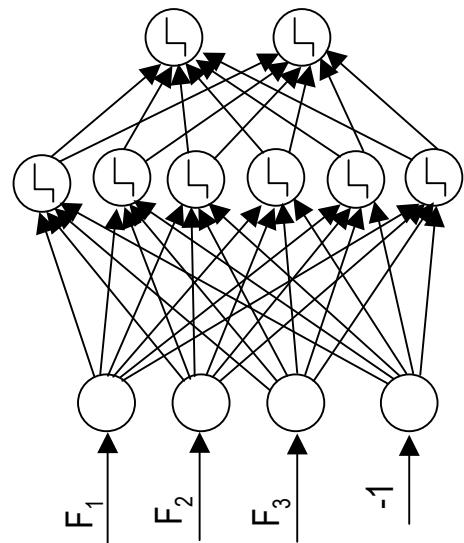


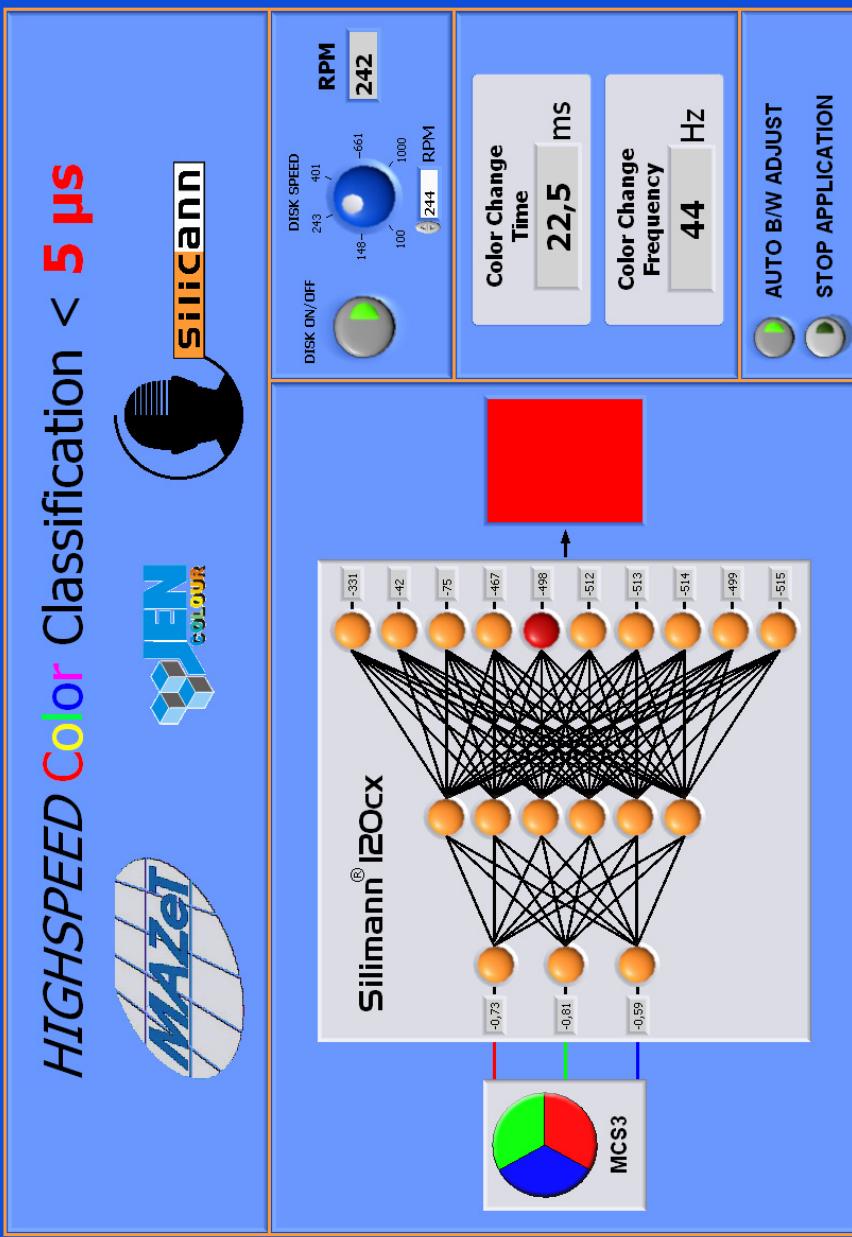
Abbildung der Klassenbeschreibung bedeutet hier Bestimmung von n (Anzahl der Hidden-Neuronen) approximierenden Hyperebenen

→ Verschiedene Wege möglich



konkret ausgeführtes Beispiel: KNN Sillmann

- Bei der Farberkennung ist der Neuro-Prozessor in Verbindung mit Single-Sensoren oder Sensor-arrays einsetzbar.
- Analoge Sensoren können direkt angekopelt werden
- Der Neuro-Prozessor ist damit interessant für diverse industrielle High-Speed-Anwendungen.



Demonstrator: Schnelles Farbsensorsystem



Farbklassifikationszeit 5 μ s

Demonstrator: Schnelles Farbsensorsystem

Features

- Klassifizierung von 10 verschiedenen Farben
- Farbwechselraten von bis zu 125 Hz (Farbwechsel alle 8 ms)
- Silimann® Signaldurchlaufzeiten von 5µs (200 kHz)
- Abtastrate für Sensorsignale: 5 kHz
- Beleuchtung der Farbscheibe mit Weißlicht-LED's
- Chopperfrequenz LED: 200Hz; Tastverhältnis hell / dunkel: 1 zu 3 (25%)
- Training von Farben in Software integriert

