

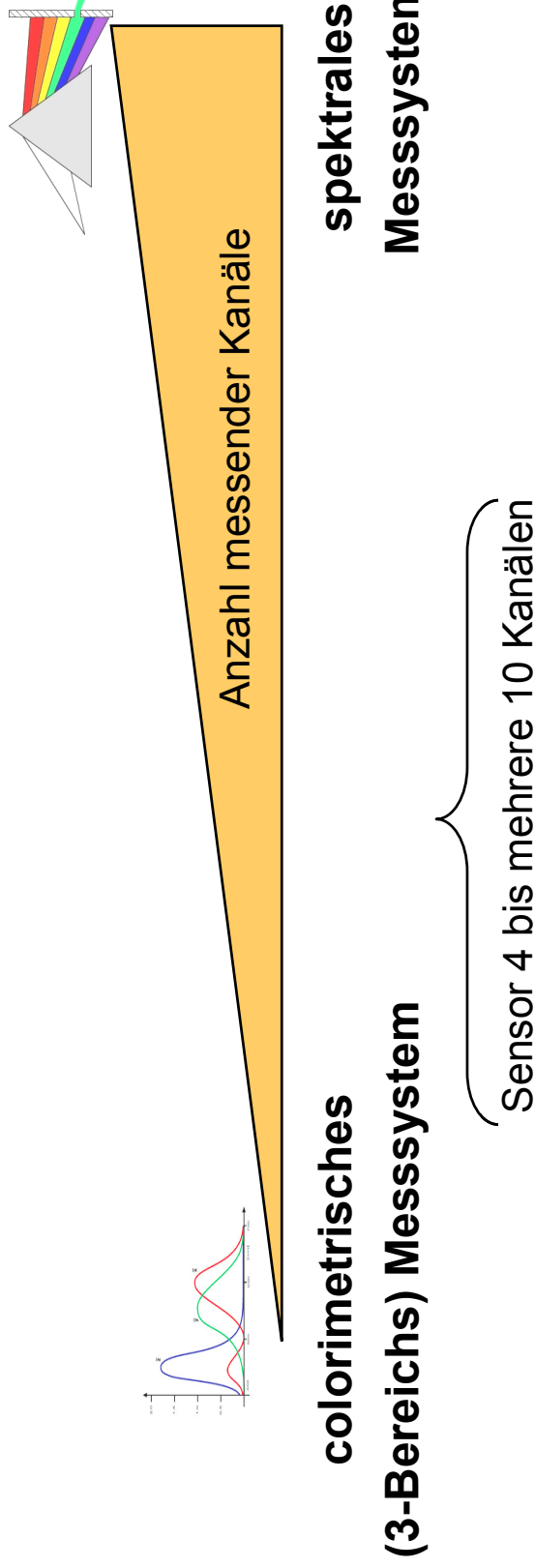
Praktischer Einsatz von Mehrbereichsmesssystemen zur spektralen Charakterisierung von selbstleuchtenden und nicht selbstleuchtenden Objekten

Rico Nestler, Rainer Jahn, Erik Sparrer, Karl-Heinz Franke

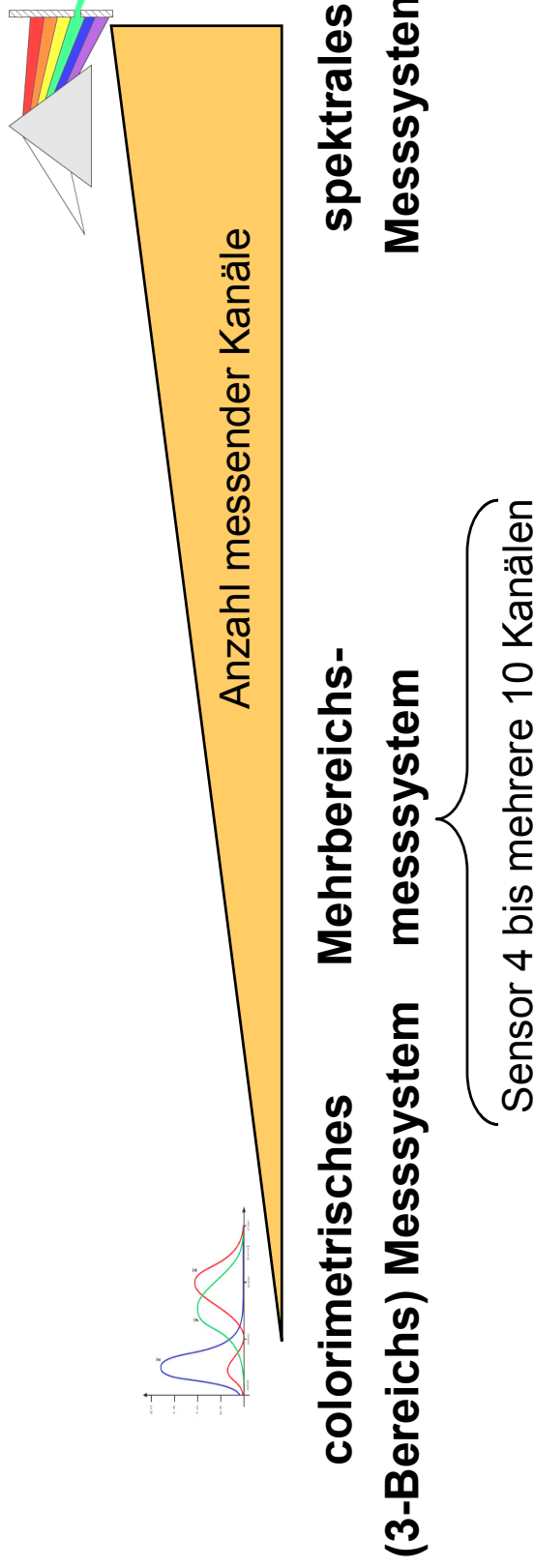
Inhaltsübersicht

1. Einordnung von Mehrbereichsmesssystemen
2. Quasi-spektraler Messmodus
3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen
4. Funktionsmuster
 - quasi-spektrales Handmessgerät
 - geregelte Lichtquelle
5. Zusammenfassung & Ausblick

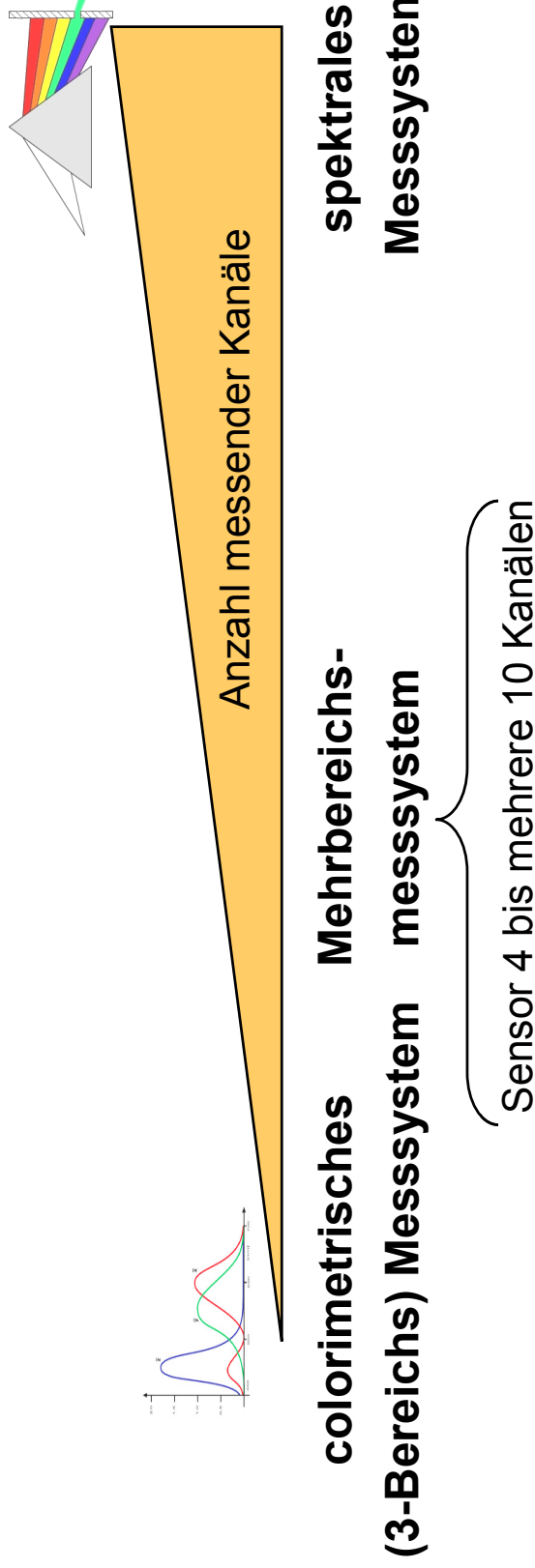
1. Einordnung von Mehrbereichsmesssystemen



1. Einordnung von Mehrbereichsmesssystemen



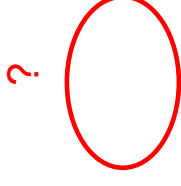
1. Einordnung von Mehrbereichsmesssystemen



Vorteile

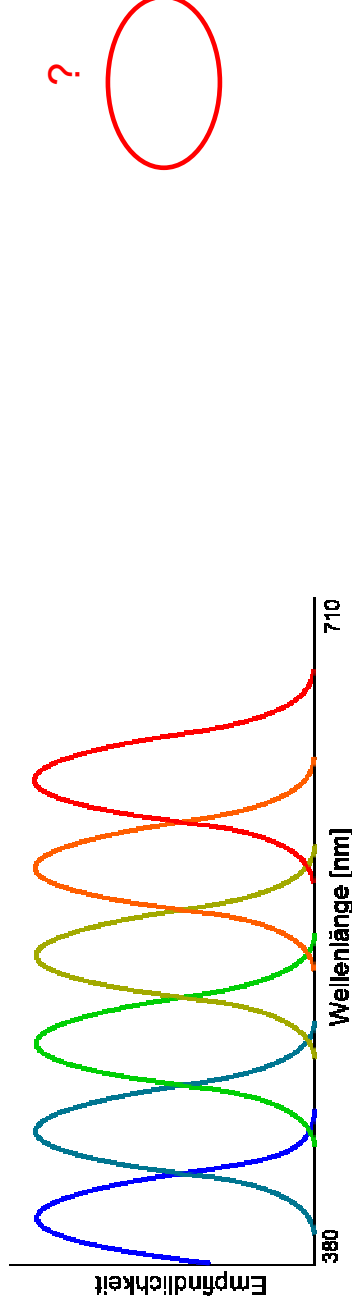
- ▶ weniger metamere Effekte, da mehr spektral selektive Information (Kanäle)
- ▶ Robustheit, Geschwindigkeit und Baugröße wie colorimetrische Systeme

2. Quasi-spektraler Messmodus



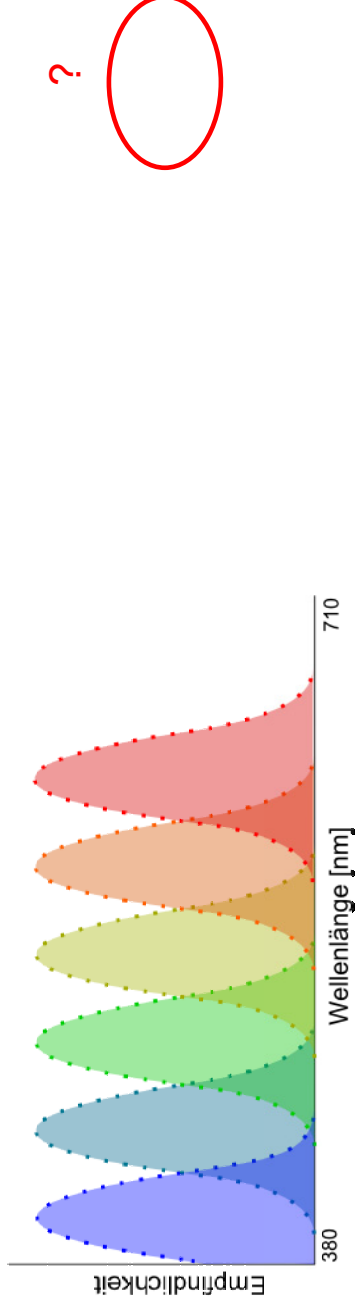
- ▶ Einführen regularisierender Randbedingungen (z.B. applikativer Targetsatz)
- ▶ Iterative Inversion durch Rückpropagieren des Rekonstruktionsfehlers
(Beitrag FWS 2006)

2. Quasi-spektraler Messmodus



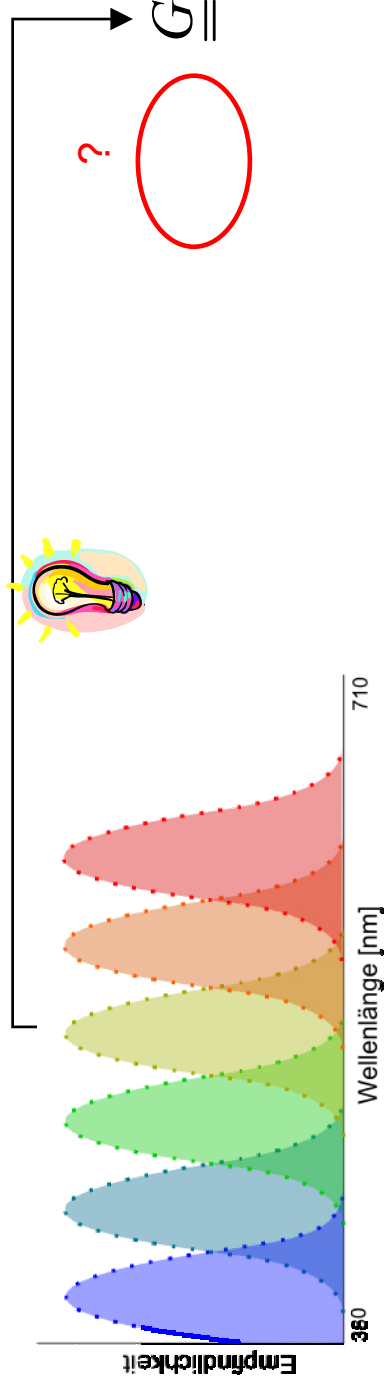
- ▶ Einführen regularisierender Randbedingungen (z.B. applikativer Targetsatz)
- ▶ Iterative Inversion durch Rückpropagieren des Rekonstruktionsfehlers (Beitrag FWS 2006)

2. Quasi-spektraler Messmodus



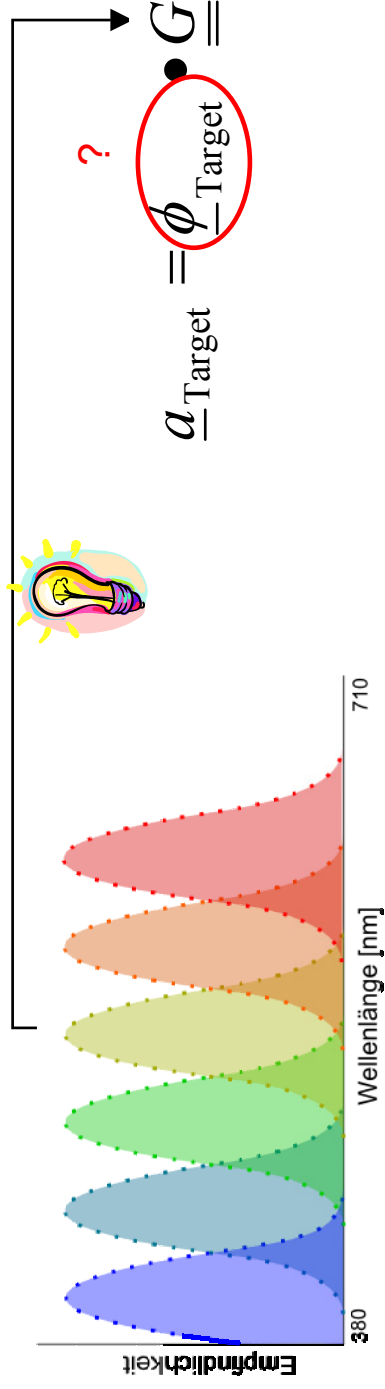
- ▶ Einführen regularisierender Randbedingungen (z.B. applikativer Targetsatz)
- ▶ Iterative Inversion durch Rückpropagieren des Rekonstruktionsfehlers (Beitrag FWS 2006)

2. Quasi-spektraler Messmodus



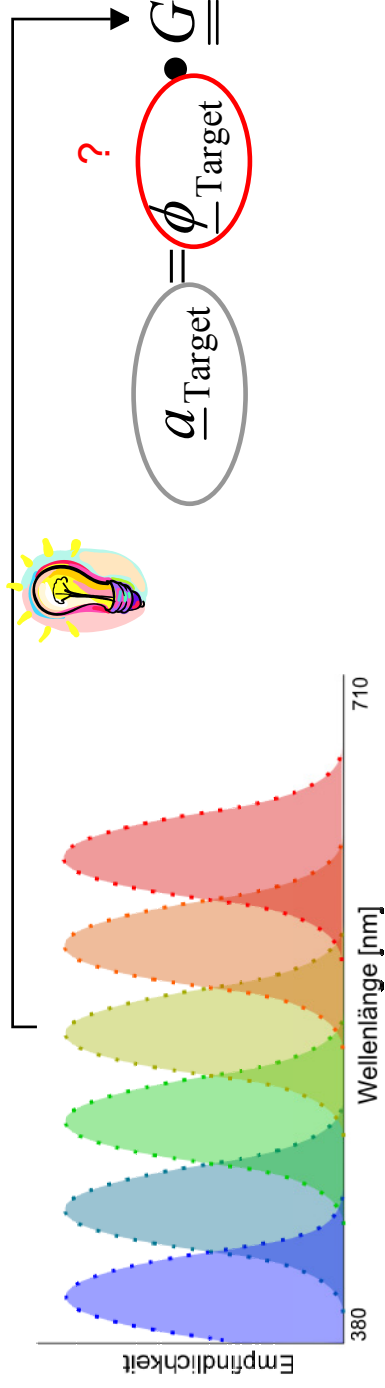
- ▶ Einführen regularisierender Randbedingungen (z.B. applikativer Targetsatz)
- ▶ Iterative Inversion durch Rückpropagieren des Rekonstruktionsfehlers (Beitrag FWS 2006)

2. Quasi-spektraler Messmodus



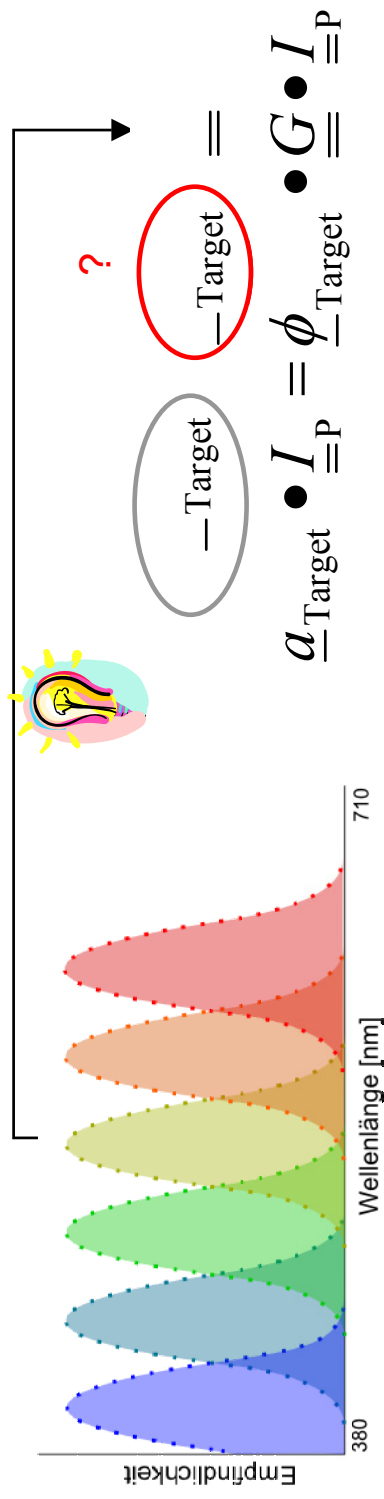
- ▶ Einführen regularisierender Randbedingungen (z.B. applikativer Targetsatz)
- ▶ Iterative Inversion durch Rückpropagieren des Rekonstruktionsfehlers (Beitrag FWS 2006)

2. Quasi-spektraler Messmodus



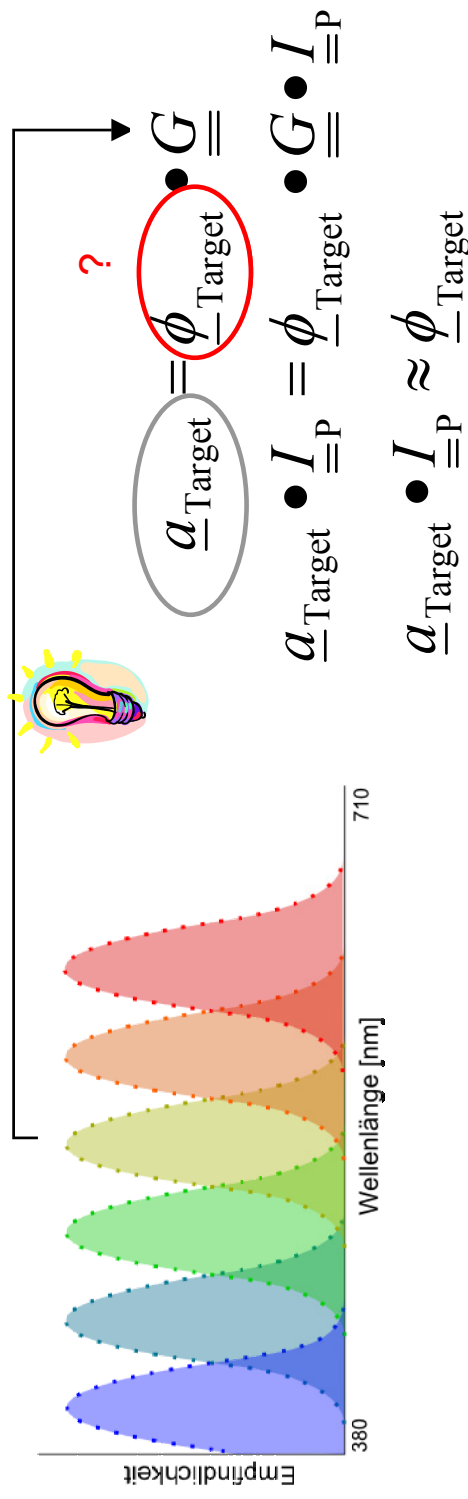
- ▶ Einführen regularisierender Randbedingungen (z.B. applikativer Targetsatz)
- ▶ Iterative Inversion durch Rückpropagieren des Rekonstruktionsfehlers (Beitrag FWS 2006)

2. Quasi-spektraler Messmodus



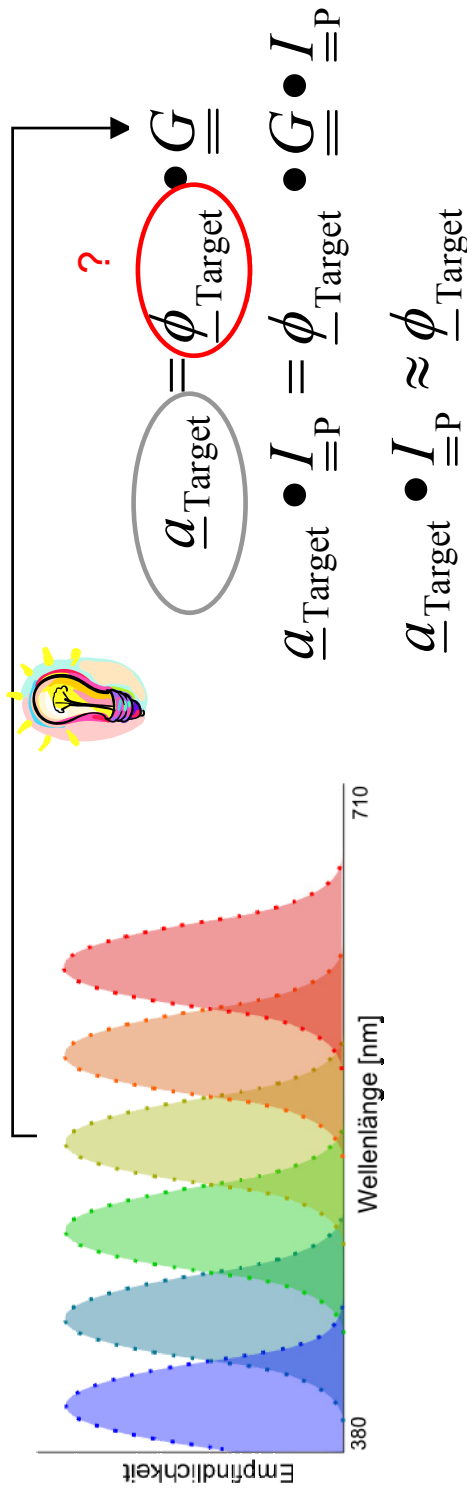
- ▶ Einführen regularisierender Randbedingungen (z.B. applikativer Targetsatz)
- ▶ Iterative Inversion durch Rückpropagieren des Rekonstruktionsfehlers (Beitrag FWS 2006)

2. Quasi-spektraler Messmodus



- ▶ Einführen regularisierender Randbedingungen (z.B. applikativer Targetsatz)
- ▶ Iterative Inversion durch Rückpropagieren des Rekonstruktionsfehlers (Beitrag FWS 2006)

2. Quasi-spektraler Messmodus



Problem

Eine direkt bestimmte Moore-Penrose-Inverse der Gerätematrix ist instabil!

- ▶ Einführen regularisierender Randbedingungen (z.B. applikativer Targetsatz)
- ▶ Iterative Inversion durch Rückpropagieren des Rekonstruktionsfehlers (Beitrag FWS 2006)

3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – primäre & sekundäre Toleranzen

► Kalibrieren laut DIN 1319:

Ermitteln des **Zusammenhangs** zwischen (toleranzbehaftetem) **Messwert** und dem zugehörigen wahren Wert der als **Einganggröße** vorliegenden Messgröße für eine Messeinrichtung **unter vorgegebenen Bedingungen**.

3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – primäre & sekundäre Toleranzen

► Kalibrieren laut DIN 1319:

Ermitteln des **Zusammenhangs** zwischen (toleranzbehaftetem) **Messwert** und dem zugehörigen wahren Wert der als **Einganggröße** vorliegenden Messgröße für eine Messeinrichtung **unter vorgegebenen Bedingungen**.

► Primäre Toleranzen

- zeitlich konstant
(Dunkelstrom, Filtertransmission, Lichtquellenspektrum, Sensorausleuchtung)
- zeitlich variabel
(Spektraldrift der Lichtquelle, Dunkelstromdrift)

3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – primäre & sekundäre Toleranzen

► Kalibrieren laut DIN 1319:

Ermitteln des **Zusammenhangs** zwischen (toleranzbehaftetem) **Messwert** und dem zugehörigen wahren Wert der als **Einganggröße** vorliegenden Messgröße für eine Messeinrichtung **unter vorgegebenen Bedingungen**.

► Primäre Toleranzen

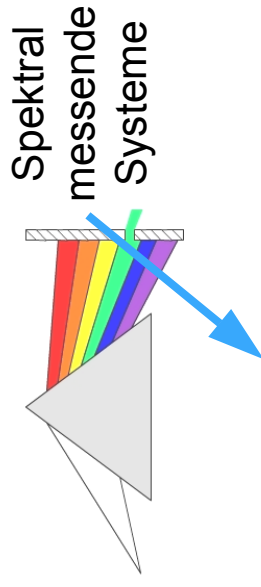
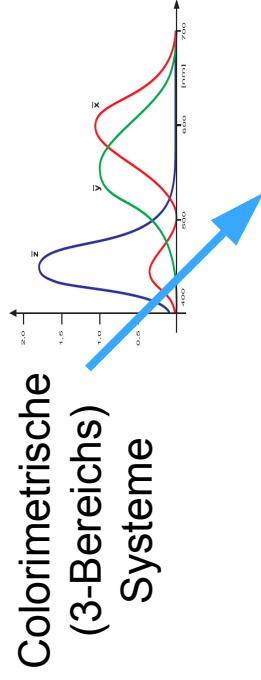
- zeitlich konstant
(Dunkelstrom, Filtertransmission, Lichtquellenspektrum, Sensorausleuchtung)
- zeitlich variabel
(Spektraldrift der Lichtquelle, Dunkelstromdrift)

► Kalibrieren bedeutet

- Kompensation der resultierenden sekundären Toleranzen
- konkreten Bezug zwischen Messsystem & Messaufgabe herstellen

3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – Kalibrierverfahren

Als mögliche Kalibriermethoden für Mehrbereichsmesssysteme sind bereits bekannte colorimetrische bis spektrale Ansätze geeignet.

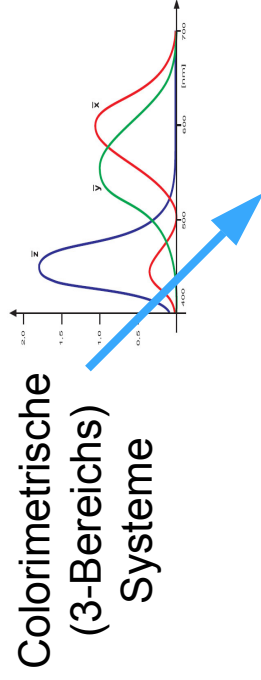


Einzeltarget-
abgleich

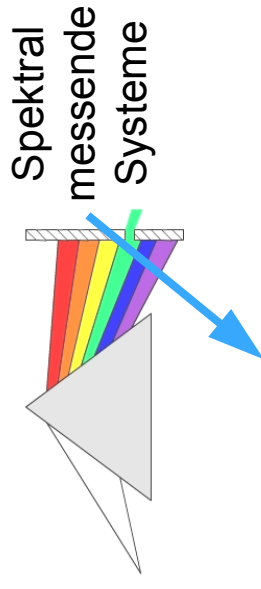
Kalibriermatrix
 aus Vermessung eines
 spektralem Einzeltargets
 + reale & ideale Messwerte

3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – Kalibrierverfahren

Als mögliche Kalibriermethoden für Mehrbereichsmesssysteme sind bereits bekannte colorimetrische bis spektrale Ansätze geeignet.



targetbezogene regressive
Kalibrierung

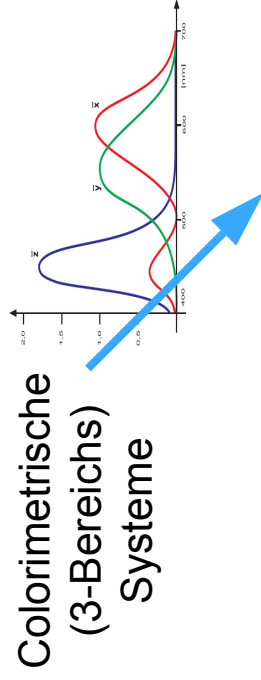


Einzeltarget-
abgleich

Kalibriermatrix
aus Vermessung eines
spektralem Einzeltargets
+ reale & ideale Messwerte

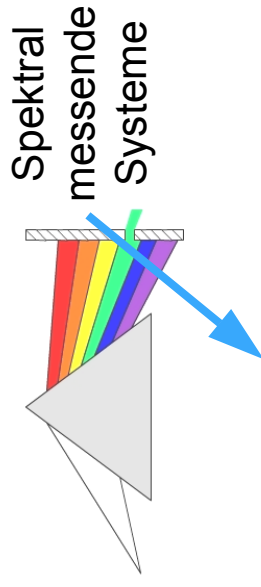
3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – Kalibrierverfahren

Als mögliche Kalibriermethoden für Mehrbereichsmesssysteme sind bereits bekannte colorimetrische bis spektrale Ansätze geeignet.



targetbezogene regressive Kalibrierung

Kalibriermatrix
aus Vermessung eines Targetsatzes + reale & ideale Messwerte

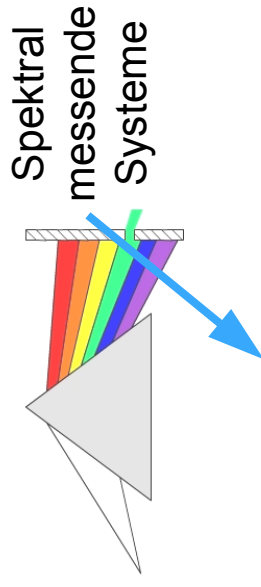
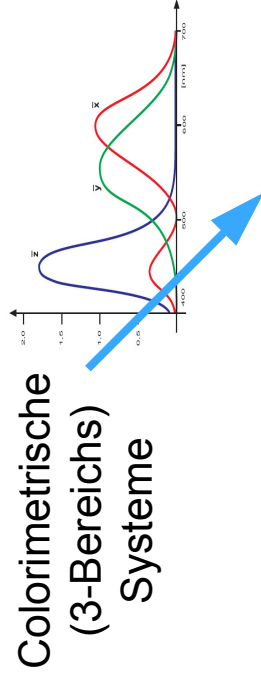


Einzeltarget-abgleich

Kalibriermatrix
aus Vermessung eines spektralem Einzeltargets + reale & ideale Messwerte

3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – Kalibrierverfahren

Als mögliche Kalibriermethoden für Mehrbereichsmesssysteme sind bereits bekannte colorimetrische bis spektrale Ansätze geeignet.



targetbezogen regressive
Kalibrierung

Kalibriermatrix
aus Vermessung eines
Targetsatzes + reale &
ideale Messwerte

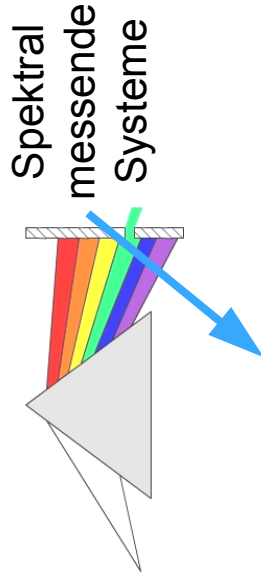
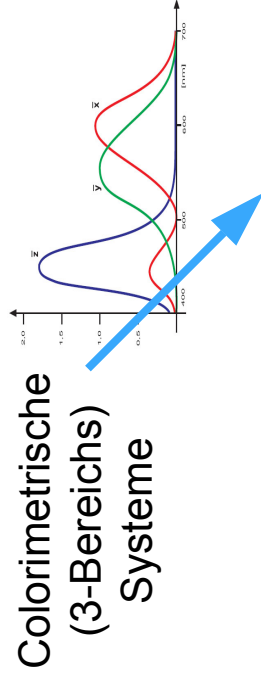
targetbezogen spektrale
Kalibrierung

Kalibriermatrix
aus Vermessung eines
spektralem Einzeltargets
+ reale & ideale Messwerte

Einzeltarget-
abgleich

3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – Kalibrierverfahren

Als mögliche Kalibriermethoden für Mehrbereichsmesssysteme sind bereits bekannte colorimetrische bis spektrale Ansätze geeignet.



targetbezogen regressive
Kalibrierung

Kalibriermatrix
aus Vermessung eines
Targetsatzes + reale &
ideale Messwerte

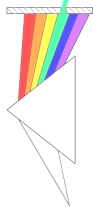
targetbezogen spektrale
Kalibrierung

Gerätematrix
aus spektralem Targetsatz
und realen Messwerten

Einzeltarget-
abgleich

Kalibriermatrix
aus Vermessung eines
spektralem Einzeltargets
+ reale & ideale Messwerte

3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – Bewertung der Kalibrierverfahren



Einzeltarget-
abgleich

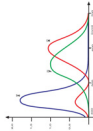
Charakterisierung spektral
unterschiedlicher Targets

- ▶ Unpraktikabel, da hoher Kalibrieraufwand & zeitlich instabile Teilsysteme (z.B. Lichtquelle)

Charakterisierung
spektral ähnlicher
Targets

- ▶ Einfaches Verfahren, mit hinreichender Güte

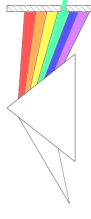
3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – Bewertung der Kalibrierverfahren



targetbezogen regressive
Kalibrierung

Charakterisierung spektral
unterschiedlicher Targets

- ▶ Unpraktikabel, da
hoher Kalibrieraufwand &
zeitlich instabile Teilsysteme
(z.B. Lichtquelle)

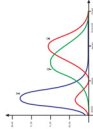


Einzeltarget-
abgleich

Charakterisierung
spektral ähnlicher
Targets

- ▶ Einfaches Verfahren,
mit hinreichender Güte

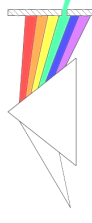
3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – Bewertung der Kalibrierverfahren



targetbezogen regressive
Kalibrierung

Charakterisierung spektral
unterschiedlicher Targets

- ▶ lineare Matrixierung
erzielt hohe Güte



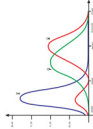
Einzeltarget-
abgleich

Charakterisierung
spektral ähnlicher
Targets

- ▶ Einfaches Verfahren,
mit hinreichender Güte

- ▶ Unpraktikabel, da
hoher Kalibrieraufwand &
zeitlich instabile Teilsysteme
(z.B. Lichtquelle)

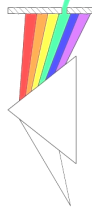
3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – Bewertung der Kalibrierverfahren



targetbezogen regressive
Kalibrierung

Charakterisierung spektral
unterschiedlicher Targets

- ▶ lineare Matrixierung
erzielt hohe Güte



Einzeltarget-
abgleich

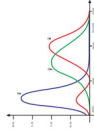
Charakterisierung
spektral ähnlicher
Targets

- ▶ Einfaches Verfahren,
mit hinreichender Güte

targetbezogen spektrale
Kalibrierung

- ▶ Unpraktikabel, da
hoher Kalibrieraufwand &
zeitlich instabile Teilsysteme
(z.B. Lichtquelle)

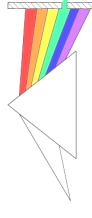
3. Kalibrierung von Mehrbereichssystemen – Bewertung der Kalibrierverfahren



targetbezogen regressive Kalibrierung

Charakterisierung spektral
unterschiedlicher Targets

- ▶ lineare Matrixierung
erzielt hohe Güte



Einzeltarget- abgleich

Charakterisierung
spektral ähnlicher
Targets

- ▶ Einfaches Verfahren,
mit hinreichender Güte

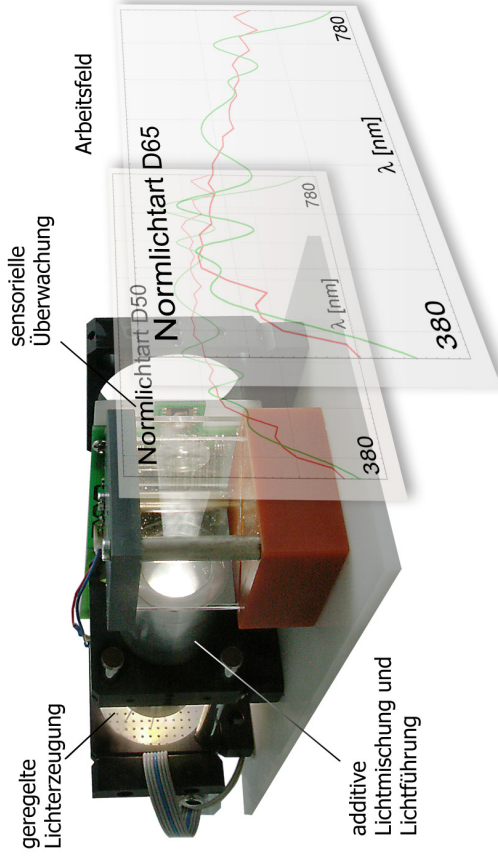
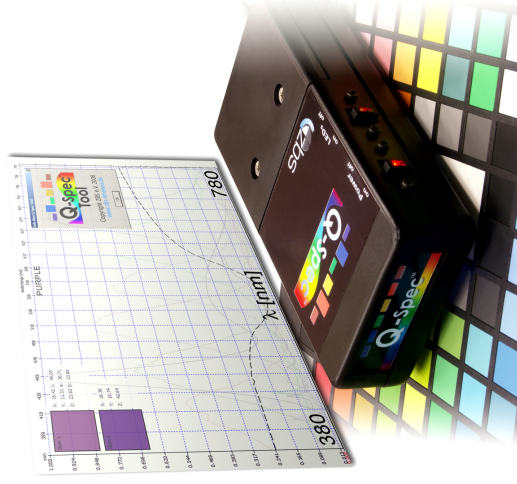
targetbezogen spektrale Kalibrierung

- ▶ Unpraktikabel, da
hoher Kalibrieraufwand &
zeitlich instabile Teilsysteme
(z.B. Lichtquelle)

Fazit zur Kalibrierung

- ▶ Auswahl der Kalibriermethode entsprechend der Applikation.
- ▶ zusätzliche spektrale Korrektur ist nicht erforderlich bzw. störend
- ▶ Targetbezogene spektrale Kalibrierung ist ungeeignet

4. Funktionsmuster

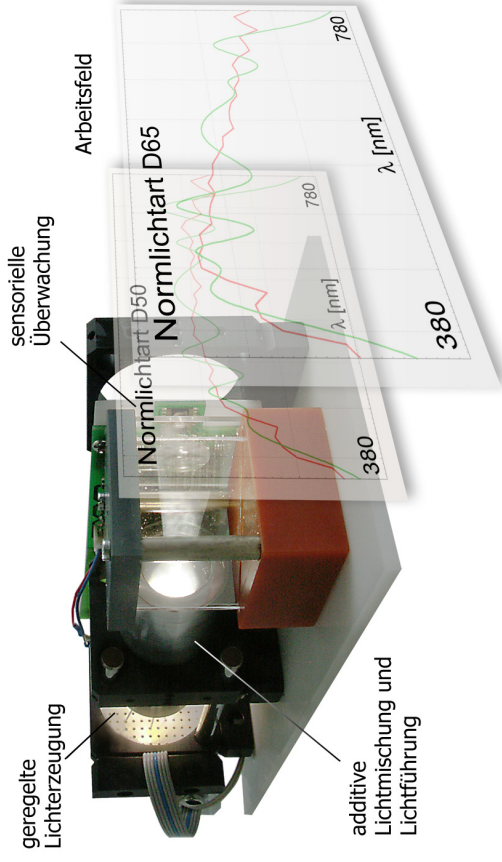
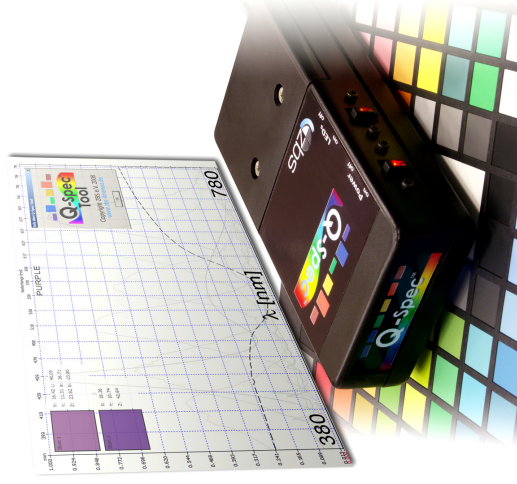


Quasi-spektraler Mehrbereichssensor

Handmessgerät kopiert von ZBS Ilmenau & MAZ für stabile Erzeugung von Auflichttarget
 Charakterisierung von 7 Kanalsensor (6 spektral selektive, gleichverteilte Kanäle + breitbandiger Basiskanal)

- ▶ Hoch integriertes Evaluation-Board
 - automatische Signalwandlung & -vorverarbeitung
 - Schnittstelle zu I²C und SPI-Bus

4. Funktionsmuster



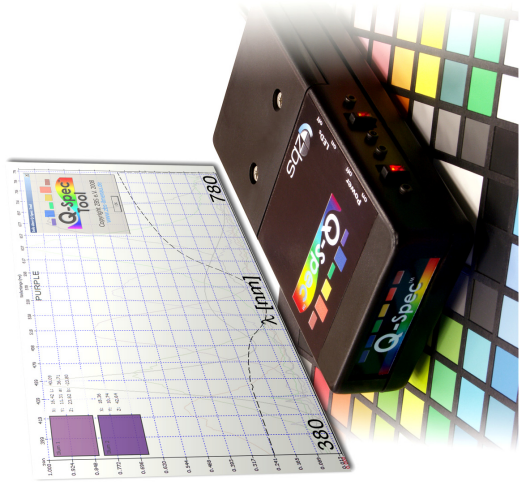
Quasi-spektraler Mehrbereichssensor

Handmessgerät kopiert von ZBS Ilmenau & MAZUR für die Erzeugung von Auflichttargets

Charakterisierung von 7 Kanalsensor (6 spektral selektive, gleichverteilte Kanäle + breitbandiger Basiskanal)

- ▶ Hoch integriertes Evaluation-Board
 - automatische Signalwandlung & -vorverarbeitung
 - Schnittstelle zu I²C und SPI-Bus

4. Funktionsmuster– quasi-spektrales Handmessgerät



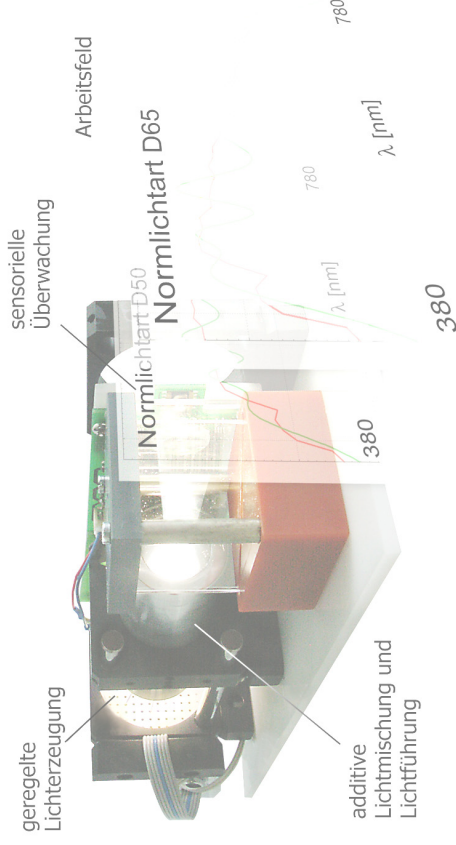
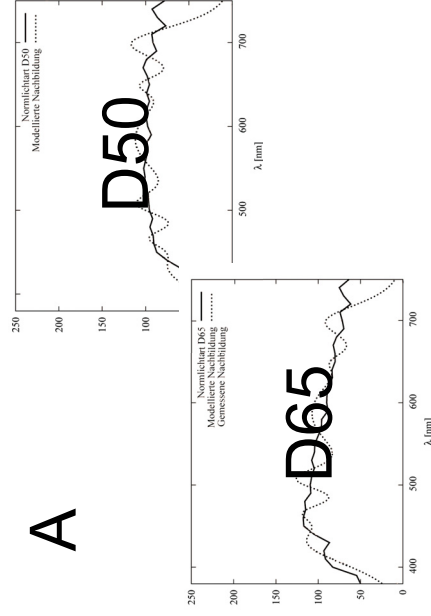
Merkmale

- Konzipiert für quasi-spektrale Vermessung von Remissionstargets
- Lichtquelle: 2 Weißlicht LEDs
- Messgeometrie: 45°/0°
- PC-Anschluss über USB
- Schnelle Messwertverarbeitung durch lineare Rekonstruktionsvorschrift

- durch angepasste Verrechnungsvorschrift beliebig skalierbar (Messwertgüte)
- absolute Aussagen über Messobjekt durch Kompensation der Lichtquelle
- weitergehende colorimetrische Analyse am PC möglich

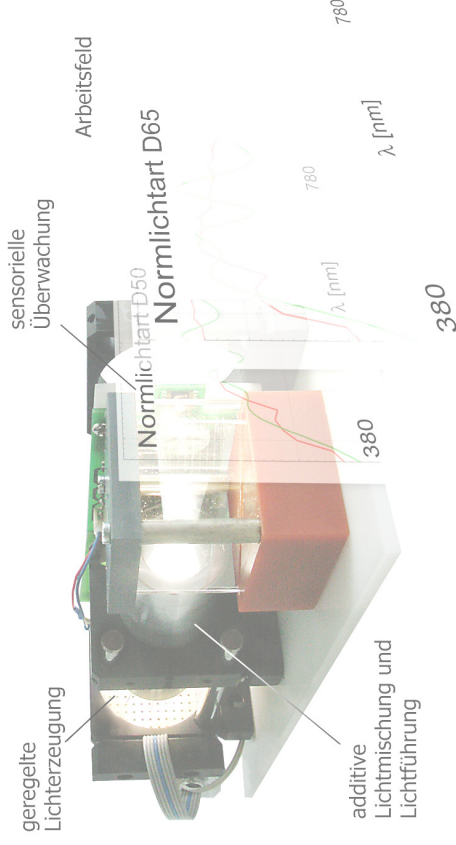
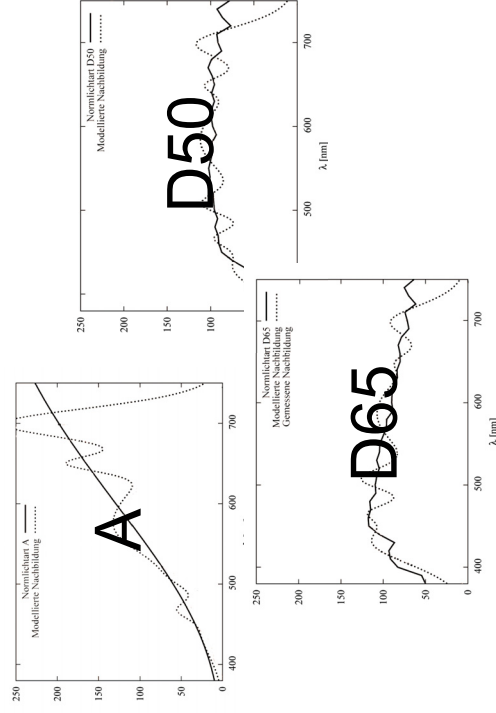
4. Funktionsmuster– geregelte LED-Lichtquelle

ZIEL: Nachbilden von 3 zur Farbinspektion verwendeten Normlichtarten



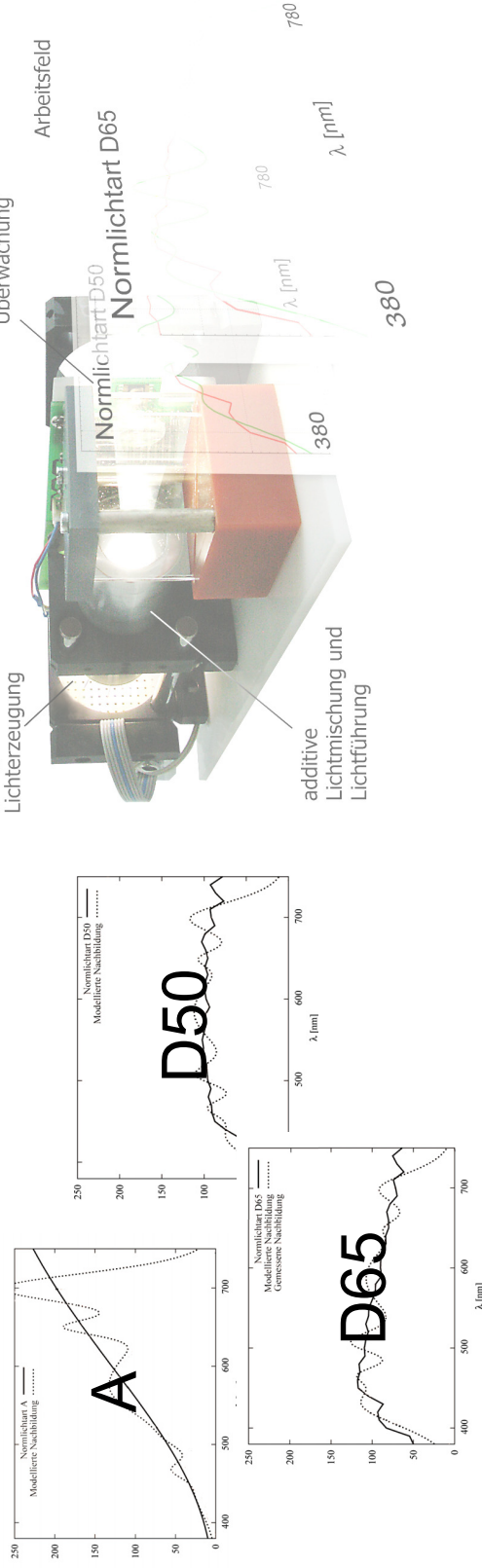
4. Funktionsmuster– geregelte LED-Lichtquelle

ZIEL: Nachbilden von 3 zur Farbinspektion verwendeten Normlichtarten



4. Funktionsmuster– geregelte LED-Lichtquelle

ZIEL: Nachbilden von 3 zur Farbinspektion verwendeten Normlichtarten



Verwendung von Standard LEDs als Primärstrahler
 (Beitrag FWS 2007)

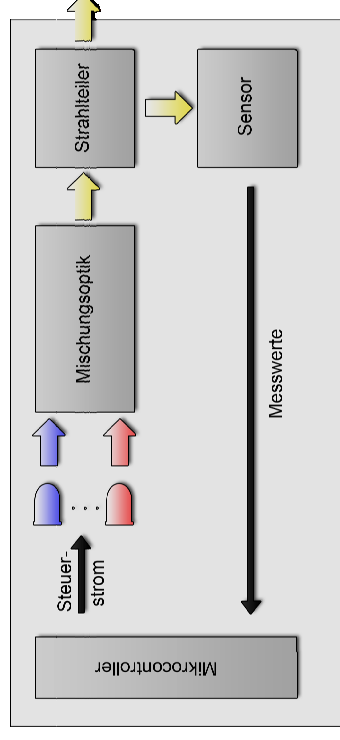
1. Intensität ist stark abhängig von der Betriebstemperatur
2. Standard LEDs strahlen mit sehr ungleichmäßiger Intensitätsverteilung

4. Funktionsmuster– geregelter LED-Lichtquelle

1. Beseitigen der temperaturbedingten Intensitätsschwankungen

Regelung

1. Quasi-spektrale Rekonstruktion des Emissionsspektrums
2. Differenzbildung im Spektralraum
3. Abweichung mit LED-Spektren gewichten
4. Abweichung dämpfen (P-Regler)
5. Stromeinprägung durch PWM-gesteuerte Konstantstromquelle



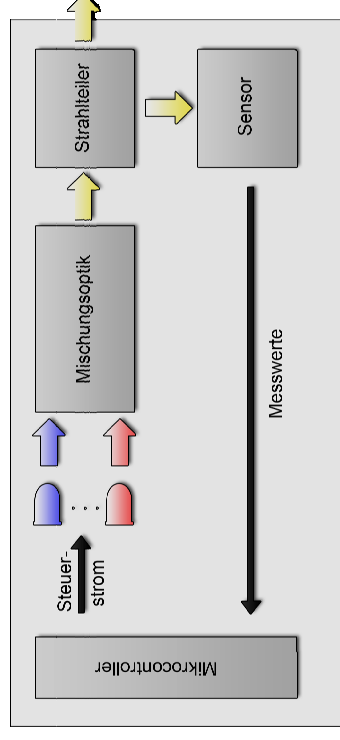
4. Funktionsmuster– geregelter LED-Lichtquelle

1. Beseitigen der temperaturbedingten Intensitätsschwankungen

Modellierung der Parameteränderungen ist komplex & ungenau
 ▶ Quasi-spektrale Rekonstruktion + spektrale Regelung

Regelung

1. Quasi-spektrale Rekonstruktion des Emissionsspektrums
2. Differenzbildung im Spektralraum
3. Abweichung mit LED-Spektren gewichten
4. Abweichung dämpfen (P-Regler)
5. Stromeinprägung durch PWM-gesteuerte Konstantstromquelle



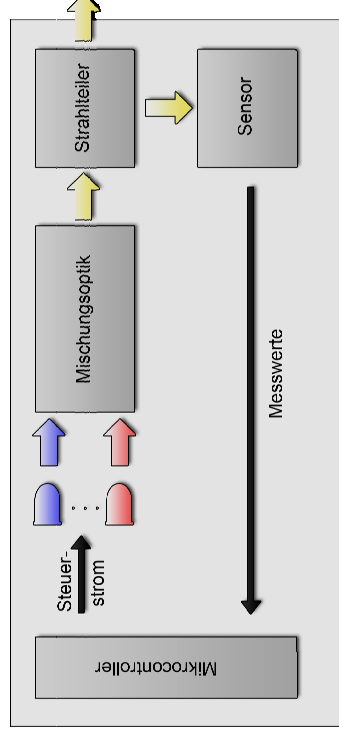
4. Funktionsmuster– geregelter LED-Lichtquelle

1. Beseitigen der temperaturbedingten Intensitätsschwankungen

Modellierung der Parameteränderungen ist komplex & ungenau
 ▶ Quasi-spektrale Rekonstruktion + spektrale Regelung

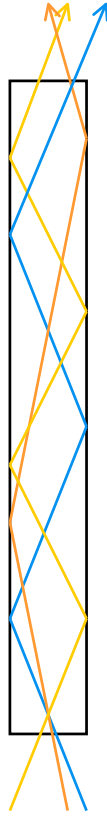
Regelung

1. Quasi-spektrale Rekonstruktion des Emissionsspektrums
2. Differenzbildung im Spektralraum
3. Abweichung mit LED-Spektren gewichten
4. Abweichung dämpfen (P-Regler)
5. Stromeinprägung durch PWM-gesteuerte Konstantstromquelle

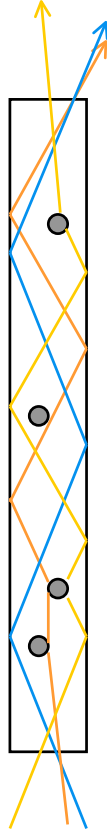


4. Funktionsmuster– geregelt LED-Lichtquelle

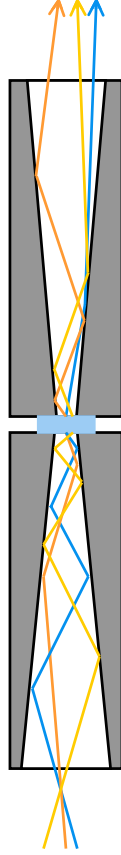
2. Lichtmischung ▶ keine stark streuenden oder abbildenden Optiken möglich



- Unzureichende Durchmischung wegen endlicher Länge des Stabes
- Einkoppelverluste



- Streukörperdichte und Brechzahlverhältnis sind kritisch
- Ausgangsseitig stark streuend – hohe Verluste

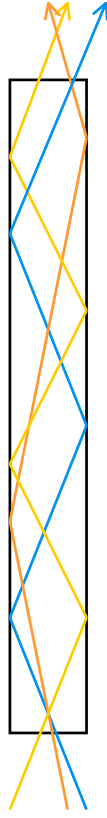


- Verlustarm
- Hinreichend homogene Lichtmischung
- Enger Abstrahlwinkel
- Kompakter Aufbau

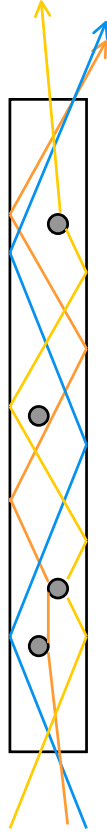
4. Funktionsmuster– geregelter LED-Lichtquelle

2. Lichtmischung ▶ keine stark streuenden oder abbildenden Optiken möglich

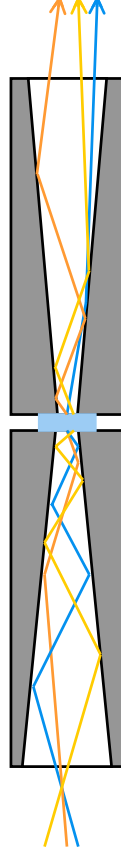
Ansatz 1: Glasstab



- Unzureichende Durchmischung wegen endlicher Länge des Stabes
- Einkoppelverluste



- Streukörperdichte und Brechzahlverhältnis sind kritisch
- Ausgangsseitig stark streuend – hohe Verluste

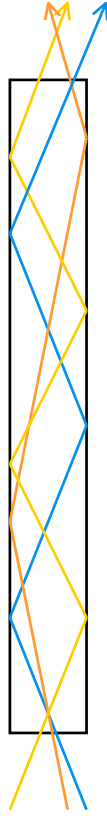


- Verlustarm
- Hinreichend homogene Lichtmischung
- Enger Abstrahlwinkel
- Kompakter Aufbau

4. Funktionsmuster– geregelter LED-Lichtquelle

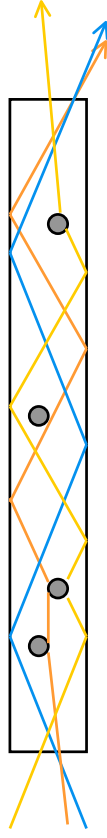
2. Lichtmischung ▶ keine stark streuenden oder abbildenden Optiken möglich

Ansatz 1: Glasstab

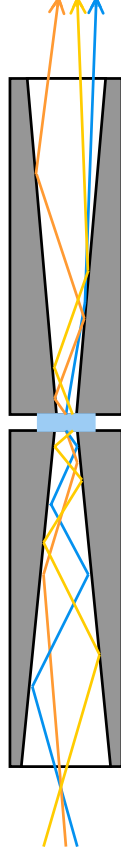


- Unzureichende Durchmischung wegen endlicher Länge des Stabes
- Einkoppelverluste

Ansatz 2: Streukörper



- Streukörperdichte und Brechzahlverhältnis sind kritisch
- Ausgangsseitig stark streuend – hohe Verluste

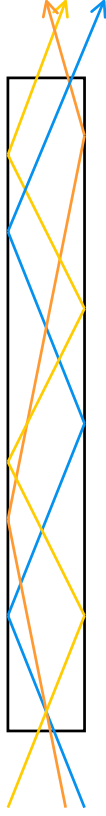


- Verlustarm
- Hinreichend homogene Lichtmischung
- Enger Abstrahlwinkel
- Kompakter Aufbau

4. Funktionsmuster– geregelter LED-Lichtquelle

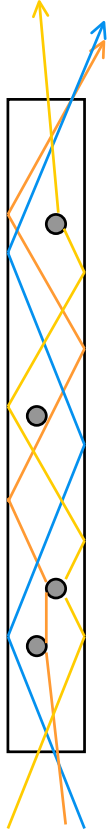
2. Lichtmischung ▶ keine stark streuenden oder abbildenden Optiken möglich

Ansatz 1: Glasstab



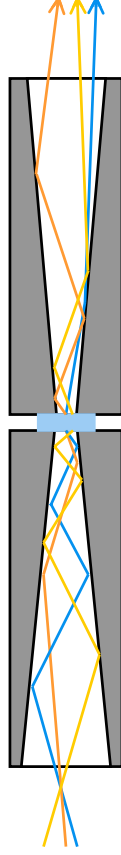
- Unzureichende Durchmischung wegen endlicher Länge des Stabes
- Einkoppelverluste

Ansatz 2: Streukörper



- Streukörperdichte und Brechzahlverhältnis sind kritisch
- Ausgangsseitig stark streuend – hohe Verluste

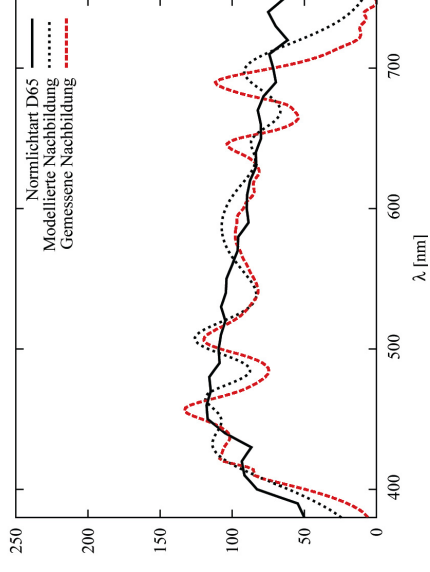
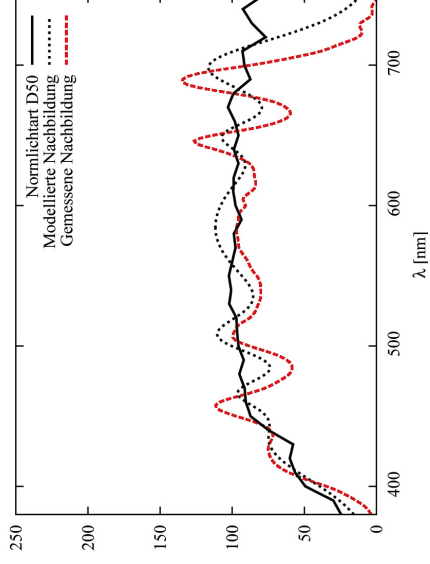
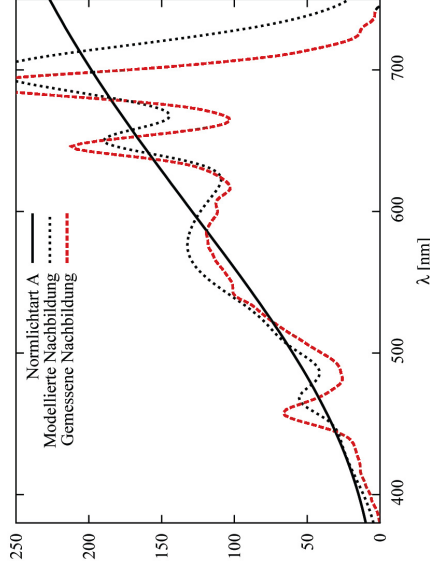
Ansatz 3: optischer Kompander



- Verlustarm
- Hinreichend homogene Lichtmischung
- Enger Abstrahlwinkel
- Kompakter Aufbau

4. Funktionsmuster– geregelter LED-Lichtquelle

Beurteilung der nachgebildeten Spektren



- ▶ Geregelter Nachbildung der Zielfunktion entspricht den Erwartungen
- ▶ Abweichungen aufgrund herstellungsbedingter Bauteilstreuung der LEDs

5. Zusammenfassung & Ausblick

Quasi-spektrales Messverfahren allgemein

- spektral-nahe messsystemunabhängige Ergebnisse
- anwendbar für Remission, Transmission & Emission
- vielseitig skalierbares Verfahren (Sensoren, Messaufgaben, Lichtquellen)

Quasi-spektrales Handmessgerät

- Hohe Ergebnisgüte
- Kein Lichtquelleneinfluss
- Echtzeitfähig, Kompakt, Robust, Preiswert
- Weitergehende Untersuchung am PC möglich (z.B. Metamerie)

Geregelte LED-Lichtquelle

- Im Rahmen der LED-Auswahl eine optimale spektrale Approximation
- LED-Anzahl ist nur durch Anzahl der Sensorkanäle begrenzt

5. Zusammenfassung & Ausblick

Quasi-spektrales Messverfahren allgemein

- spektral-nahe messsystemunabhängige Ergebnisse
- anwendbar für Remission, Transmission & Emission
- vielseitig skalierbares Verfahren (Sensoren, Messaufgaben, Lichtquellen)

Quasi-spektrales Handmessgerät

- Hohe Ergebnisgüte
- Kein Lichtquelleneinfluss
- Echtzeitfähig, Kompakt, Robust, Preiswert
- Weitergehende Untersuchung am PC möglich (z.B. Metamerie)

Geregelte LED-Lichtquelle

- Im Rahmen der LED-Auswahl eine optimale spektrale Approximation
- LED-Anzahl ist nur durch Anzahl der Sensorkanäle begrenzt

5. Zusammenfassung & Ausblick

Quasi-spektrales Messverfahren allgemein

- spektral-nahe messsystemunabhängige Ergebnisse
- anwendbar für Remission, Transmission & Emission
- vielseitig skalierbares Verfahren (Sensoren, Messaufgaben, Lichtquellen)

Quasi-spektrales Handmessgerät

- Hohe Ergebnisgüte
 - Kein Lichtquelleneinfluss
 - Echtzeitfähig, Kompakt, Robust, Preiswert
 - Weitergehende Untersuchung am PC möglich (z.B. Metamerie)
- ✓ Qualitätssicherung: Druck, Lebensmittel, Medizin
- ✓ Einsatz in Produktion



Geregelte LED-Lichtquelle

- Im Rahmen der LED-Auswahl eine optimale spektrale Approximation
- LED-Anzahl ist nur durch Anzahl der Sensorkanäle begrenzt

5. Zusammenfassung & Ausblick

Quasi-spektrales Messverfahren allgemein

- spektral-nahe messsystemunabhängige Ergebnisse
- anwendbar für Remission, Transmission & Emission
- vielseitig skalierbares Verfahren (Sensoren, Messaufgaben, Lichtquellen)

Quasi-spektrales Handmessgerät

- Hohe Ergebnisgüte
 - Kein Lichtquelleneinfluss
 - Echtzeitfähig, Kompakt, Robust, Preiswert
 - Weitergehende Untersuchung am PC möglich (z.B. Metamerie)
- ✓ Qualitätssicherung: Druck, Lebensmittel, Medizin
- ✓ Einsatz in Produktion



Geregelte LED-Lichtquelle

- Im Rahmen der LED-Auswahl eine optimale spektrale Approximation
- LED-Anzahl ist nur durch Anzahl der Sensorkanäle begrenzt

5. Zusammenfassung & Ausblick

Quasi-spektrales Messverfahren allgemein

- spektral-nahe messsystemunabhängige Ergebnisse
- anwendbar für Remission, Transmission & Emission
- vielseitig skalierbares Verfahren (Sensoren, Messaufgaben, Lichtquellen)

Quasi-spektrales Handmessgerät

- Hohe Ergebnisgüte
- Kein Lichtquelleneinfluss
- Echtzeitfähig, Kompakt, Robust, Preiswert
- Weitergehende Untersuchung am PC möglich (z.B. Metamerie)
- ✓ Qualitätssicherung: Druck, Lebensmittel, Medizin
- ✓ Einsatz in Produktion



Geregelte LED-Lichtquelle

- Im Rahmen der LED-Auswahl eine optimale spektrale Approximation
- LED-Anzahl ist nur durch Anzahl der Sensorkanäle begrenzt
- ✓ Messanwendungen: Kalibrieraufwand für 3-Bereichsmesssysteme sinkt
- ✓ Lichtquelle mit gezielt positiver Wirkung auf den Menschen
- ✓ Qualitätssicherung: Berücksichtigung spezieller Messobjekteigenschaften

Vielen Dank für Ihr Interesse!

Haben Sie noch Fragen?