

# Entwicklungslinien zur Flusssdichtemesstechnik der DLR-Solarforschung

M. Thelen, C. Willsch, C. Raeder, G. Dibowski, M. Röger, M. Offergeld  
DLR Institut für Solarforschung

19. Kölner Sonnenkolloquium  
Köln, 6. Juli 2016

Knowledge for Tomorrow



# Überblick

1. Motivation
2. Grundlagen der Flussdichte-Messung
3. Entwicklungslinien der Flussdichte-Messmethoden
  - a. Kamera-(Schwenk)Target-Methode
  - b. Flussdichte-Messung auf Receiver-Oberflächen
  - c. Messergebnis-gestützte Flussdichte-Simulation
4. Zusammenfassung



# 1 Motivation

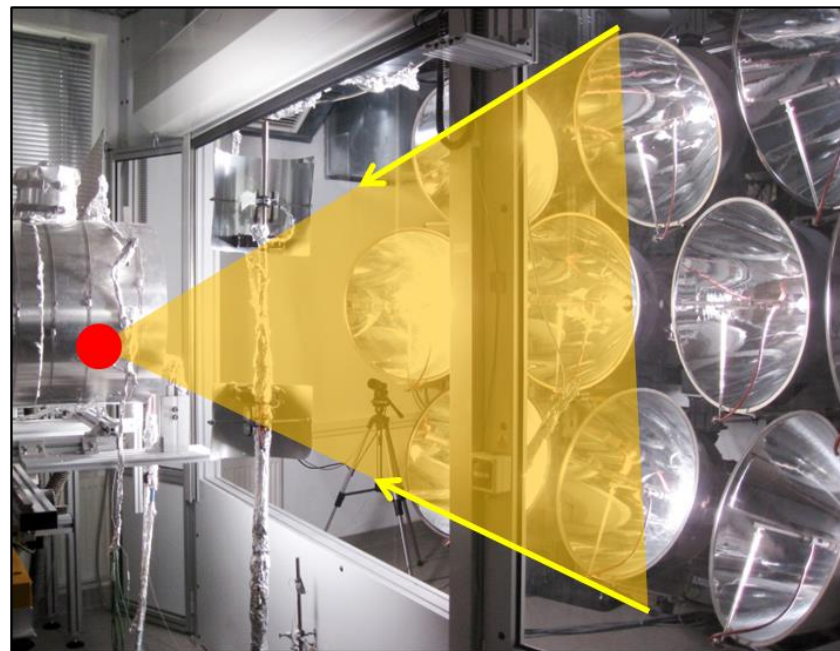
## Großanlagen des DLR zur Erzeugung hochkonzentrierter Solarstrahlung



Sonnenofen DLR Köln (SOF)



Solarturm DLR Jülich (STJ)

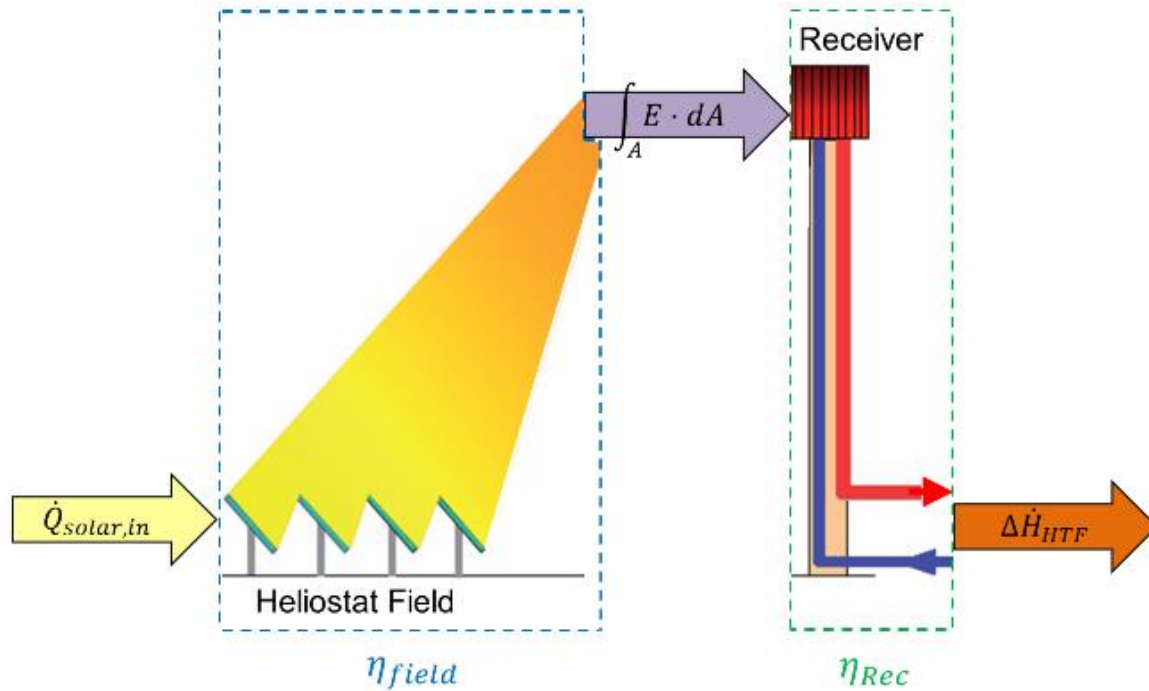


Hochleistungsstrahler DLR Köln (HLS)

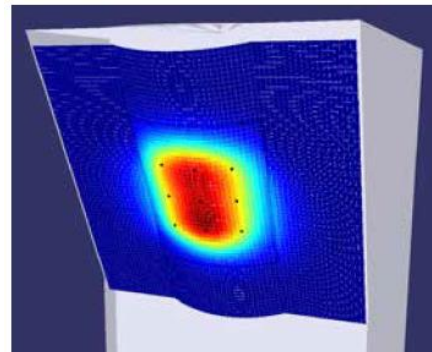




# 1. Motivation



- Bestimmung der Receiver-Eintrittsleistung
- Ableitung von Heliostatfeld- und Receiver-Wirkungsgraden (Abnahme)



- Online-Überwachung der Flussdichte-Verteilung und Zielpunktoptimierung



# Überblick

1. Motivation

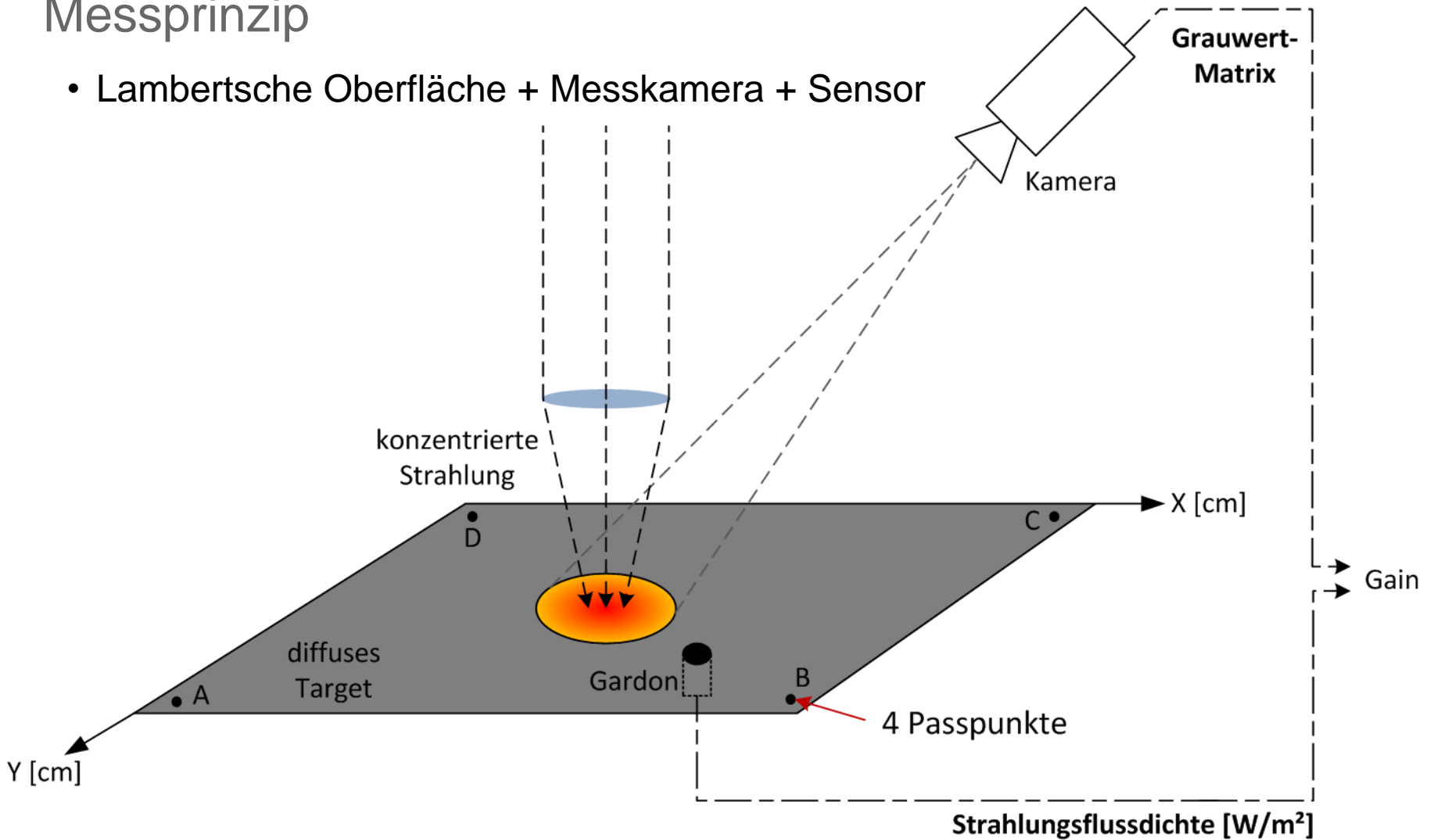
2. Grundlagen der Flusssdichte-Messung



## 2. Grundlagen

### Messprinzip

- Lambertsche Oberfläche + Messkamera + Sensor



## 2. Grundlagen

### Aufbau zur optischen Flussdichtemessung (SOF & HLS)

- Kamera und Strahlungsquelle fixiert

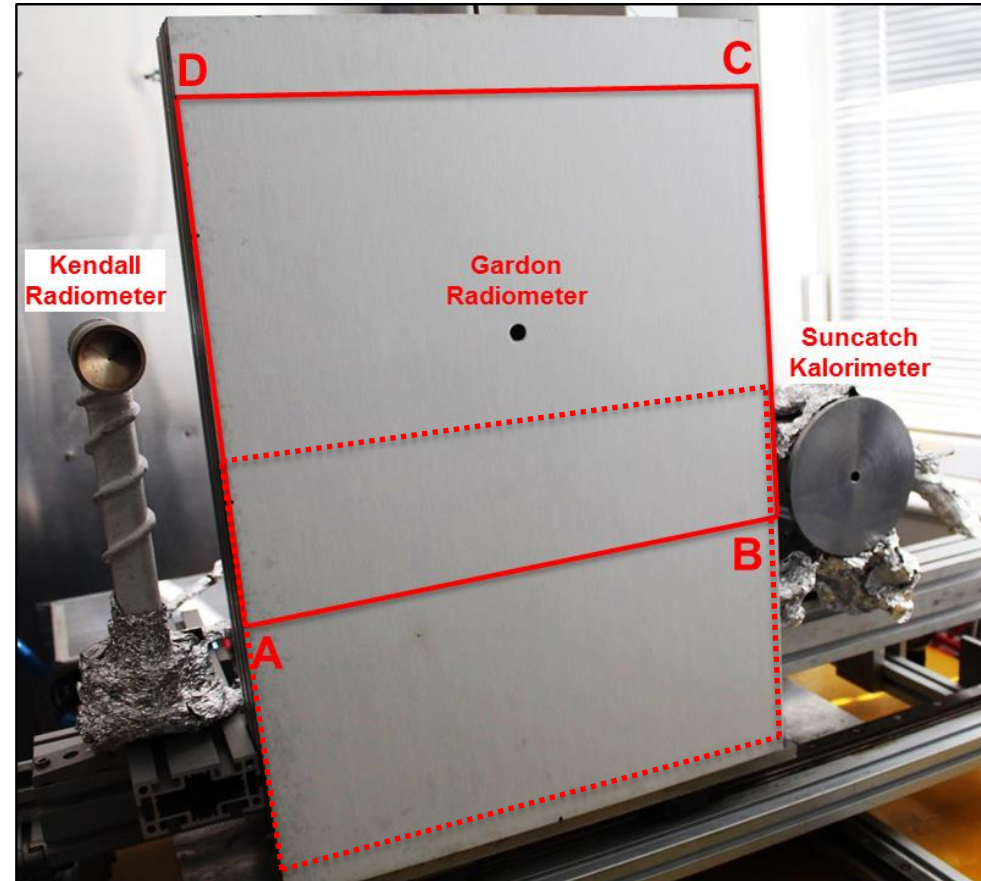
- **Schritt 1:** Passpunkte markieren

**A - D**

- **Schritt 2:** Sensor auslesen



- **Schritt 3:** Kamera auslesen

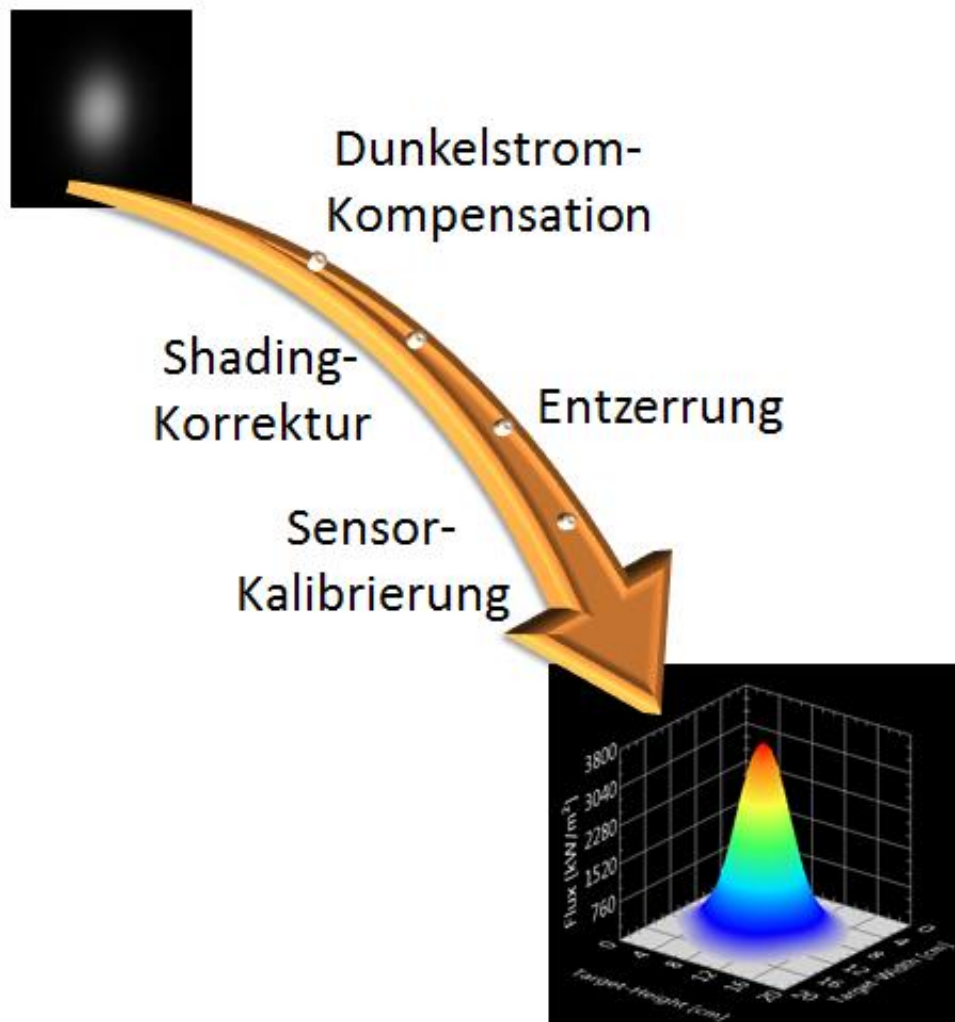


4 Passpunkte zur Korrektur des projektiven Fehlers (Bildverzerrung)



## 2. Grundlagen

### Vom Foto zur Strahlungsflussdichteverteilung



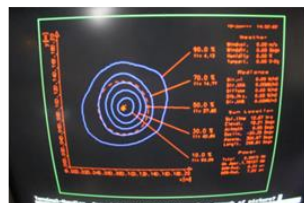


# Überblick

1. Motivation
2. Grundlagen der Flussdichte-Messung
3. Entwicklungslinien der Flussdichte-Messmethoden
  - a. Kamera-(Schwenk)Target-Methode



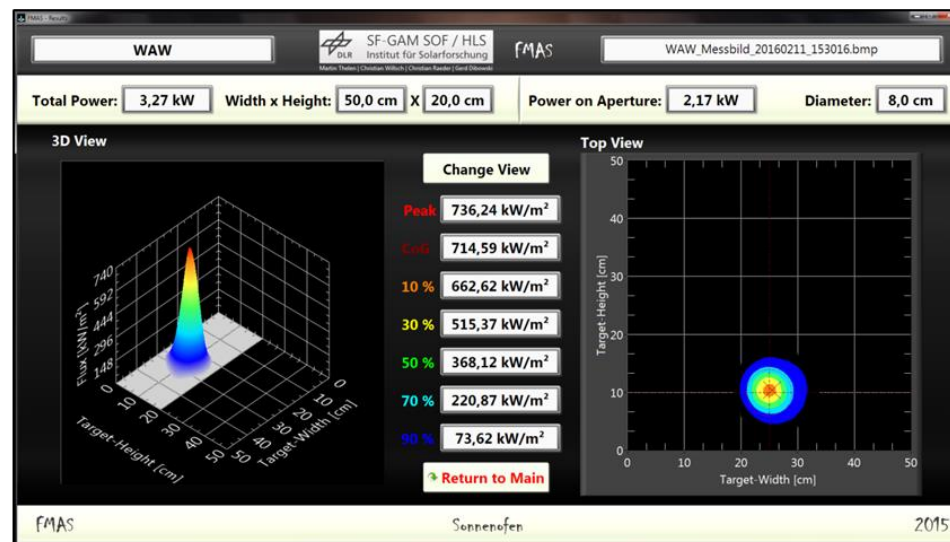
# 3a. Entwicklungslinien: Kamera-Schwenktarget Hard- & Software im Sonnenofen und Hochleistungsstrahler Köln



## FATMES (1994)

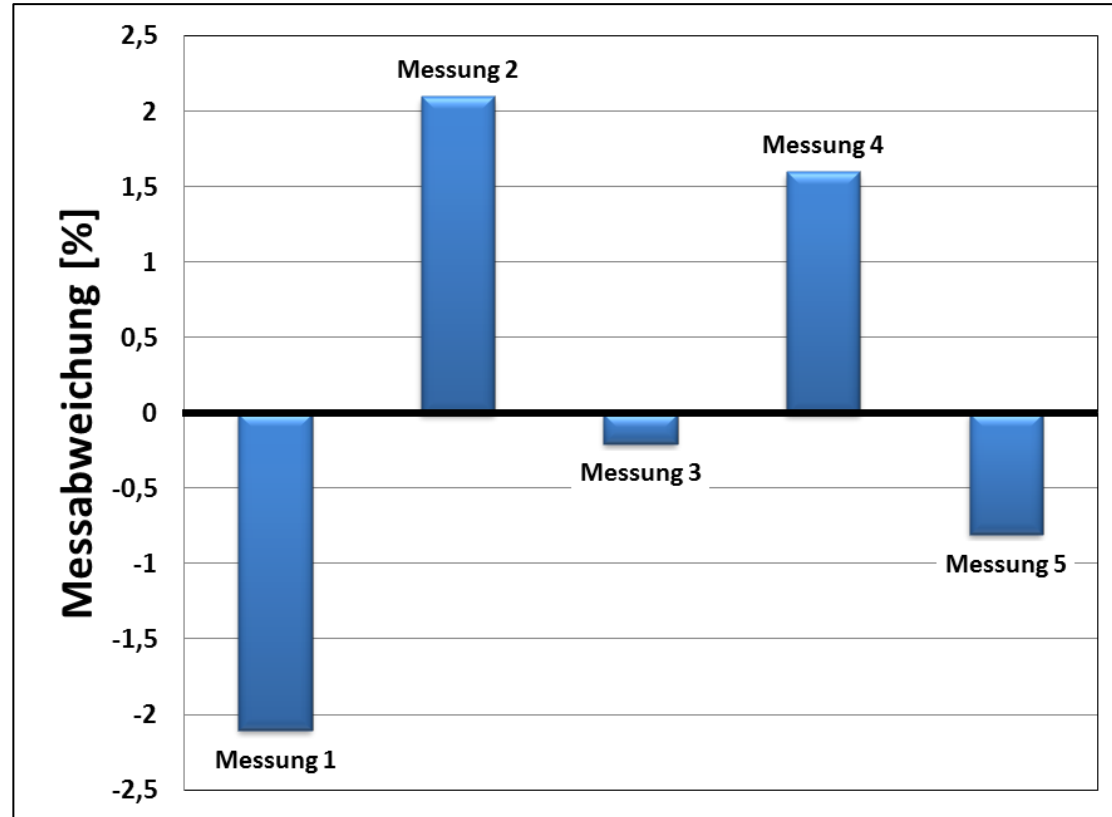


## FMAS (2015)



## 3a. Entwicklungslinien: Kamera-Schwenktarget FMAS – Flux Mapping Acquisition System

- Eigenentwicklung in LabVIEW
- Vorteile gegenüber FATMES
  - ✓ Reduzierung des Platzbedarfs
  - ✓ portabel mit Notebook
  - ✓ Erhöhung von Leistung und Geschwindigkeit
  - ✓ hochauflösende Bilder
  - ✓ zuverlässige Messdatenbank
  - ✓ einfache Bedienung
  - ✓ transparente Algorithmen
- Messgenauigkeit  $\pm 3 \%$



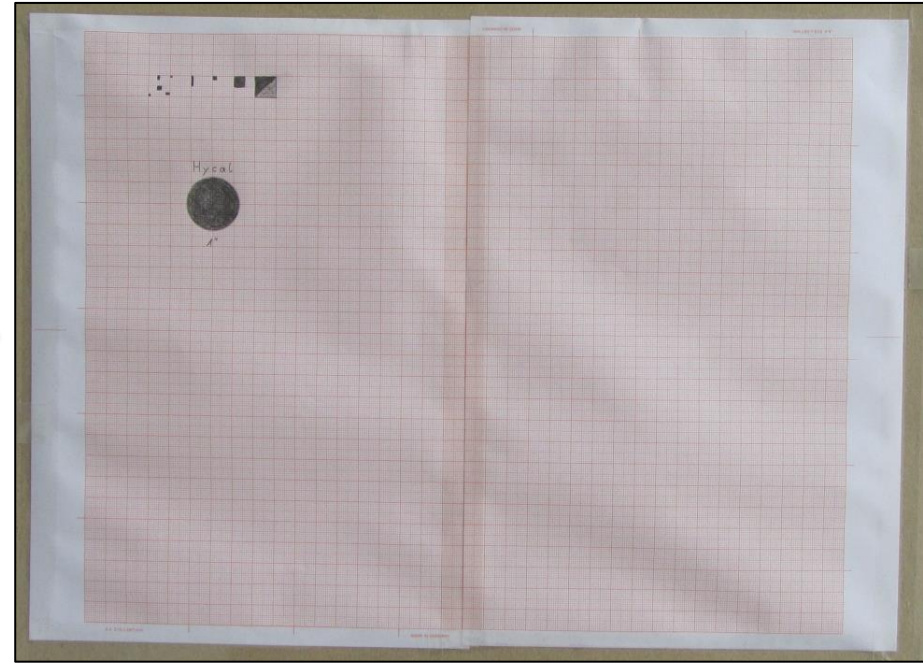
# 3a. Entwicklungslinien: Kamera-Schwenktarget

## Hochauflösende FMAS-Bilder aus dem Heliostatfeld

### Testaufbau



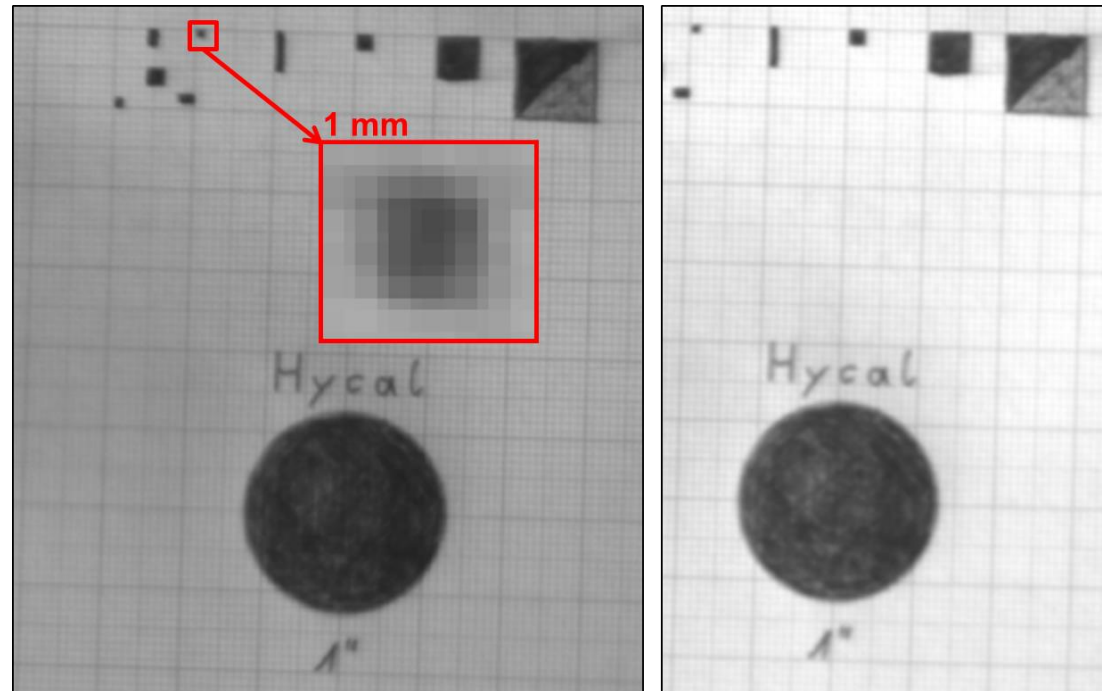
Distanz: 20 m





# 3a. Entwicklungslinien: Kamera-Schwenktarget Hochauflösende FMAS-Bilder aus dem Heliostatfeld Ergebnisse

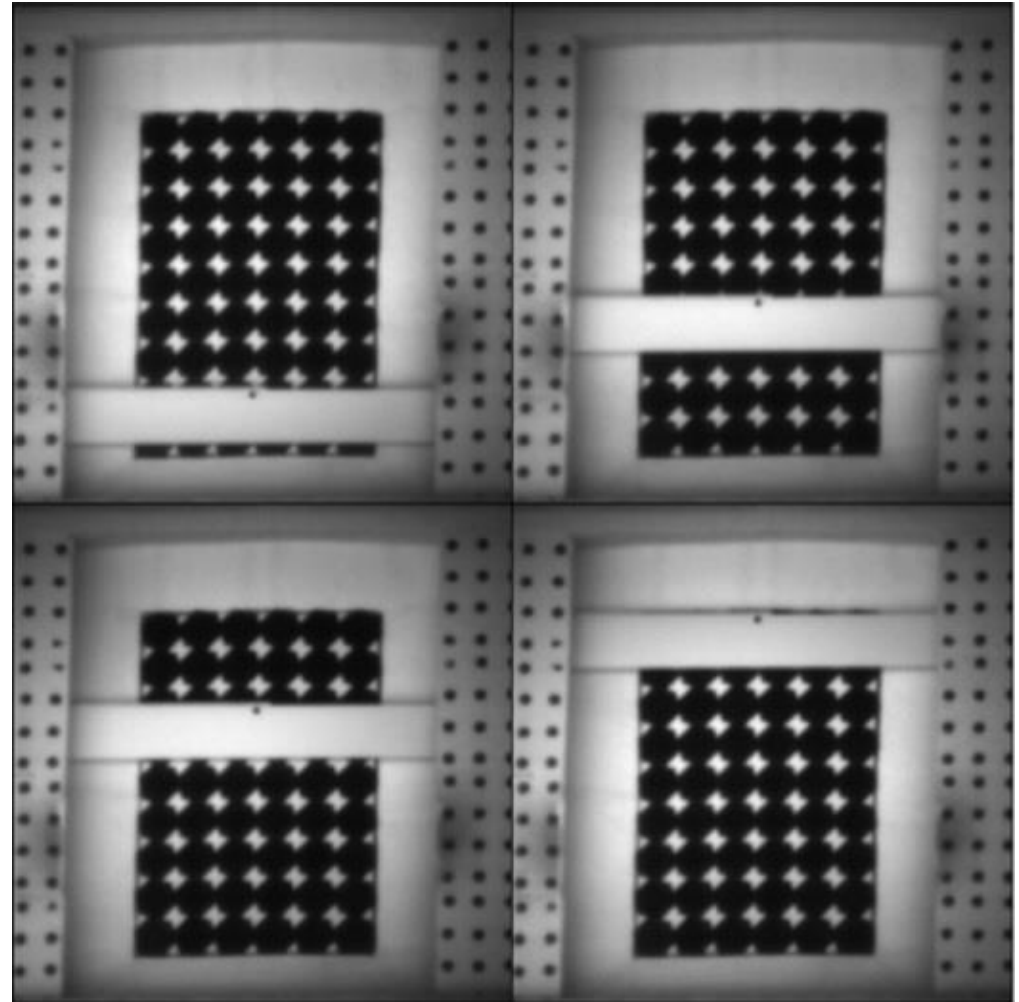
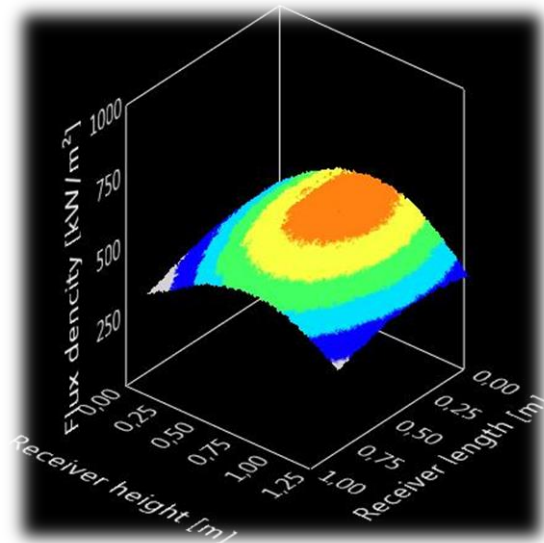
- Vorteile von Messkameras und professioneller Fotografie vereinen
  - Steuerung von Objektiven mit ES- / EF-Mount per Software
  - Zugriff auf Rohdaten über Messkamera-Schnittstellen
  - hohe Bildauflösung verringert Messfehler vor allem durch die projektive Bildverzerrung



# 3a. Entwicklungslinien: Kamera-Schwenktarget

## Aufbau zur Flussdichtemessung am Solarturm Jülich (STJ)

- Movingbar mit integriertem Sensor zur Kalibrierung
- Einzelbilder werden zum Strahlungsflussdichtebild zusammengesetzt



# Überblick

1. Motivation
2. Grundlagen der Flussdichte-Messung
3. Entwicklungslinien der Flussdichte-Messmethoden
  - a. Kamera-(Schwenk)Target-Methode
  - b. Flussdichte-Messung auf Receiver-Oberflächen



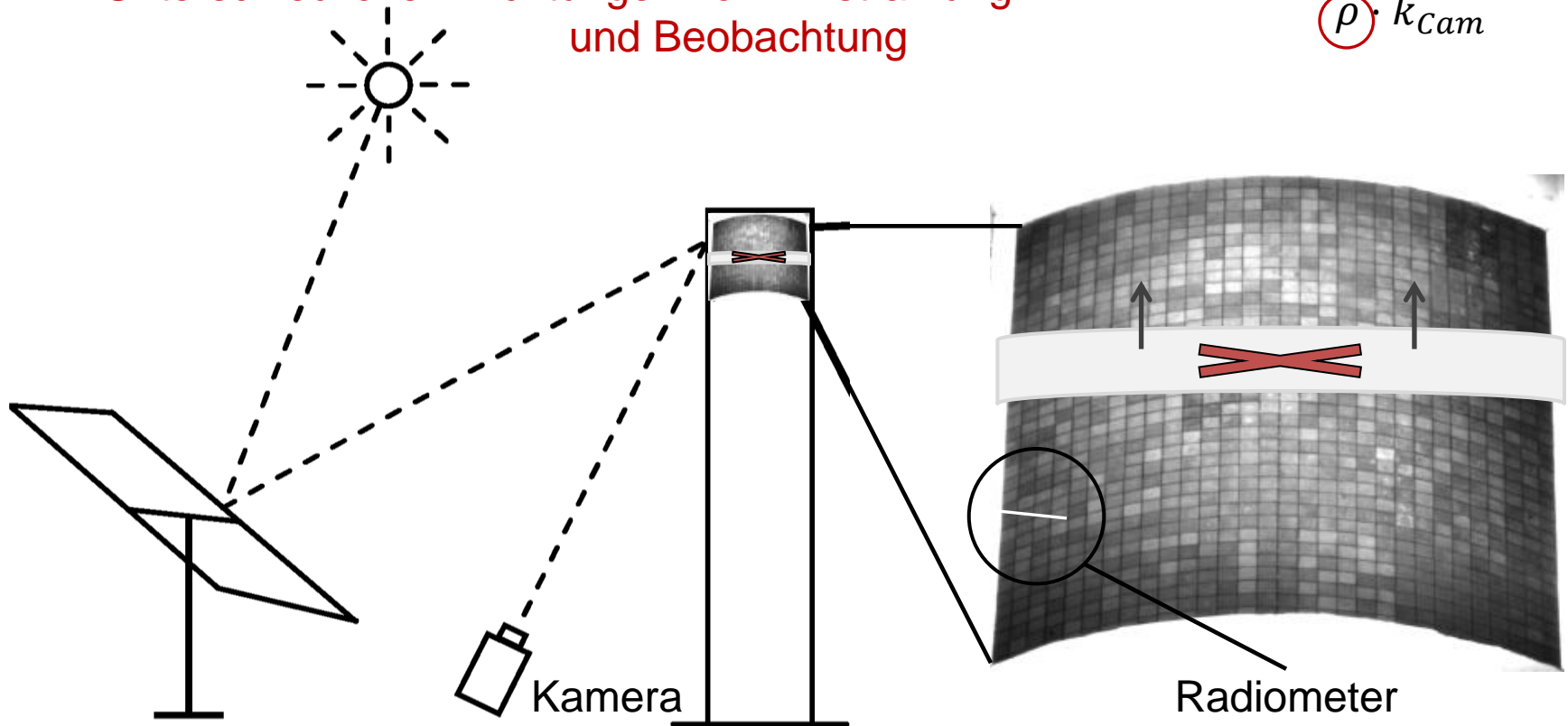
### 3b. Entwicklungslinien: Flussdichte-Messung auf Receiver-Oberflächen

Refl.  $\rho$  variiert über Absorberfläche wegen...

- Material-Inhomogenitäten
- Unterschiedlichen Richtungen von Einstrahlung und Beobachtung

$$GV = E \cdot \rho \cdot k_{Cam}$$

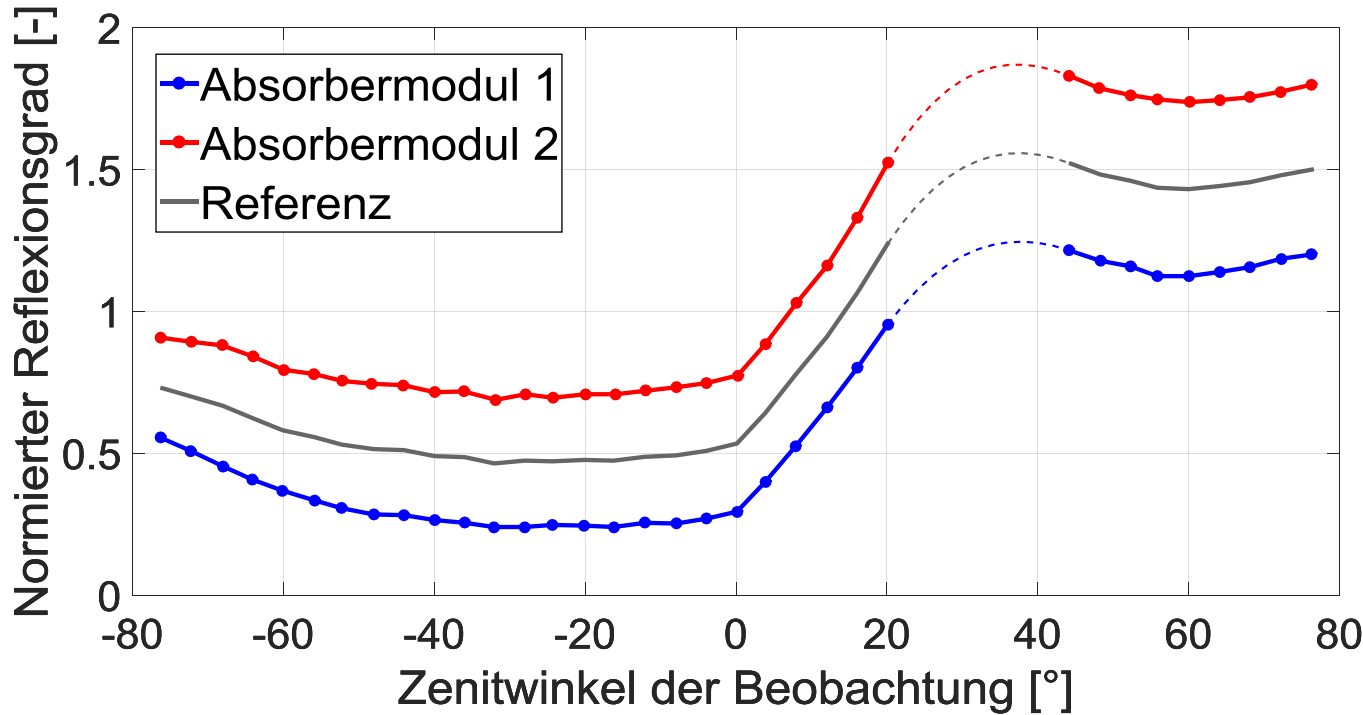
$$\Leftrightarrow E = GV \cdot \frac{1}{\rho \cdot k_{Cam}}$$





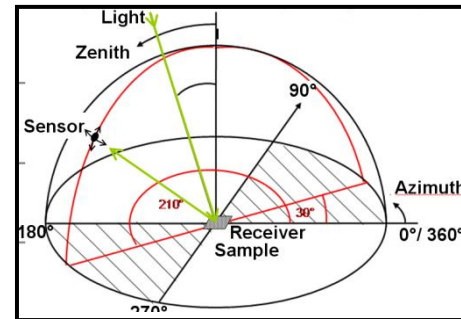
# 3b. Entwicklungslinien: Flussdichte-Messung auf Receiver-Oberflächen

## Bestimmung der Richtungsabhängigkeit der Reflexion



Einstrahlung:  
Azimutwinkel 0°  
Zenitwinkel 30°

Beobachtung:  
Azimutwinkel 0° bzw. 180°



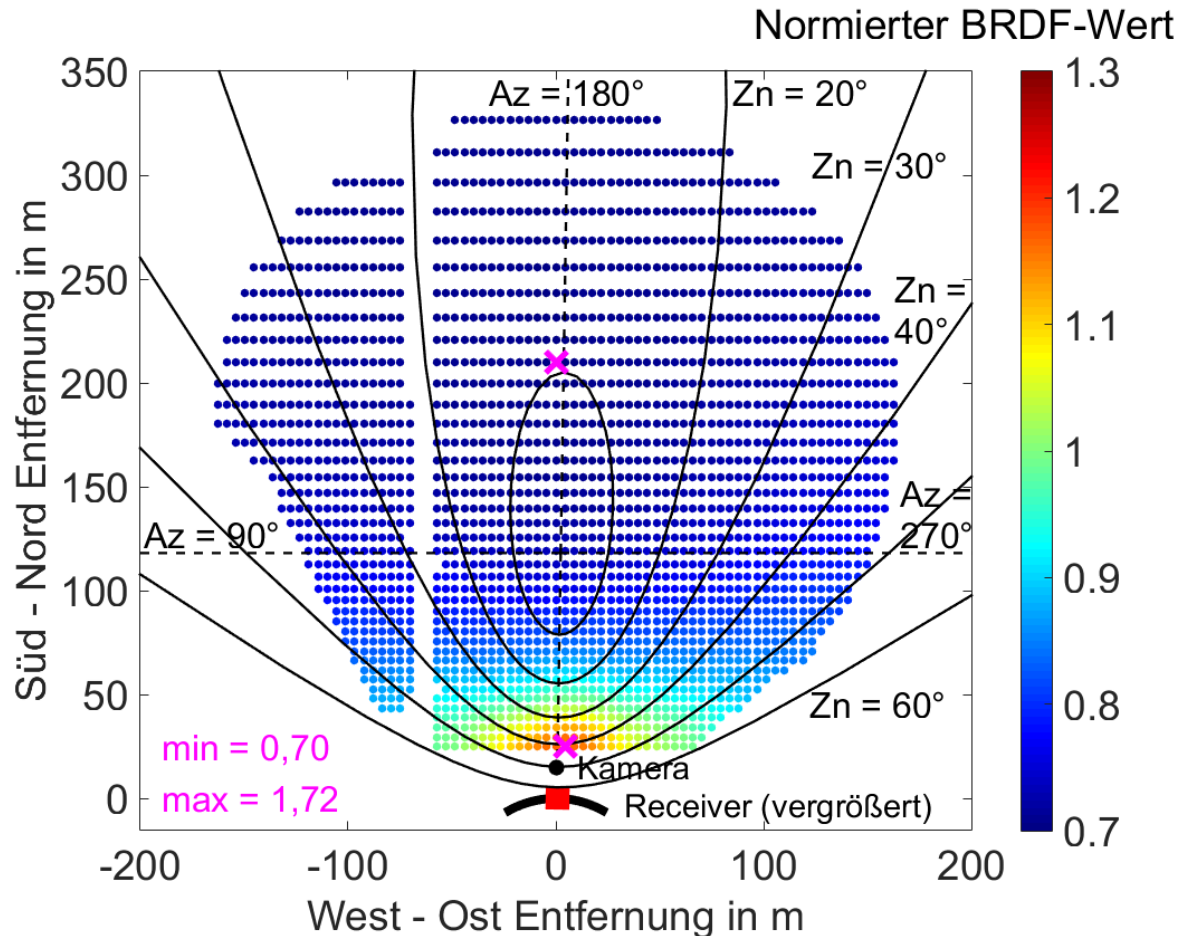
Annahme:  $\rho_i(\phi, \theta, \phi_r, \theta_r) = m_i \cdot \rho_{mean}(\phi, \theta, \phi_r, \theta_r)$

Reflexionsgrad
"Tönung"
Winkelabhängigkeit  
Cup  $i$ 
Cup  $i$ 
BRDF



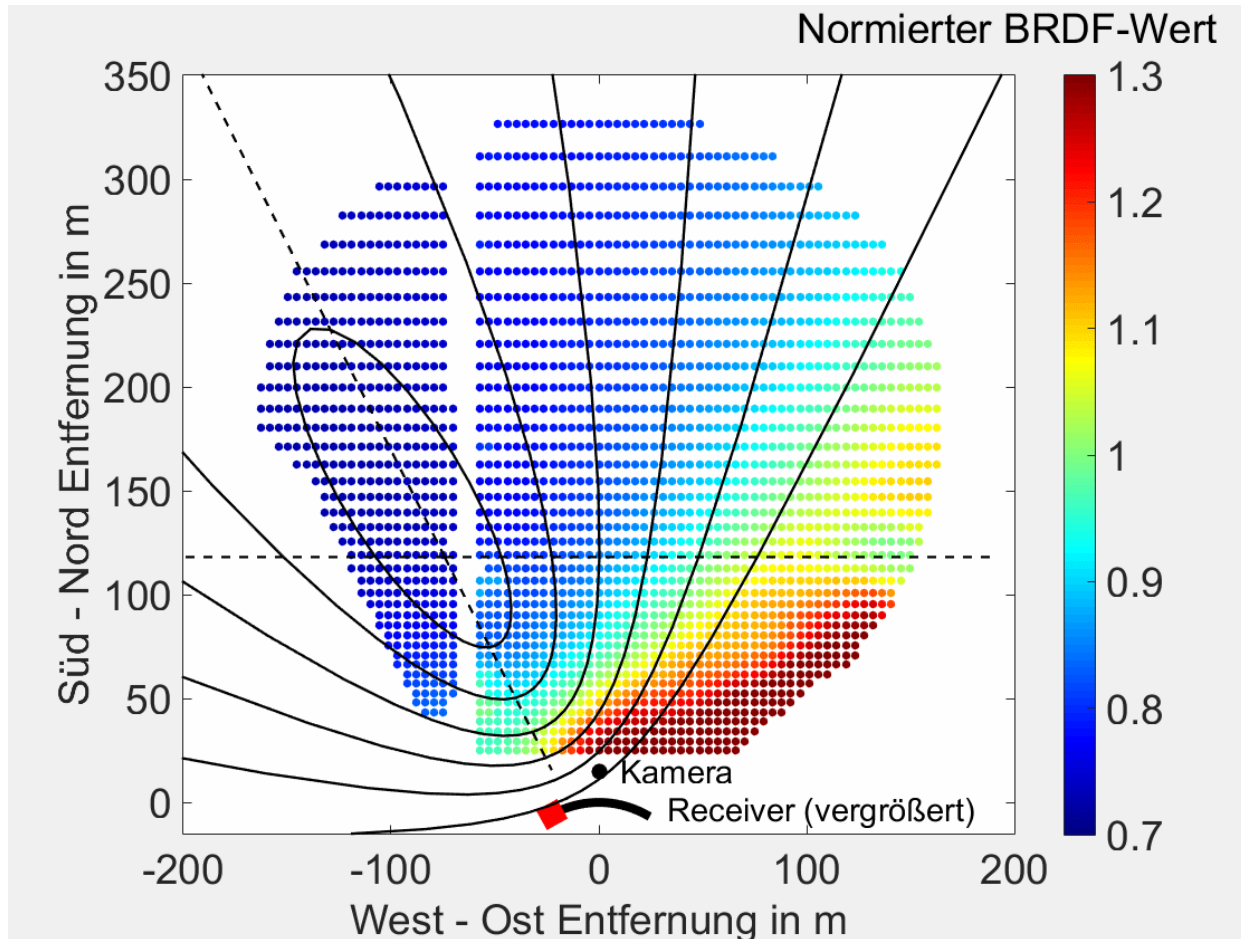
### 3b. Entwicklungslinien: Flussdichte-Messung auf Receiver-Oberflächen

#### Auswirkung der Richtungsabhängigkeit der Reflexion



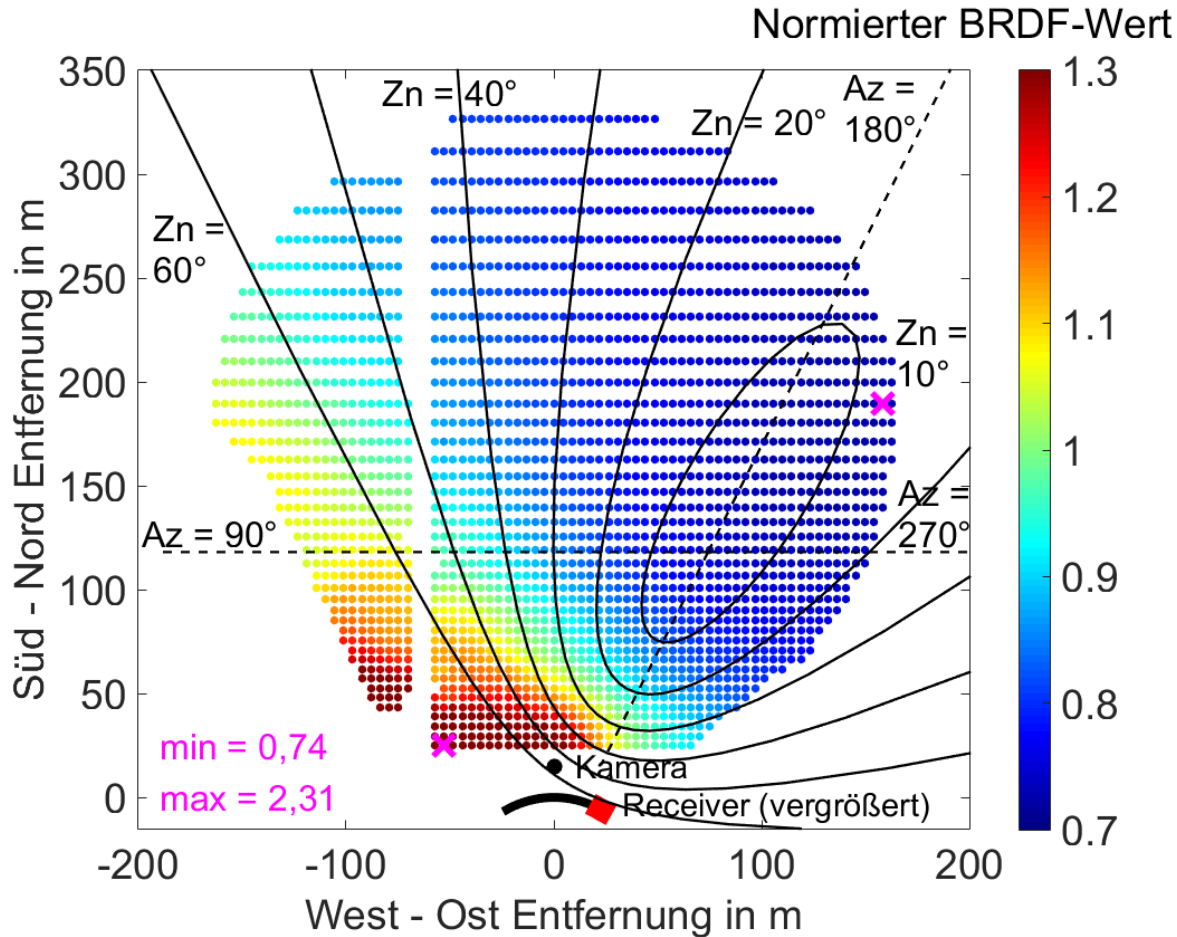
# 3b. Entwicklungslinien: Flussdichte-Messung auf Receiver-Oberflächen

## Auswirkung der Richtungsabhängigkeit der Reflexion



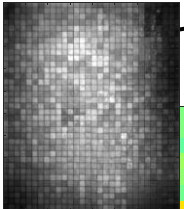
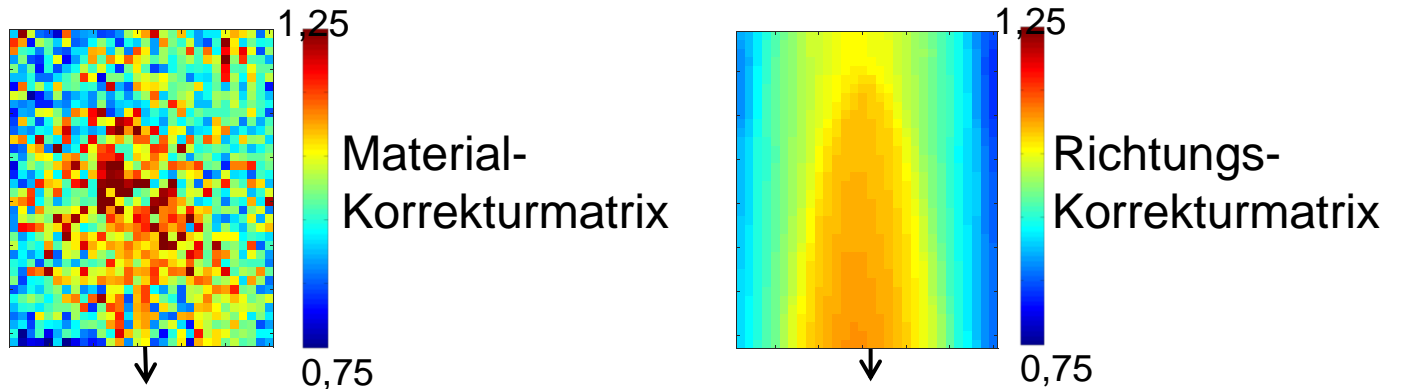
# 3b. Entwicklungslinien: Flussdichte-Messung auf Receiver-Oberflächen

## Auswirkung der Richtungsabhängigkeit der Reflexion





# 3b. Entwicklungslinien: Flussdichte-Messung auf Receiver-Oberflächen



**Rohbild**

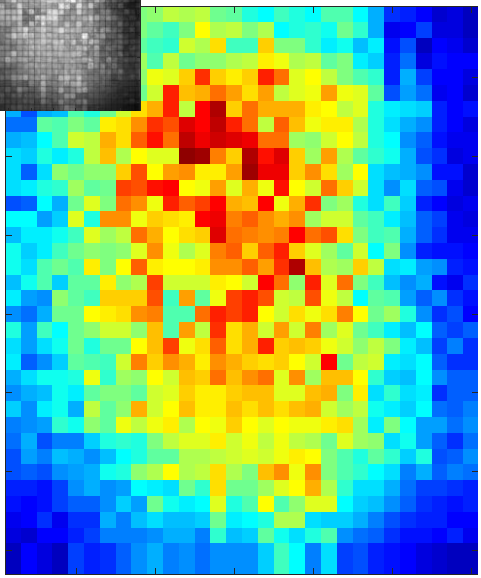
Grauwert  
4180

**Material-korrigiert**

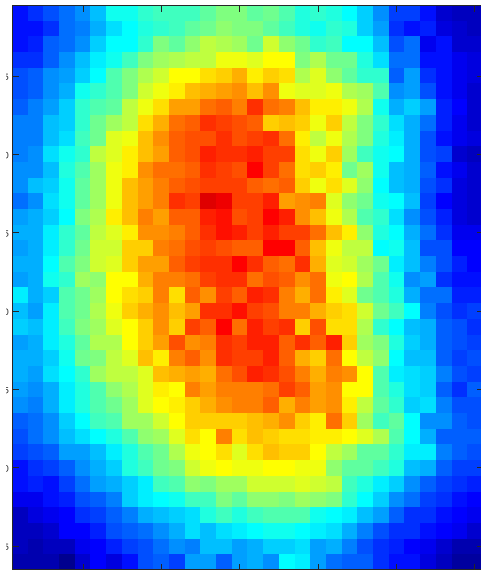
Grauwert  
4180

**Richtungs-korrigiert**

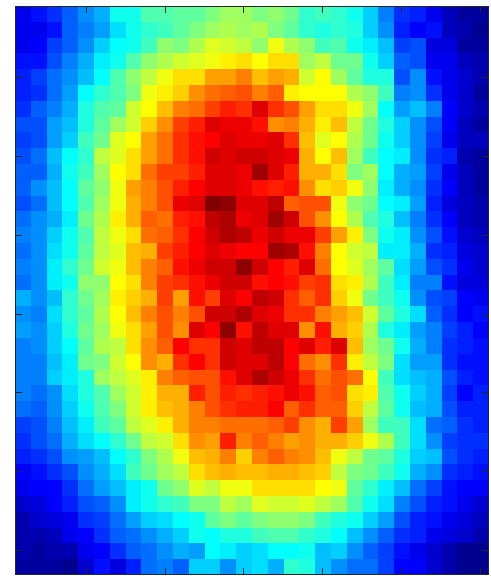
Grauwert  
4180



620



620



620

nach Kalibrierung: Flussdichte [kW/m<sup>2</sup>]



# Überblick

1. Motivation
2. Grundlagen der Flussdichte-Messung
3. Entwicklungslinien der Flussdichte-Messmethoden
  - a. Kamera-(Schwenk)Target-Methode
  - b. Flussdichte-Messung auf Receiver-Oberflächen
  - c. **Messergebnis-gestützte Flussdichte-Simulation**



## 3c. Entwicklungslinien: Messergebnis-gestützte Flussdichte-Simulation

**Genauigkeit von Raytracing-Simulationen hängt hauptsächlich von der Qualität der Input-Parameter ab:**

- |   |   |
|---|---|
| ➤ Heliostat-Steigungsfehler                               | → bekannt durch Deflektometrie            |
| ➤ Heliostat Tracking Fehler                               | → “sollten“ bekannt sein (Kontrollsystem) |
| ➤ Heliostat-Position und Geometrie                        | → bekannt                                 |
| ➤ Spiegel-Reflektivität, Cleanliness                      | → ungefähr bekannt                        |
| ➤ Atmosphärische Parameter<br>(DNI, Sunshape, Extinktion) | → bekannt (DNI), z.T. nur näherungsweise  |
| ➤ Turm-Geometrie  | → bekannt                                 |
| ➤ Receiver-Position                                       | → bekannt                                 |

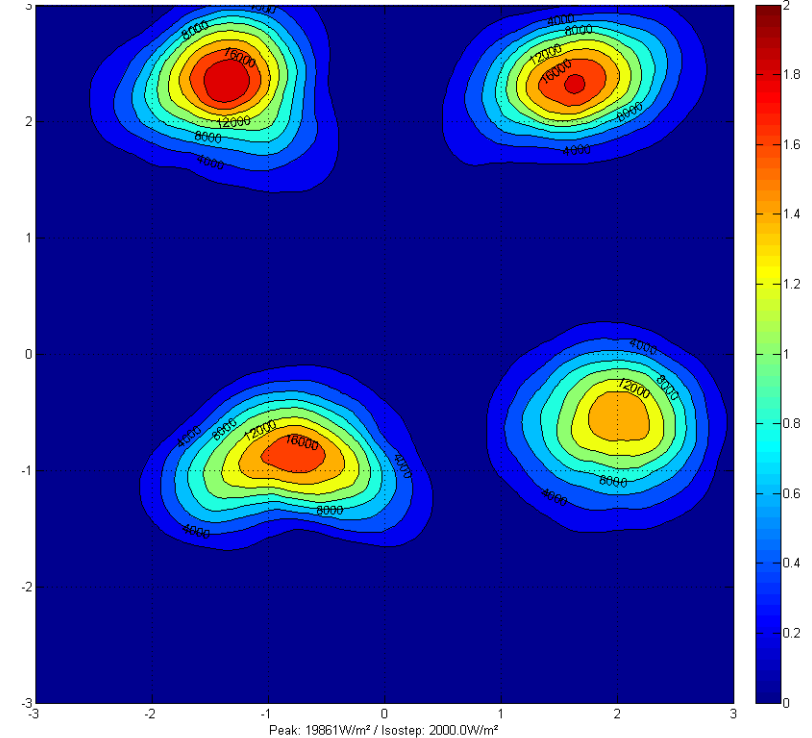
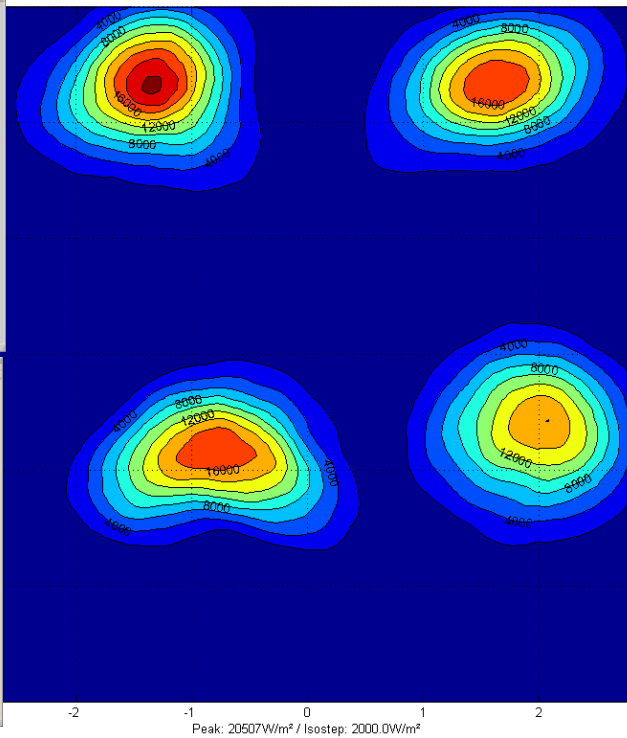
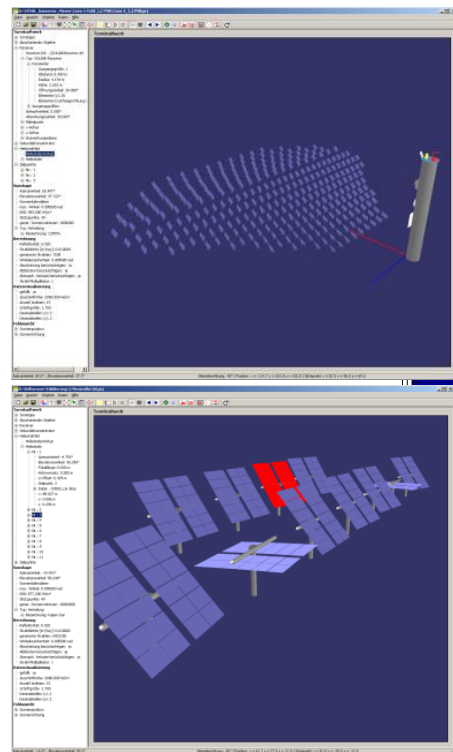
→ Raytracing-Simulationen können benutzt werden, aber sie sollten validiert werden



# 3c. Entwicklungslinien: Messergebnis-gestützte Flussdichte-Simulation

Simulation

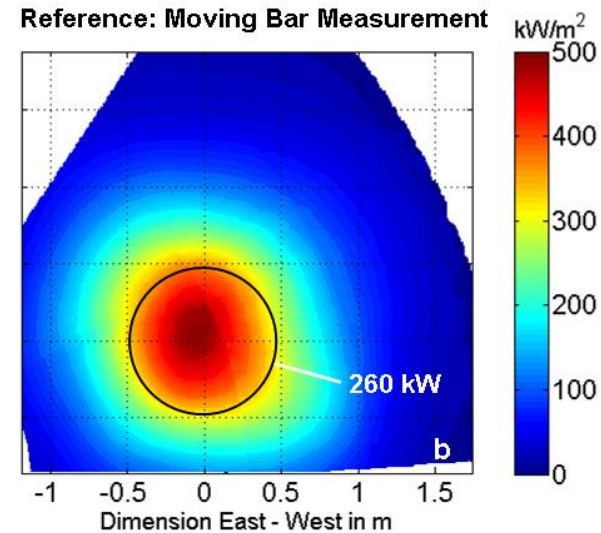
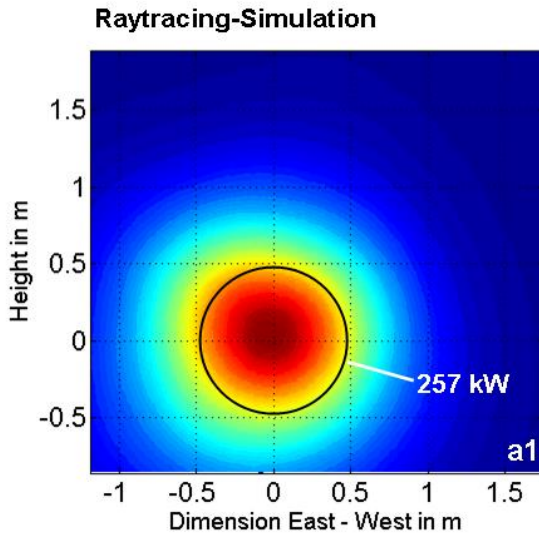
Flussdichte-Messung





# 3c. Entwicklungslinien: Messergebnis-gestützte Flussdichte-Simulation

Vergleich mit Referenz



- Simulation (STRAL)
- Integrierte Leistung 257 kW

➤ Ist die Simulation korrekt?  
➔ Vereinfachte Messung

- Referenzmessung mit Moving Bar
- Integrierte Leistung 260 kW



# Überblick

1. Motivation
2. Grundlagen der Flussdichte-Messung
3. Entwicklungslinien der Flussdichte-Messmethoden
  - a. Kamera-(Schwenk)Target-Methode
  - b. Flussdichte-Messung auf Receiver-Oberflächen
  - c. Messergebnis-gestützte Flussdichte-Simulation
4. Zusammenfassung



# Zusammenfassung

1. Flussdichte-Messungen sind ein wichtiges Werkzeug zur **Bestimmung des Wirkungsgrades** von **Heliostatfeld** und **Receiver** und damit für Abnahmeverfahren
2. Das DLR passt sowohl konventionelle **Kamera/Target-Verfahren** an den neuesten Stand der Technik an,
3. und erforscht zudem Methoden, welche einfacher auf **großskalige Solarturm-Kraftwerke** zu übertragen sind
4. Die Ansätze zur
  - **Messung direkt auf der Receiveroberfläche** für externe Receiver &
  - **Messergebnis-gestützten Flussdichte-Simulation** für Cavity Receiverstehen in naher Zukunft der Industrie zur Verfügung.



Supported by:



on the basis of a decision  
by the German Bundestag



Ministry of Innovation, Science  
and Research of the State of  
North Rhine-Westphalia  
(MIWF NRW), Germany



**Vielen Dank**  
für Ihre Aufmerksamkeit

**Vielen Dank**  
an F. Göhring, D. Benitez, M. Ebert, C. Prahl

Martin Thelen, Marc Röger  
martin.thelen@dlr.de  
marc.roeger@dlr.de



Knowledge for Tomorrow

