

# Thermisch durchstimmbares Signal-Recycling für den Gravitationswellendetektor GEO600

*oder*

*Ein Spiegel der etwas „anderen“ Art*

**S t e f a n   H i l d**



Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik  
(Albert-Einstein-Institut)

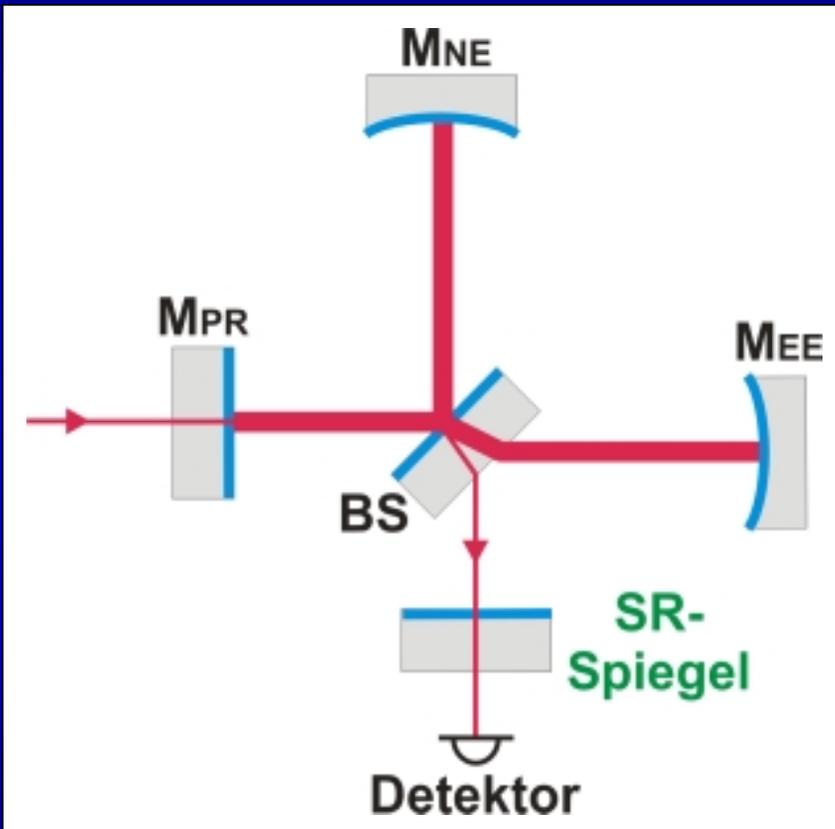
Universität Hannover 



# Gliederung

- **Motivation**
- **Konzepte zur technischen Realisierung**
- **Demonstration am Garchinger 12m-Prototypen**
- **Thermisch durchstimmbares Signal-Recycling für GEO600**
- **Aktive thermische Optik für GEO600**
- **Ausblick**

# Idee des Signal-Recyclings



Zusätzlicher teildurchlässiger Spiegel im Ausgang des MI:

- Empfindlichkeitsverbesserung durch resonante Überhöhung der Signalseitenbänder

➤ Zwei Parameter:

- **Tuning**
- **Bandbreite**

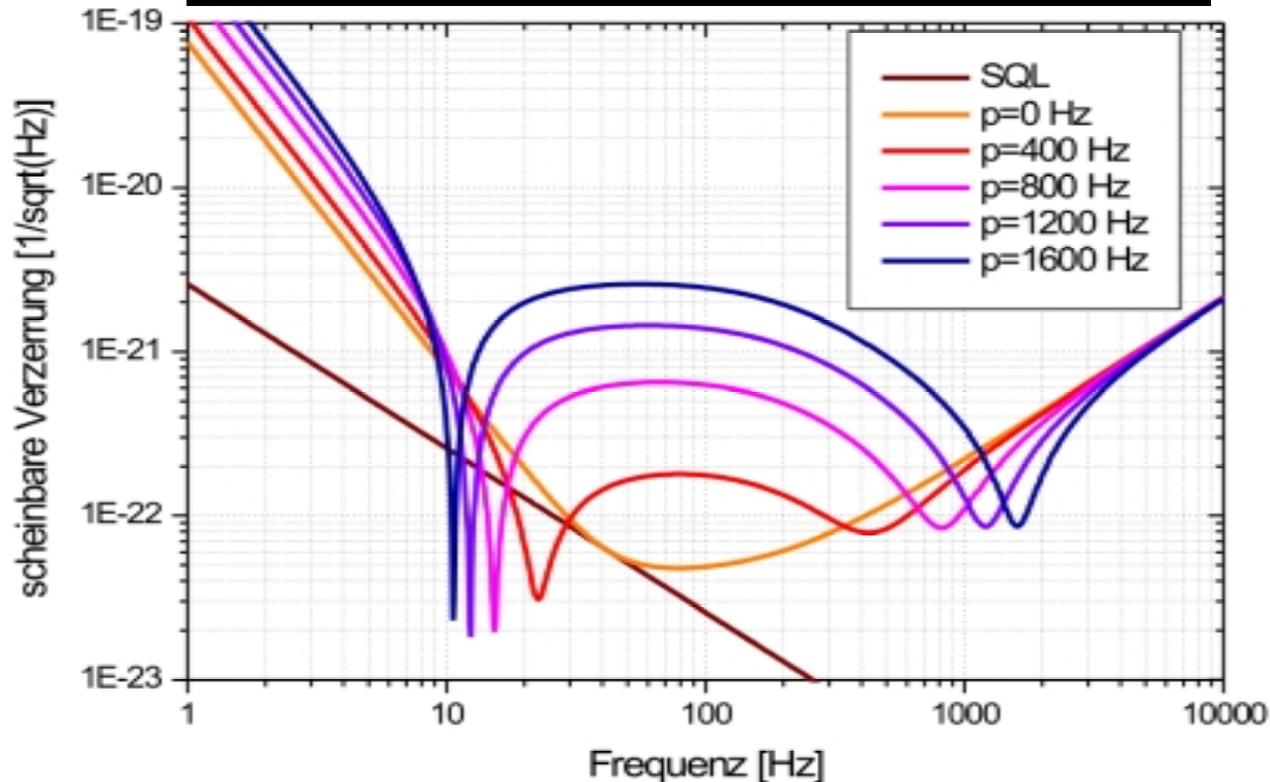
*Anpassung an astronomische Anforderungen*

Mit Signal-Recycling kann prinzipiell das Standard-Quanten-Limit (SQL) unterboten werden (optical spring resonance)



# Tuning des Signal-Recyclings

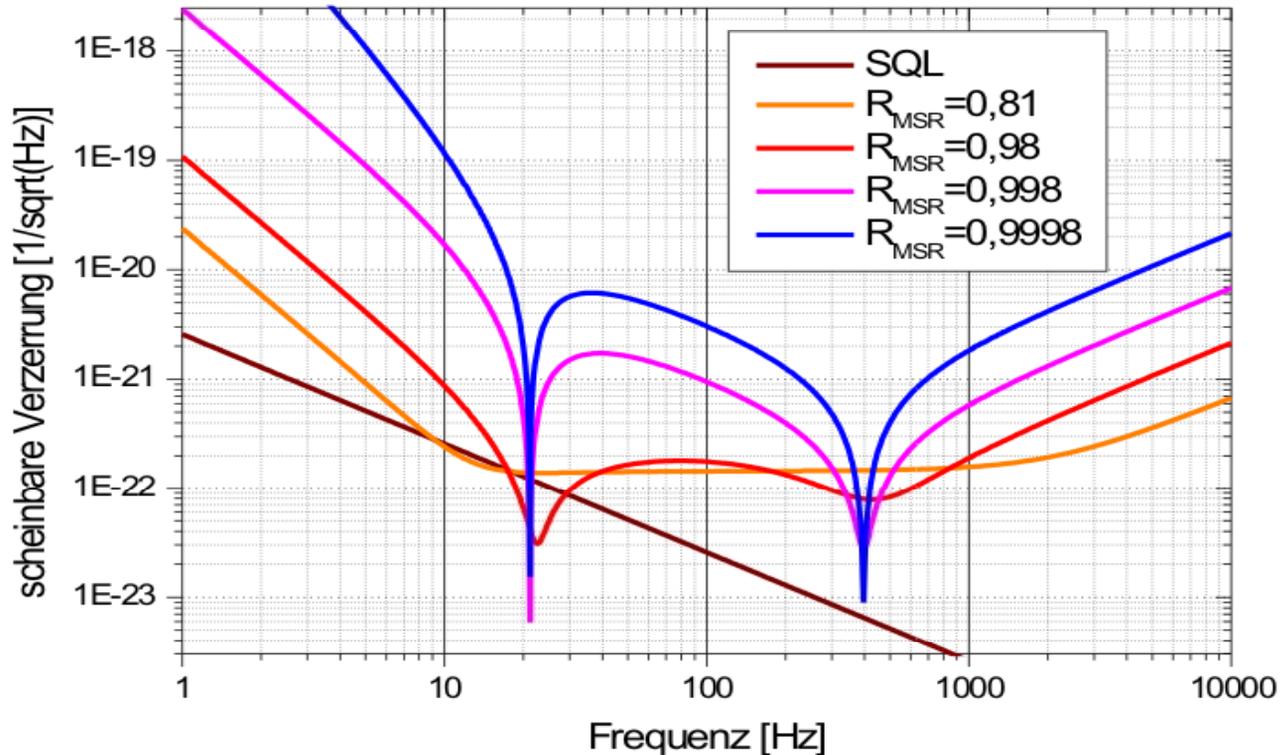
## Optisches Rauschen von GEO600



Das Tuning des Signal-Recyclings wird durch die mikroskopische Position des Signal-Recycling-Spiegels bestimmt. (Abstand MSR zu MI)

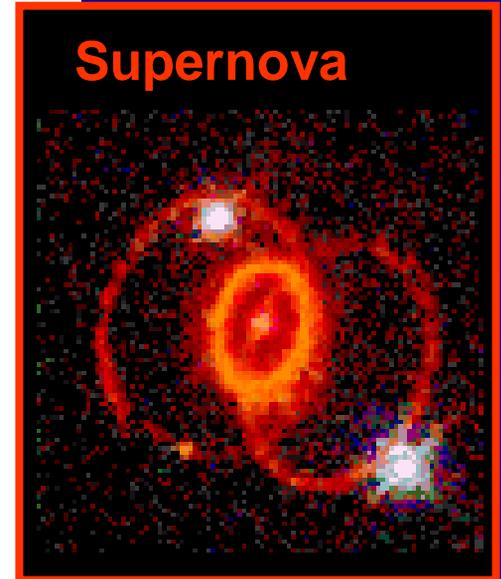
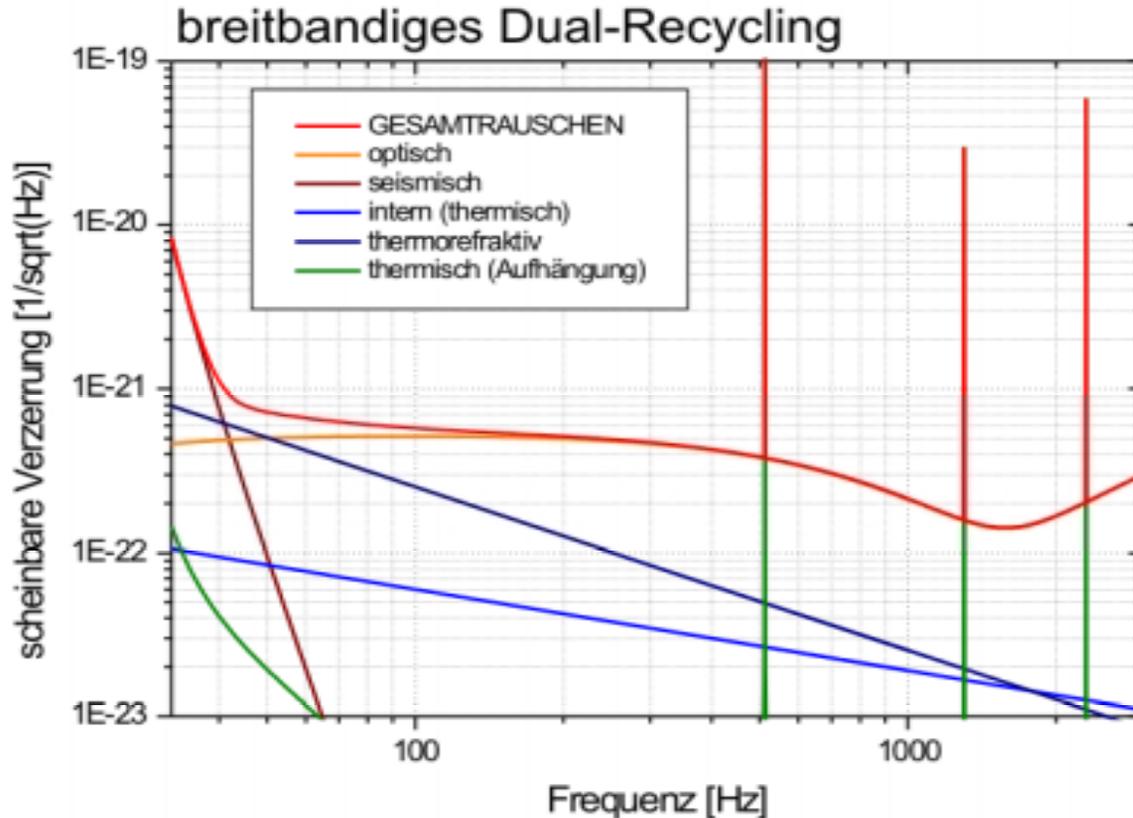
# Bandbreite des Signal-Recyclings (GEO600)

## Optisches Rauschen von GEO600



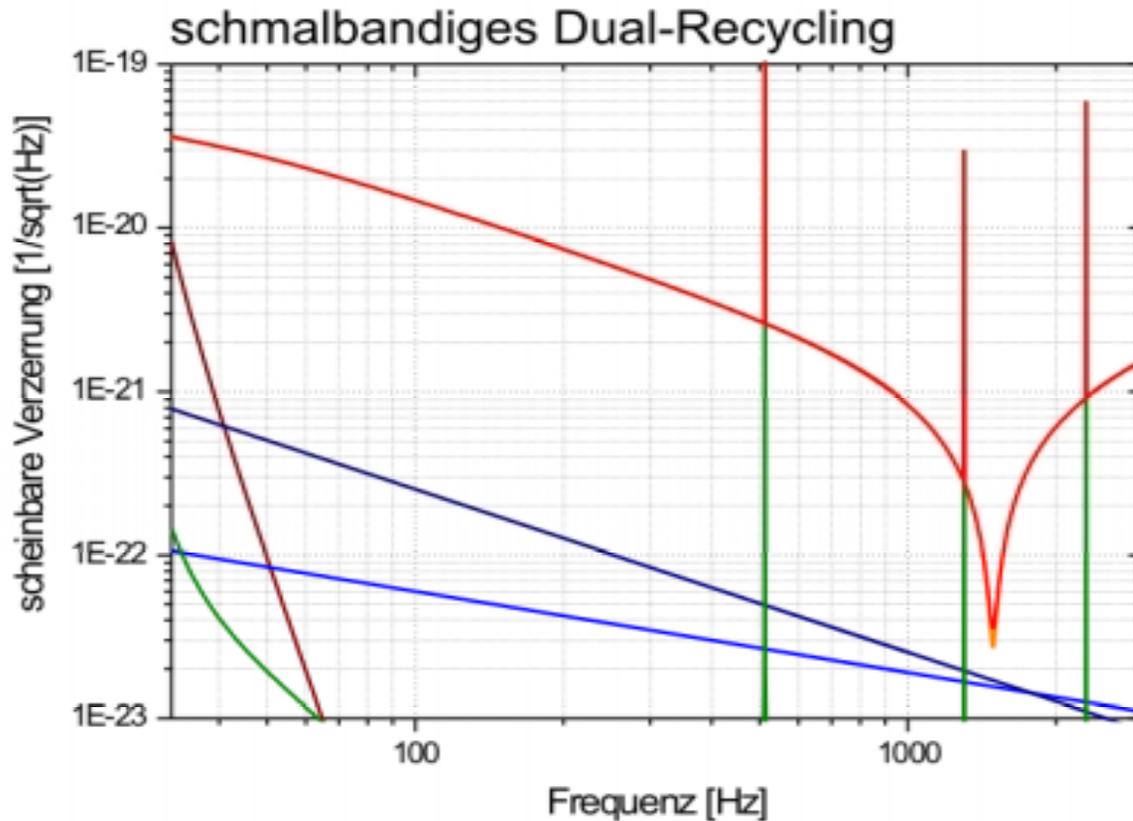
Die **Bandbreite** des Signal-Recyclings wird durch die Finesse der SR-Cavity, also die **Reflektivität des Signal-Recycling-Spiegels** bestimmt.

# Gesamtrauschen von GEO600 (broadband)

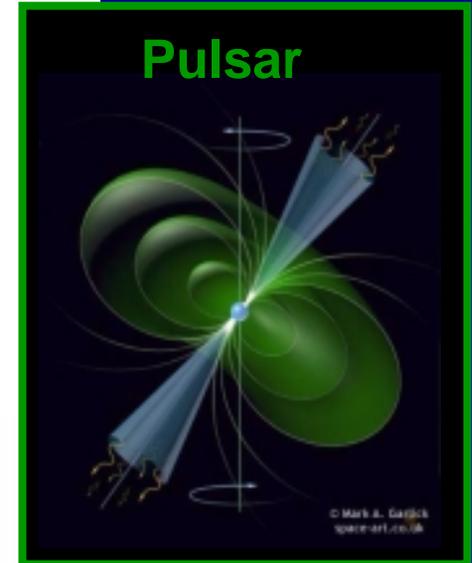


Gut geeignet für Signale mit großer Frequenzbandbreite bzw. unbekannter Frequenz.

# Gesamtrauchen von GEO600 (narrowband)



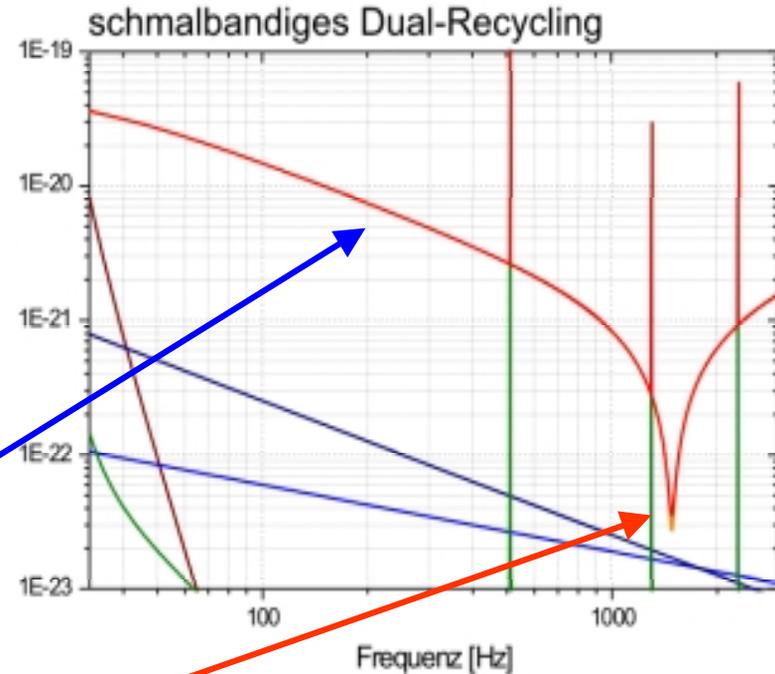
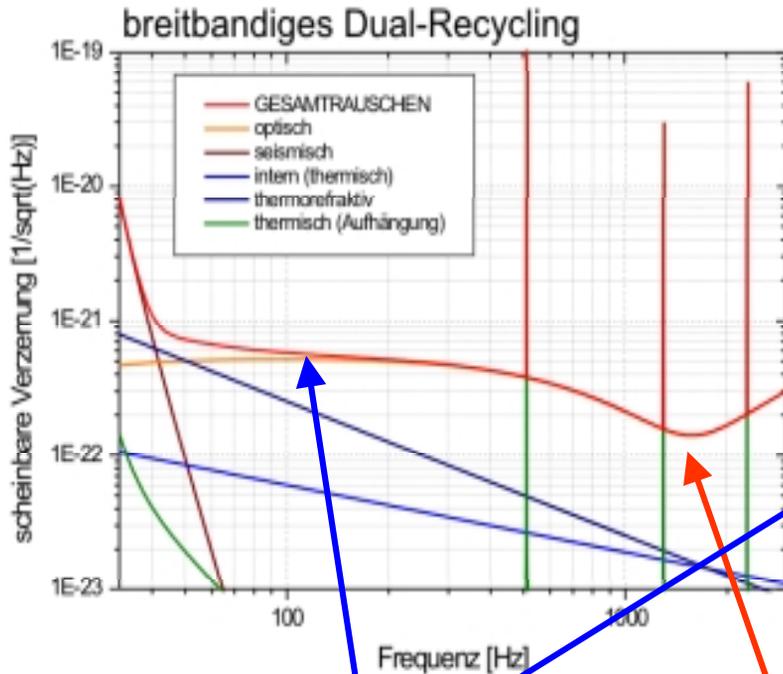
Parameter:  $R_{MSR}=99,8\%$ , detuning = 1,5 kHz



Gut geeignet für Signale mit bekannter Frequenz **und** geringer Frequenzbandbreite.

# Empfindlichkeit von GEO600

(angestrebt)

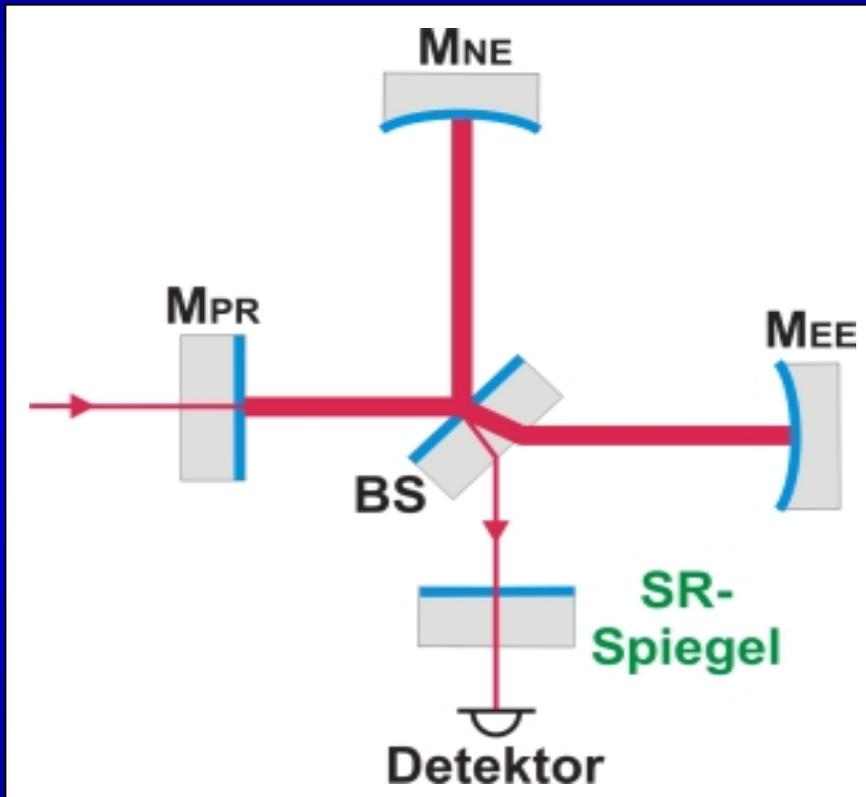


Faktor = 10 bis 20

Faktor = 4

Maximale Empfindlichkeit von etwa:  $3,6 \cdot 10^{-23} \cdot 1/\sqrt{\text{Hz}}$  (@ 1,5 kHz)

# Verschiedene SR-Spiegel (Jukebox)



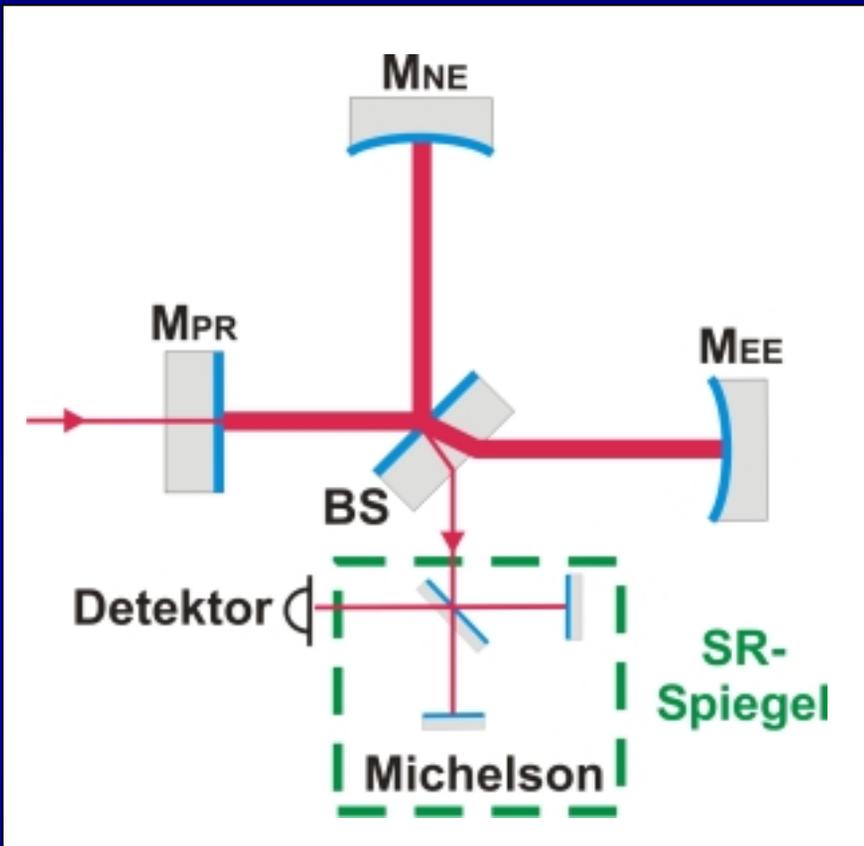
Für jede gewünschte Bandbreite ein herkömmlicher Spiegel mit entsprechender Reflektivität

## Arbeitsschritte zum Spiegeltausch:

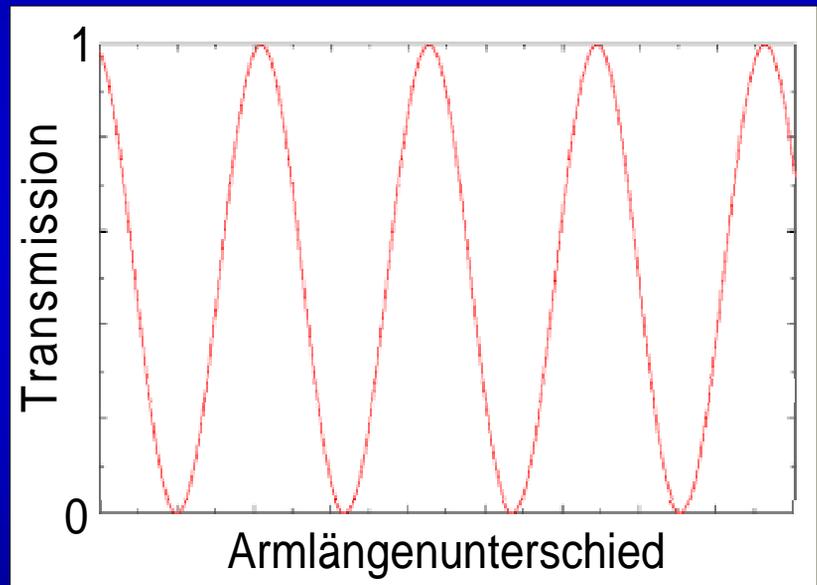
- Belüften des UHV
- Ausbau des alten Spiegels
- Aufhängen des neuen Spiegels
- Positionieren und ausrichten des neuen Spiegels
- Wiederherstellen des UHV

**Nachteil: Lange Ausfallzeiten des Detektors und hohe Kosten.**

# Michelson-Interferometer als SR-Spiegel



Der Armlängenunterschied bestimmt die Transmission des Michelson-Interferometers.

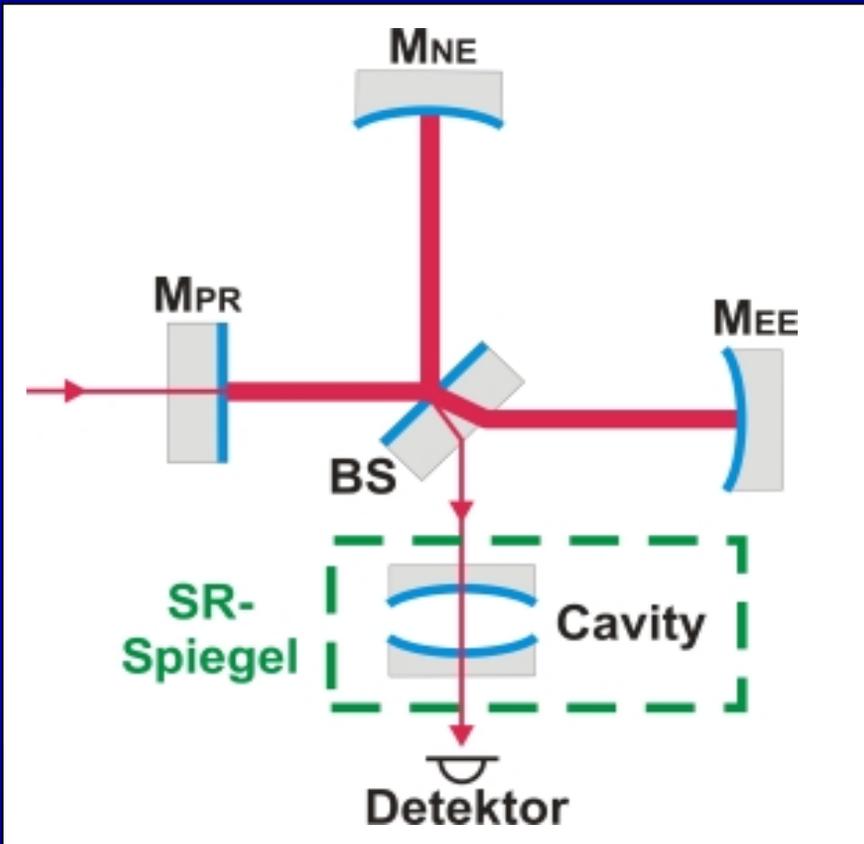


**Nachteil: 3 große optische Komponenten müssen installiert werden.  
(Aufhängungen, Alignment-System)**

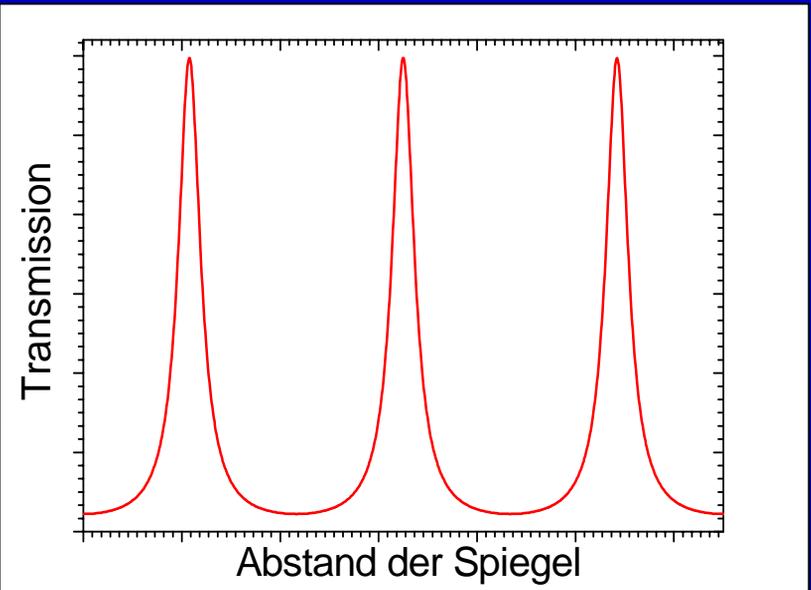
Tischexperiment (30cm), ANU: G.Vine, D.Shaddock and D.McClelland:

,Variable reflectivity signal mirrors and signal response measurements', Class. Quantum Grav. 19 (2002) 1561-1568

# Cavity als SR-Spiegel



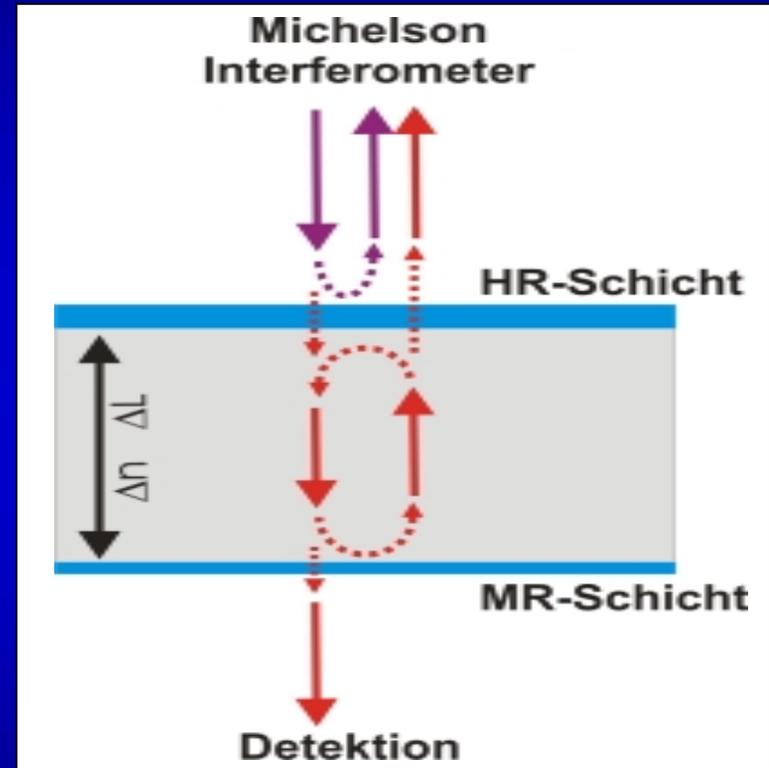
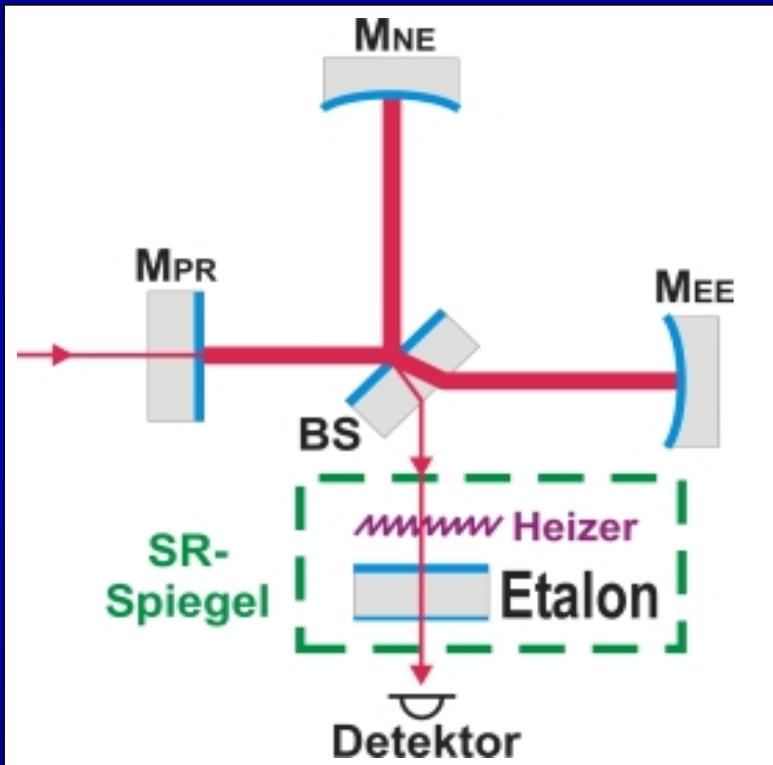
Der Abstand zwischen den beiden Spiegeln bestimmt die Transmission der Cavity.



**Nachteil: 2 große optische Komponenten müssen installiert werden.  
(Aufhängungen, Alignment-System)**

# Etalon als SR-Spiegel

Die Überlagerung der Lichtfelder bestimmt die Transmission des Etalons



## Vorteile:

- Keine Modifikationen von Aufhängung und Alignment-system erforderlich
- Kein zusätzliches Rauschen im Bereich der Signalfrequenzen



# Thermisches Durchstimmen eines Etalons

## Thermo-optischer Effekt

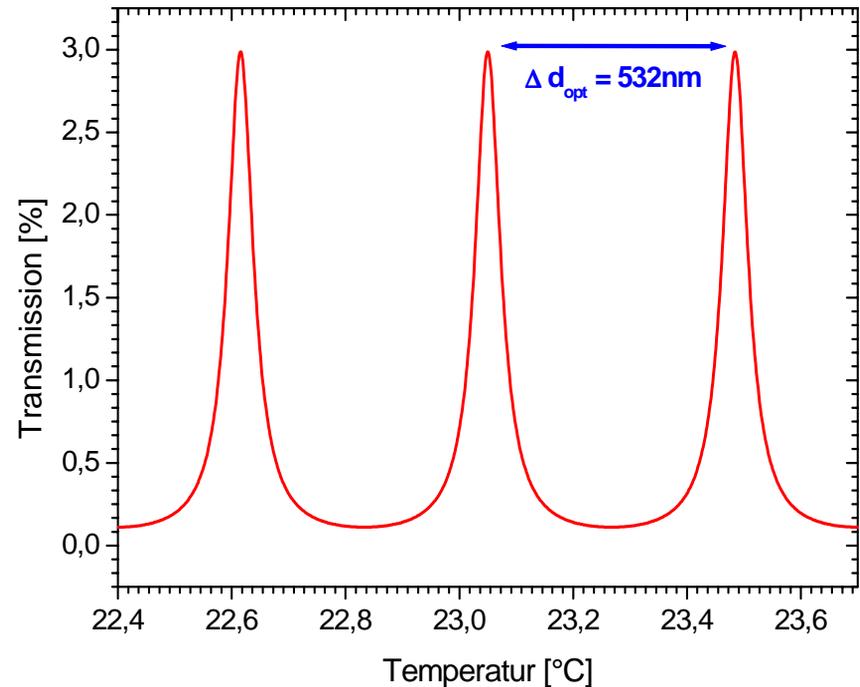
$$\frac{dn}{dT} = 10,9 * 10^{-6} / ^\circ C$$

## Thermoelastische Expansion

$$\frac{dL}{dT} = 0,51 * 10^{-6} / ^\circ C$$

## Elasto-optischer Effekt

vernachlässigbar



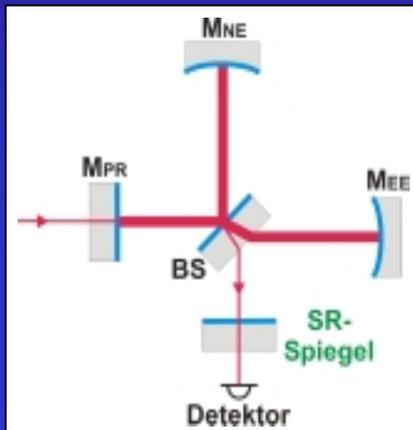
**AIRY-Funktion** 
$$\frac{I_T}{I_0} = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)V}{(1 - \sqrt{R_1 R_2} V)^2 + (4\sqrt{R_1 R_2} V) \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} nL\right)}$$
 **0,43°C / FSR**



# Möglichkeiten für Variation der Reflektivität eines SR-Spiegels

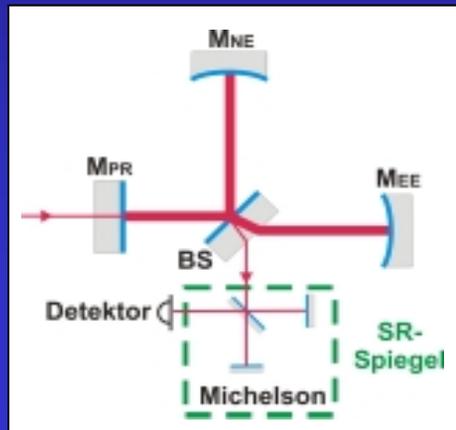
## Jukebox

- extrem zeitaufwendig
- Ausfallzeiten des Detektors



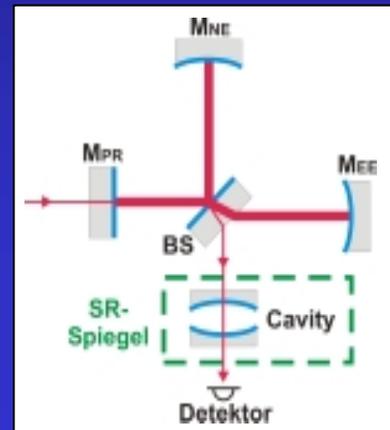
## Michelson Interferometer

- SR-Tuning über common-mode
- SR-Bandbreite über differential-mode



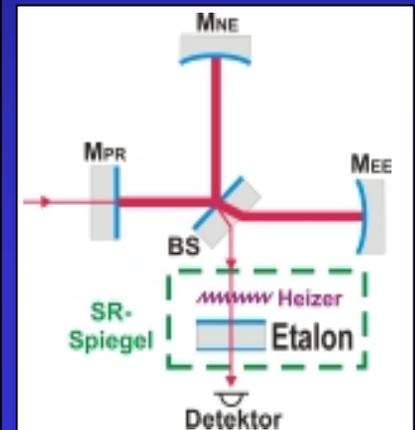
## Cavity

- SR-Tuning über common-mode
- SR-Bandbreite über differential-mode



## Etalon

- SR-Tuning über Etalonposition
- SR-Bandbreite über Temperatur



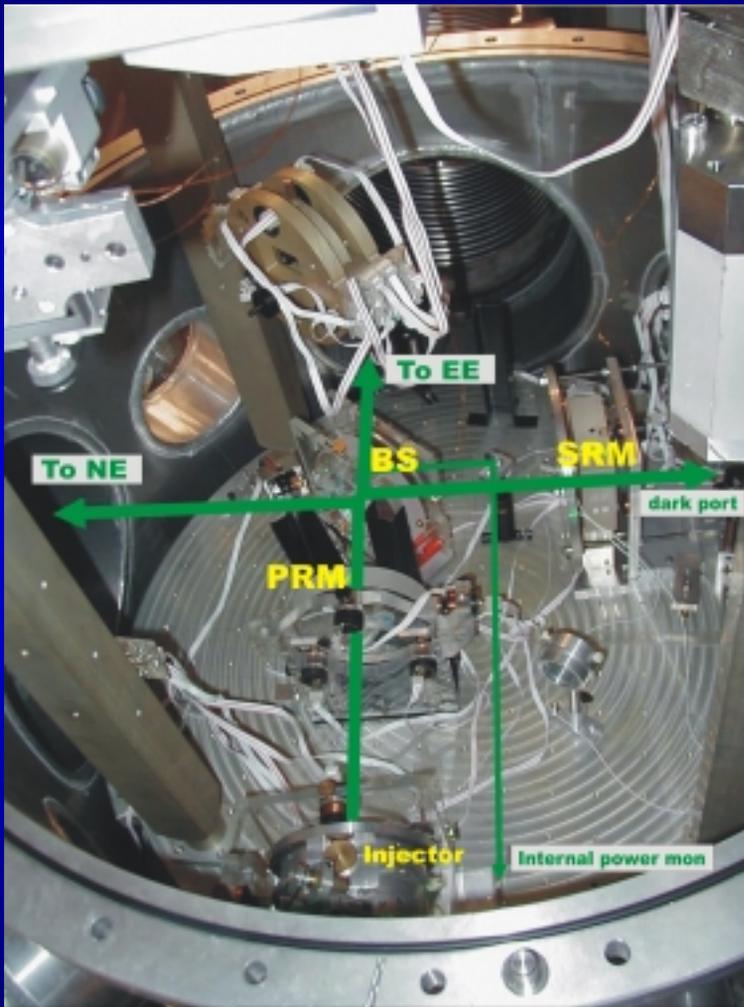
# Der Garching 12m-Prototyp



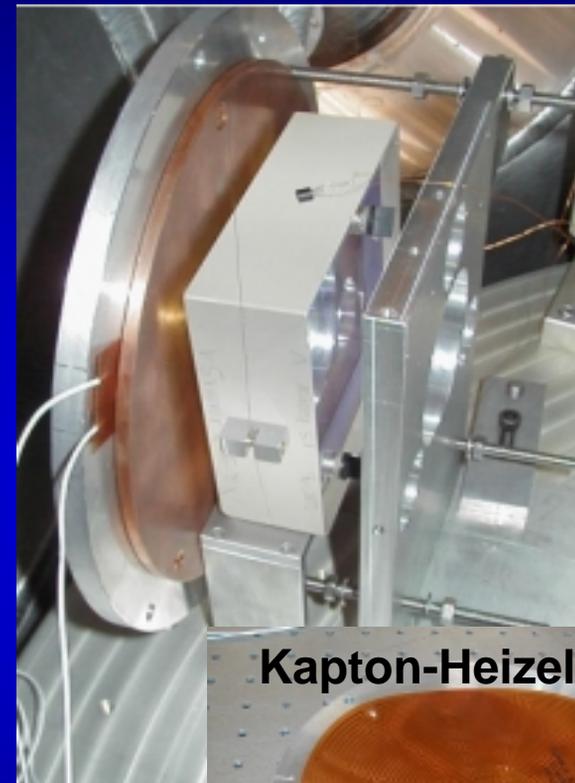
- Interferometer mit Dual-Recycling
- Ar<sup>+</sup>-Ionen Laser
- Optiken als (Doppel-)Pendel aufgehängt
- PR-gain  $\approx 45$
- SR-gain: 2 - 30



# Das Prototyp Interferometer



Blick in den Zentraltank



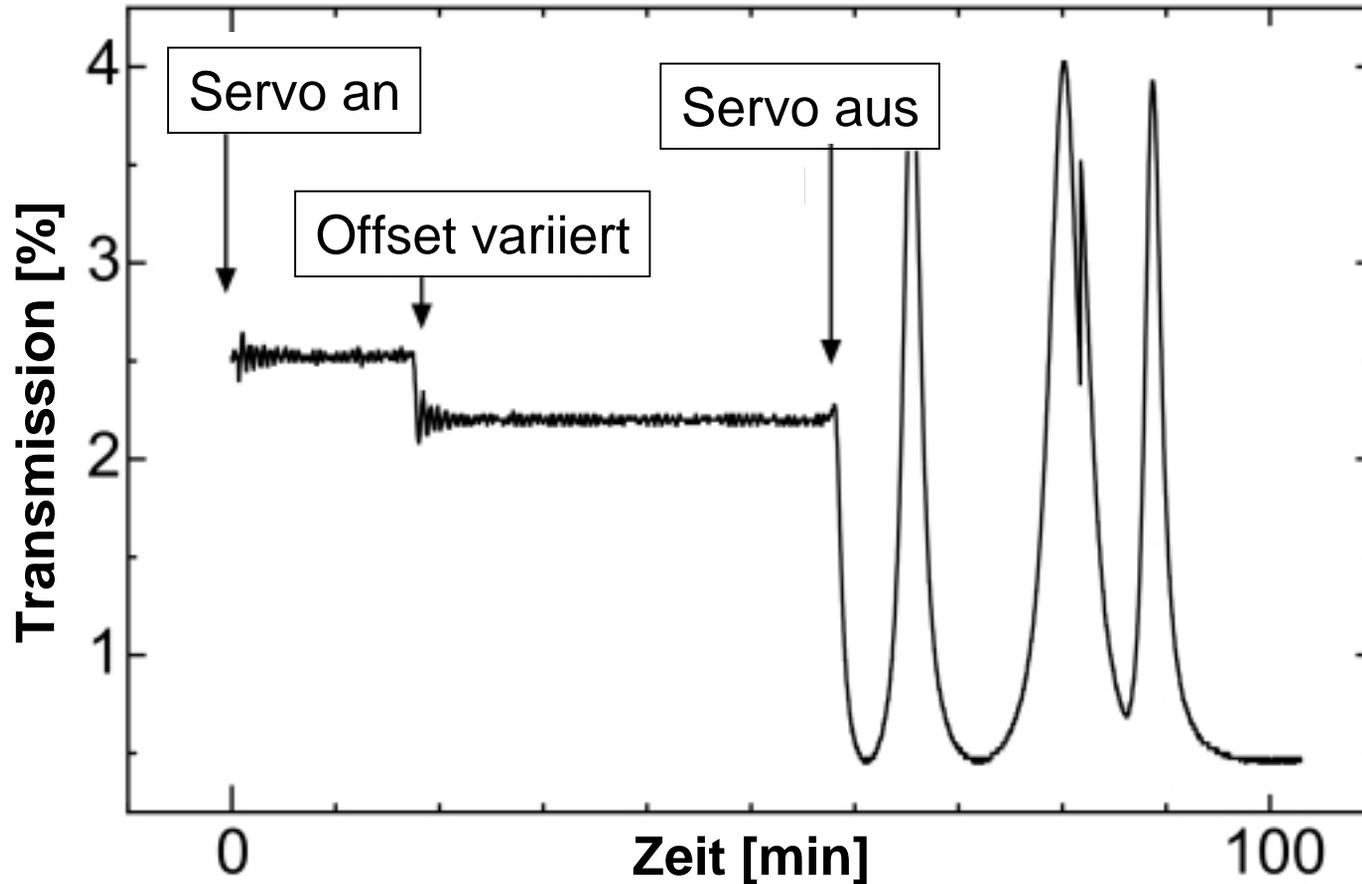
Kapton-Heizelement



SR-Etalon mit Heater

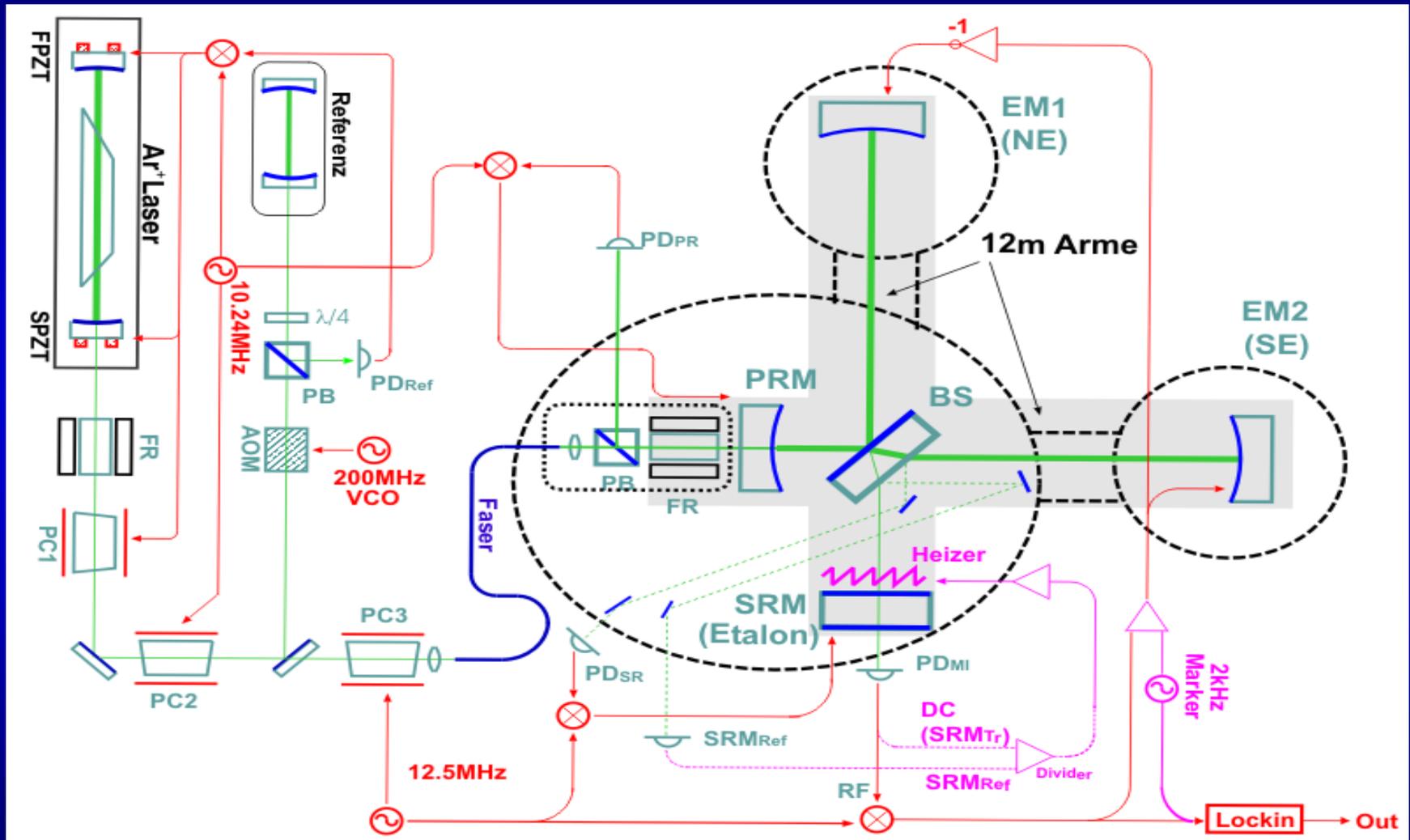


## Transmissionsregelung des SR-Etalons



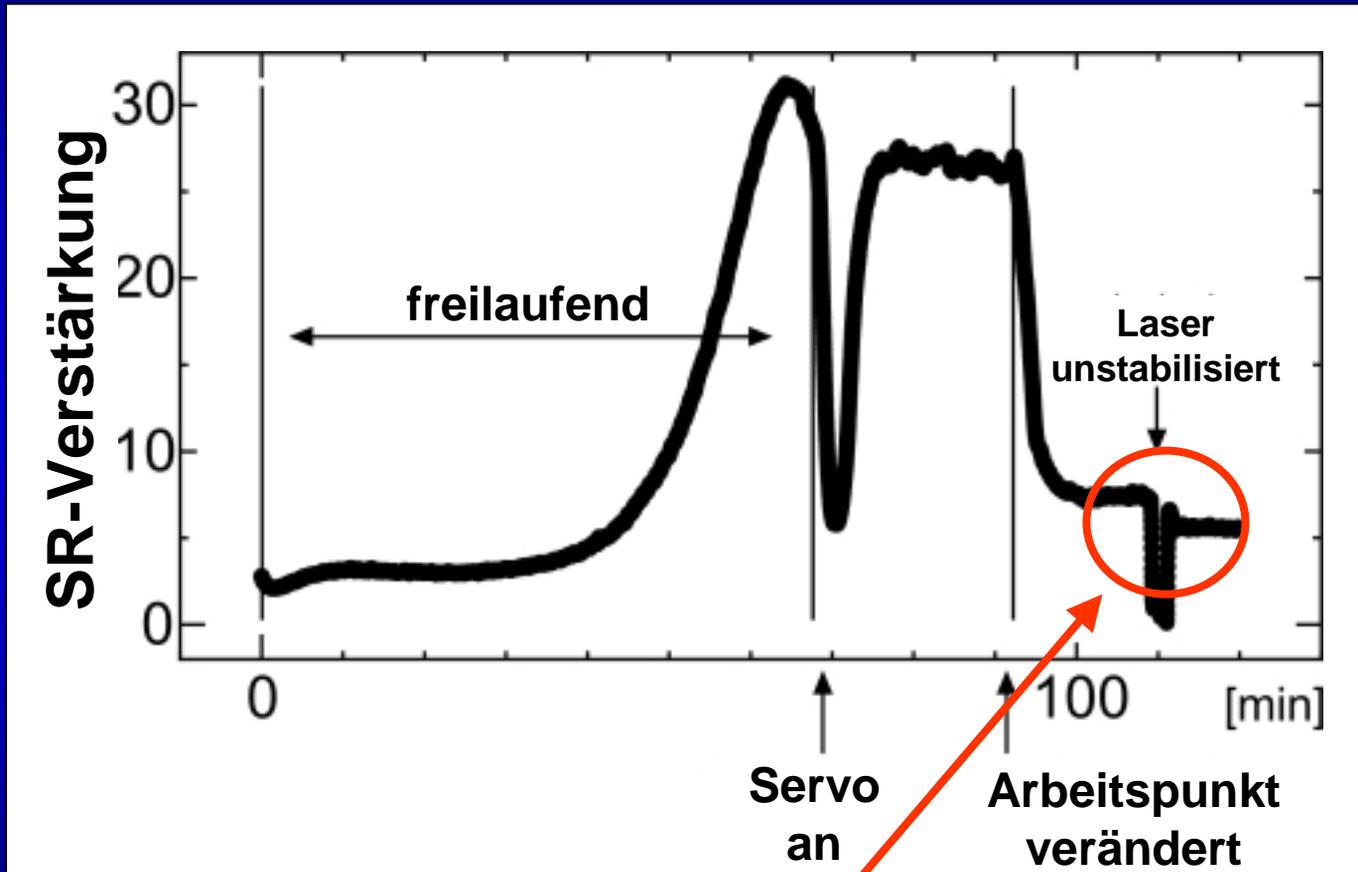
- Regelzeitkonstante von 110 Sekunden
- Verbleibende Transmissionsschwankungen ca. 0,02 % rms

# Kontrollschema (1) des 12m-Prototypen



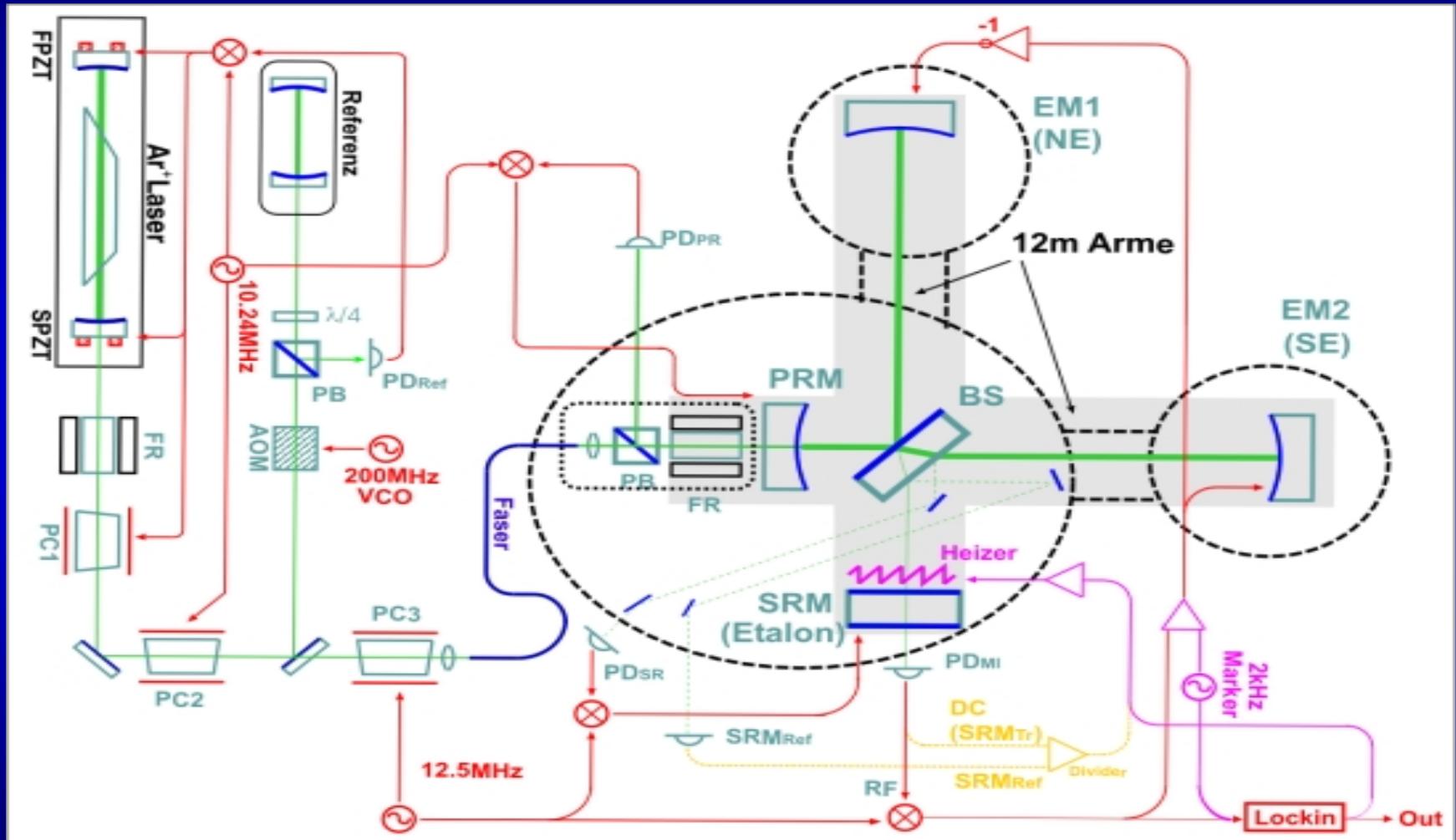
Regelgröße: Transmission des SR-Etalons

# Einstellbare SR-Verstärkung (1)



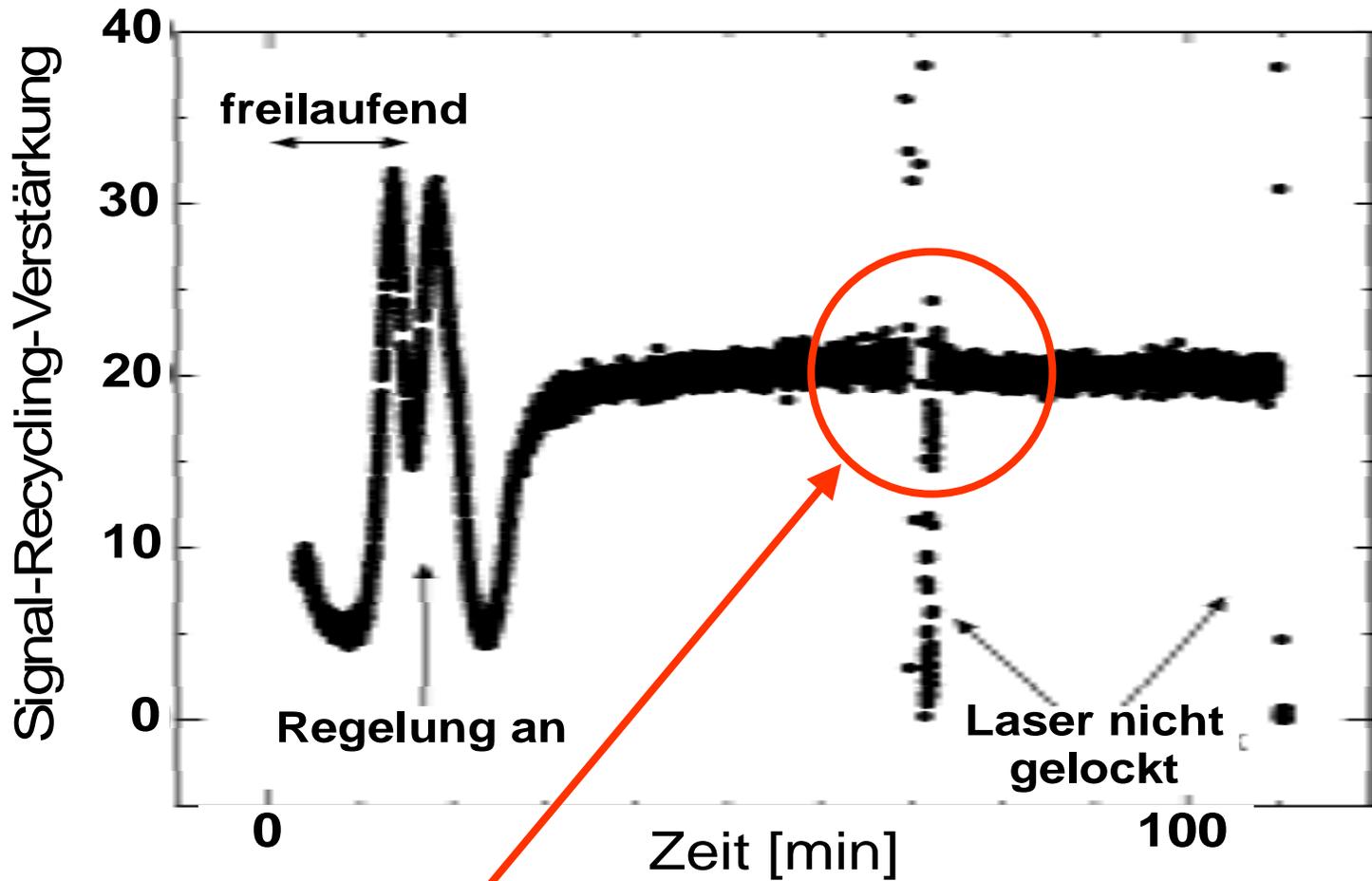
Problem: Nach Re-Lock veränderte SR-Verstärkung

# Kontrollschema (2) des 12m-Prototypen



Regelgröße: Signal-Recycling-Gain

# Einstellbare SR-Verstärkung (2)



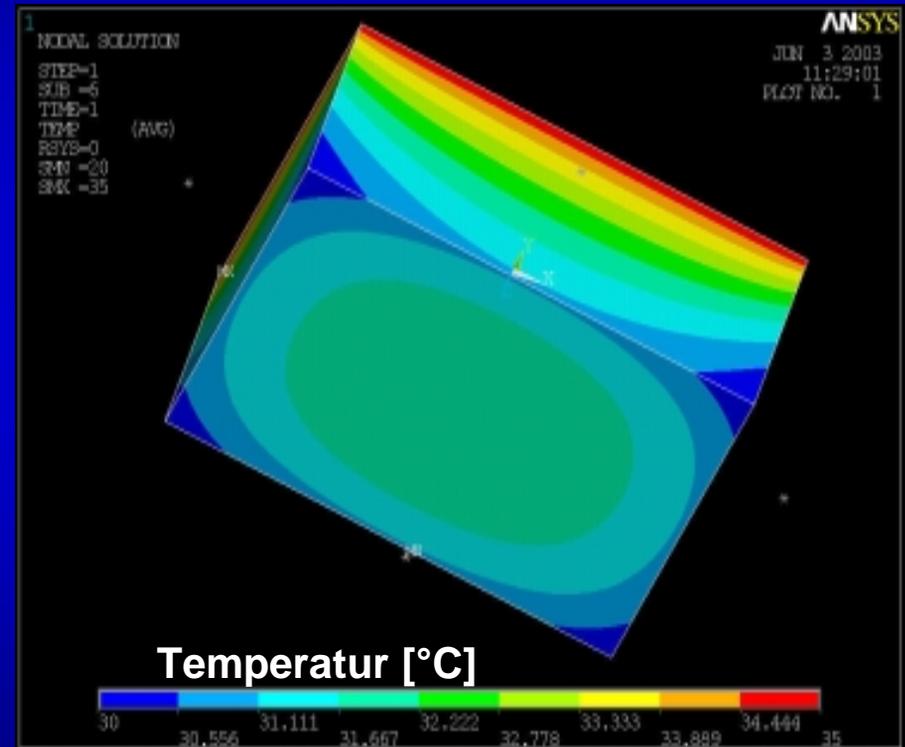
Nach Re-Lock identische SR-Verstärkung



# Offene Fragen in Bezug auf GEO600

- Entwicklung von Strahlungsheizquellen für UHV
  - Kaptonheizer (wie am Prototyp verwendet) für GEO ungeeignet
- Homogenität der Reflektivität über den Strahlquerschnitt
  - Strahldurchmesser GEO/Prototyp nicht vergleichbar
  - Thermische Umgebung bei GEO600
  - Ausprägung einer „Thermische Linse“

Etalon in Garching: Suprasil, 150 x 150 x 50



# Anforderungen an eine Heizquelle (1)

- Anpassung an Absorptionsspektrum von Suprasil
- Totale Absorption im Substrat für Wellenlänge  $> 4,5\mu\text{m}$
- Heater sollte bei 500 bis 600 K betrieben werden.

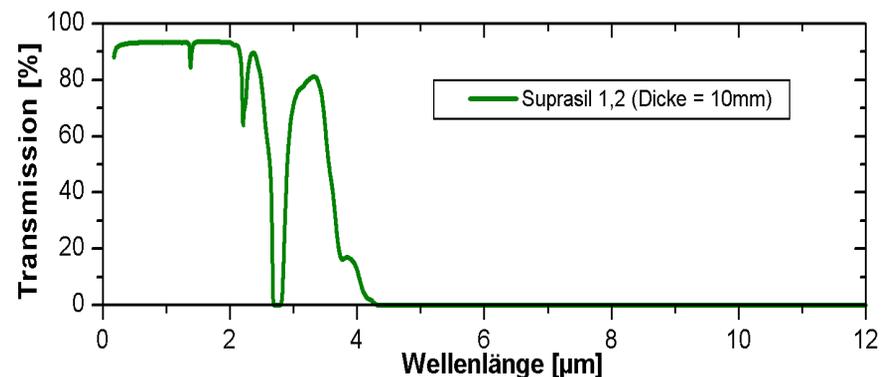
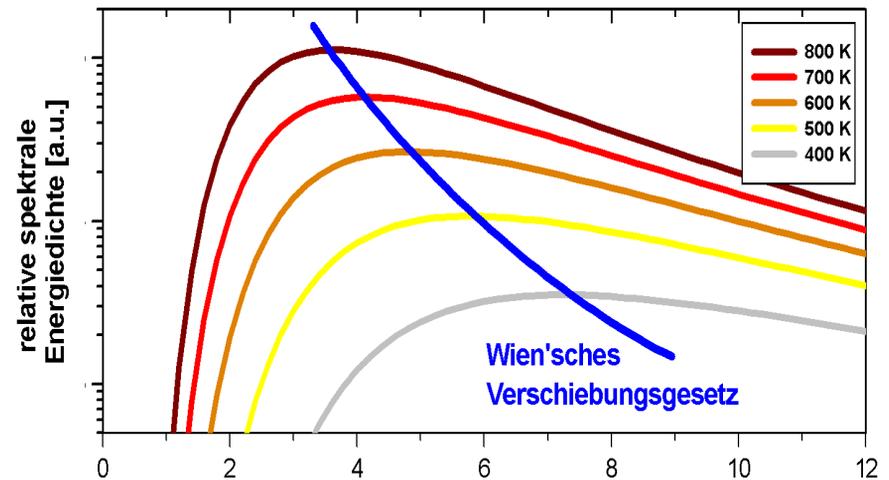
*Plancksches Strahlungsgesetz*

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1} d\nu$$

*Wien'sches Verschiebungsgesetz*

$$\nu_{\text{max}} = \frac{2,82k}{h} T$$

## Schwarzkörperstrahlung



## Spektrale Absorption von Suprasil

# Anforderungen an eine Heizquelle (2)

- **UHV tauglich**

*Verwendung von ausschließlich uhv-tauglichen Materialien / Komponenten*

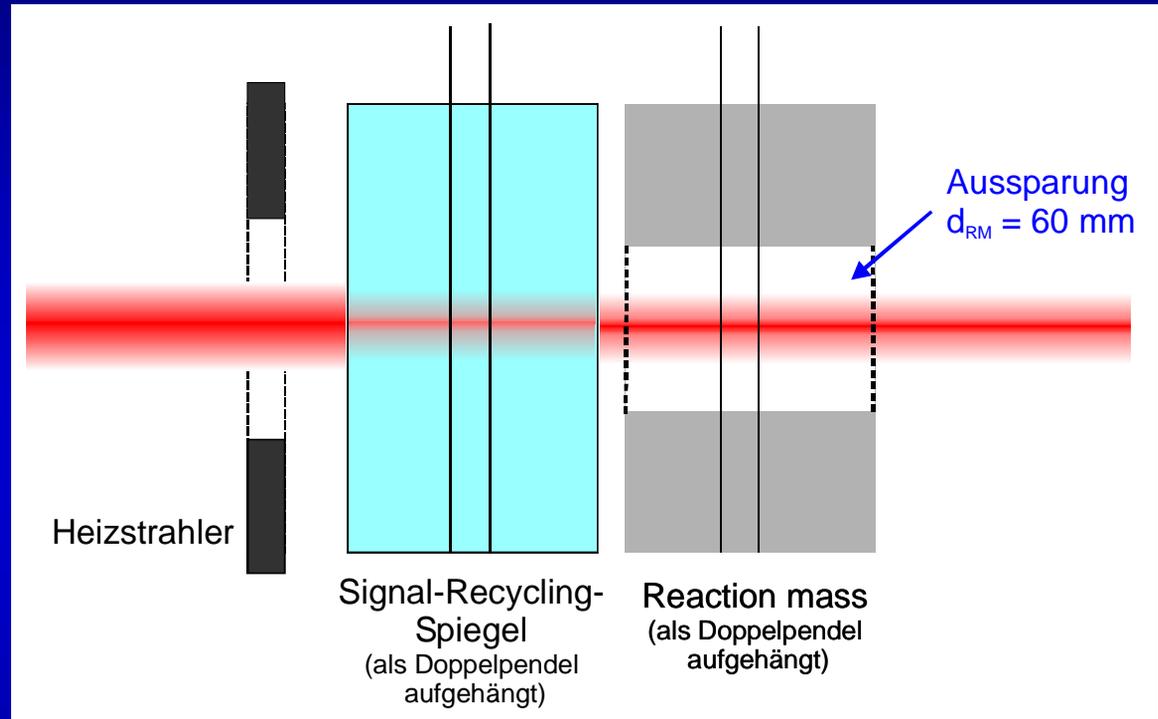
- **Hohe Leistung**

*Benötigte Leistung = 30 bis 50 Watt bei möglichst geringer Wärmekapazität*

- **Angepassten Geometrie**

**⇒ möglichst homogene Aufheizung**

- *Anpassung an GEO-Spezifikationen*
- *Magnetfeldkompensation*



# Konzept für Heater

Von der Heizquelle  
abgestrahlte Leistung

$$P_{Heater} = \frac{\rho l}{A} I^2$$

Nutzung von Material mit hohem  
spezifischen Widerstand  $\Rightarrow$  **Edelstahl**

Material	Spez Widerstand [ $10^{-8} \Omega m$ ]
Silber	1,6
Gold	2,7
Konstantan	$\approx 55$
Edelstahl	$\approx 80$

## Verwendete Materialien:

- **Edelstahlfolie**

*Dicke 50 oder 100  $\mu m$*

- **Duran**

*$\alpha = 3,3 \cdot 10^{-6} /K$*

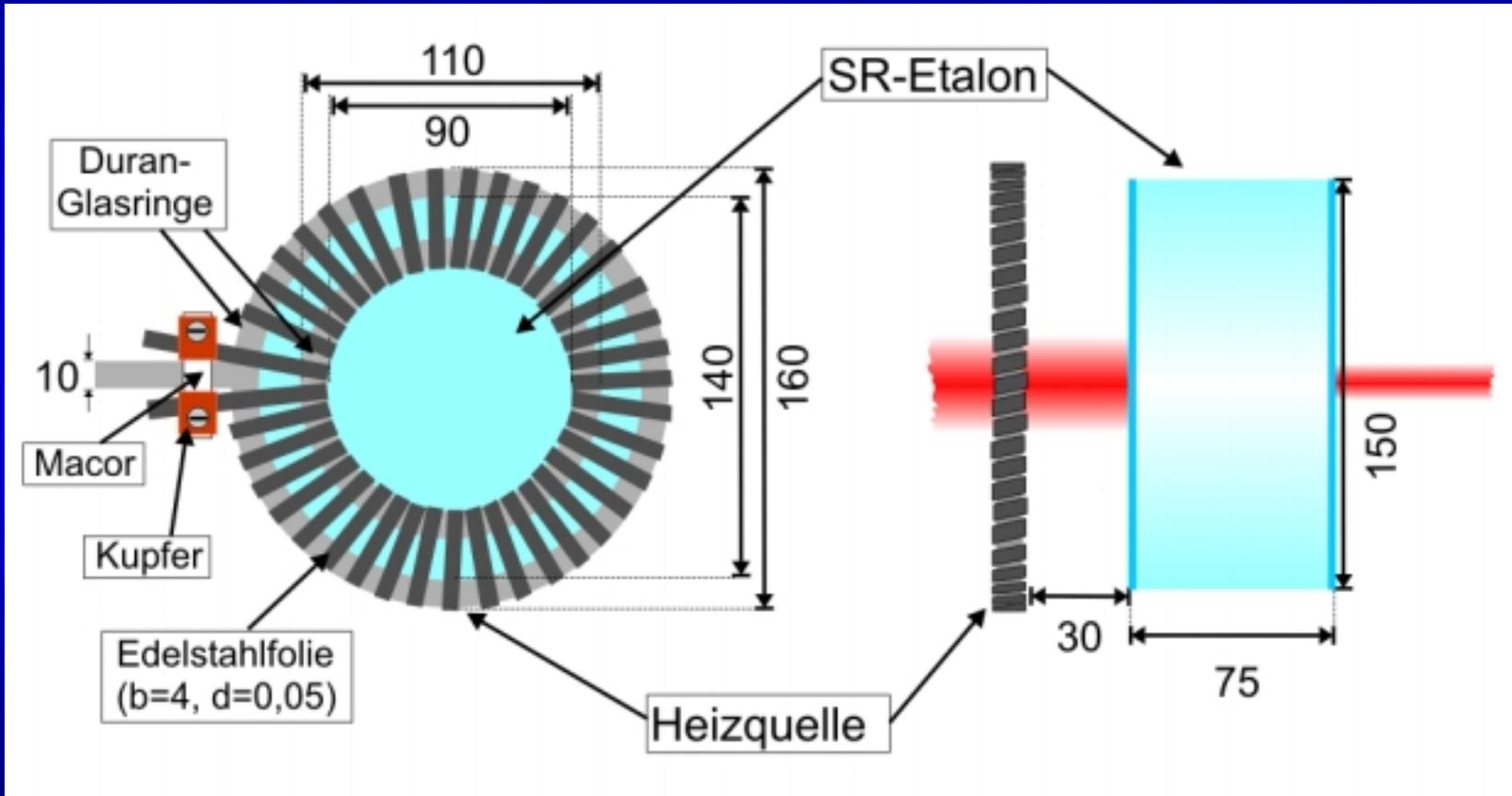
- **Macor**

- **Kupfer**



# Ring-Heizer

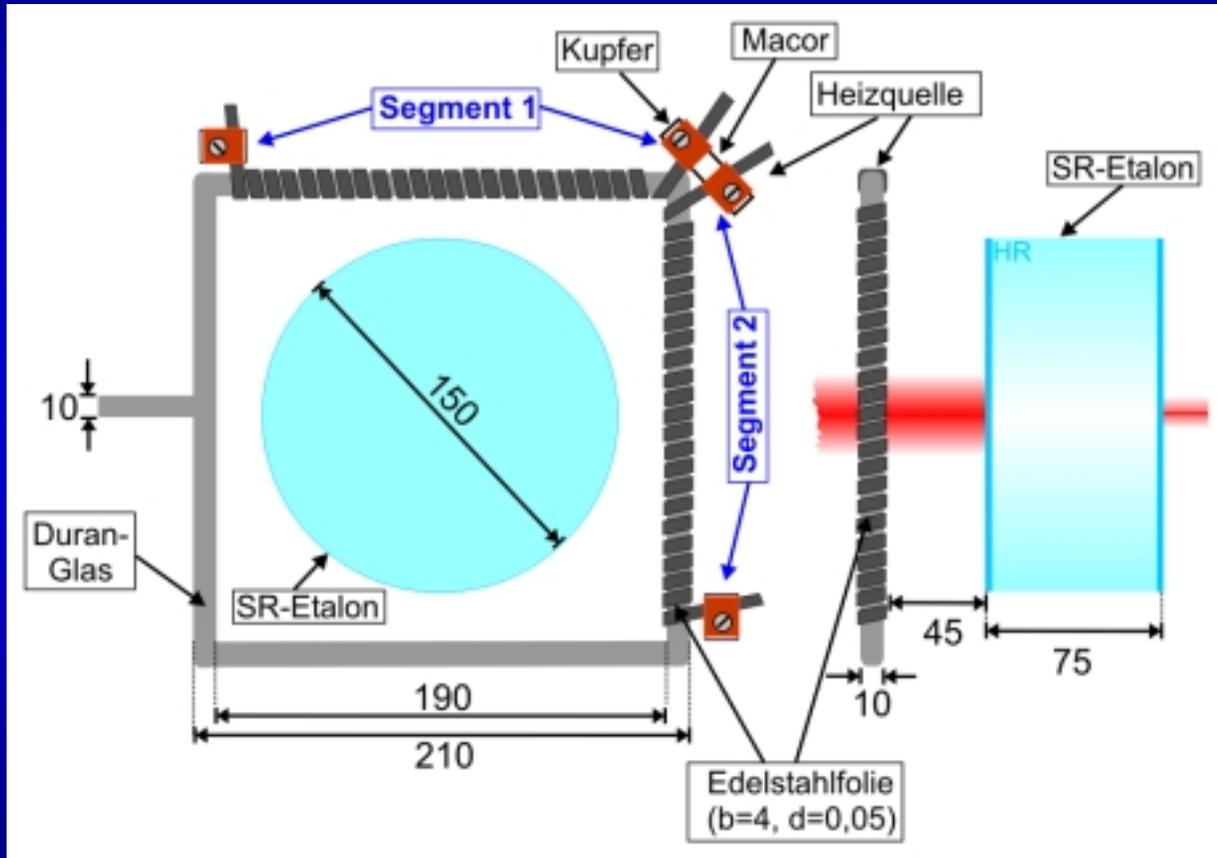
Ringheizer dient zum homogenen Aufheizen eines Spiegels



- Länge des Edelstahlstreifens = 5m  $\Rightarrow R = 18,5 \Omega$
- Hohe Leistung von etwa 70 Watt bei 2 Ampere

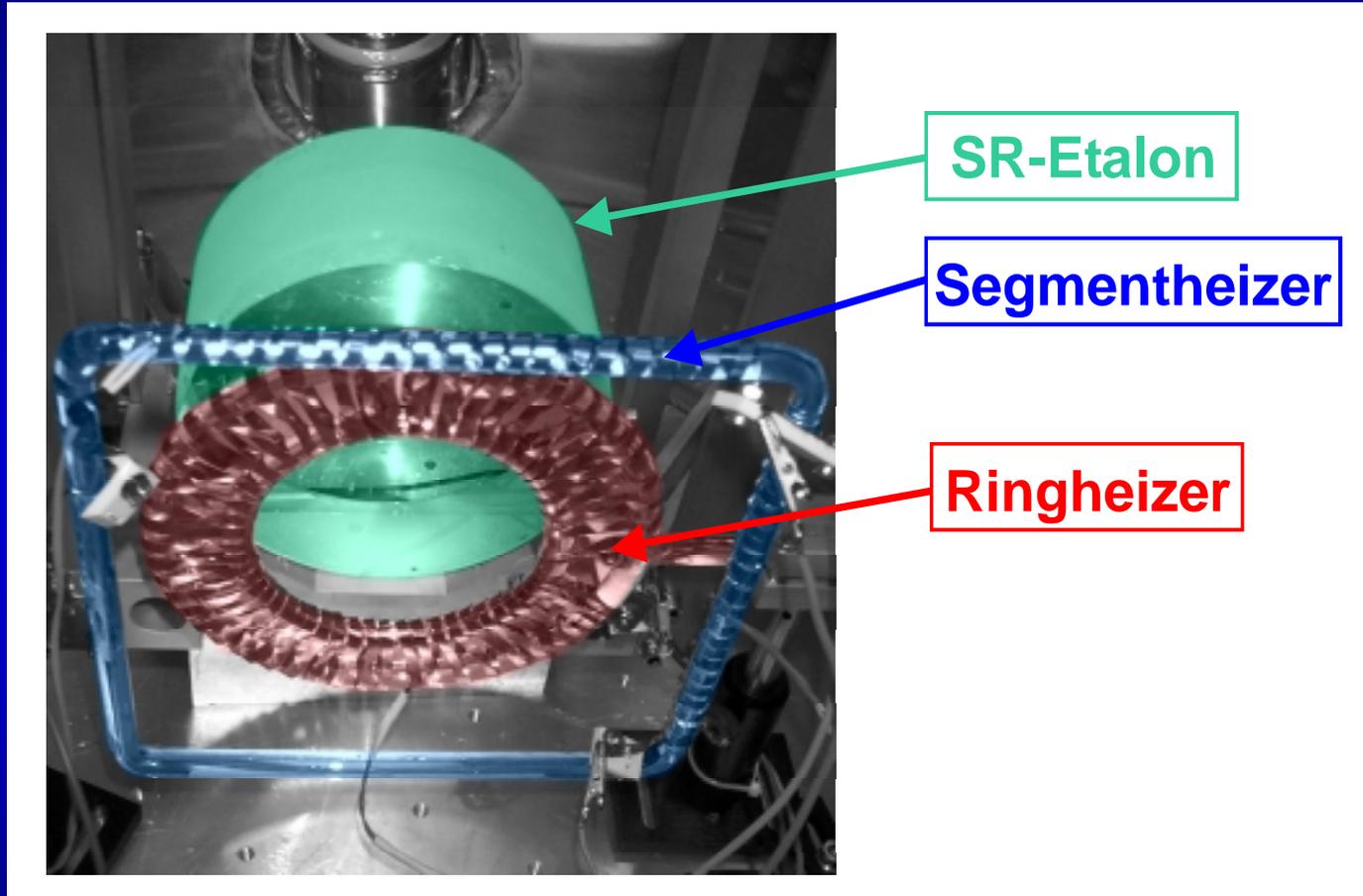
# Segment-Heizer

Segmentheizer dient zum assymmetrischen Aufheizen eines Spiegels



- 4 separate Heizelemente (einzeln ansteuerbar)
- geringe Leistung

# Einsatz im Labor



- Ringheizer: Erwärmt gesamtes Etalon auf deutlich über Raumtemperatur
- Segmenttheizer: Korrektur einer inhomogenen Temperaturverteilung

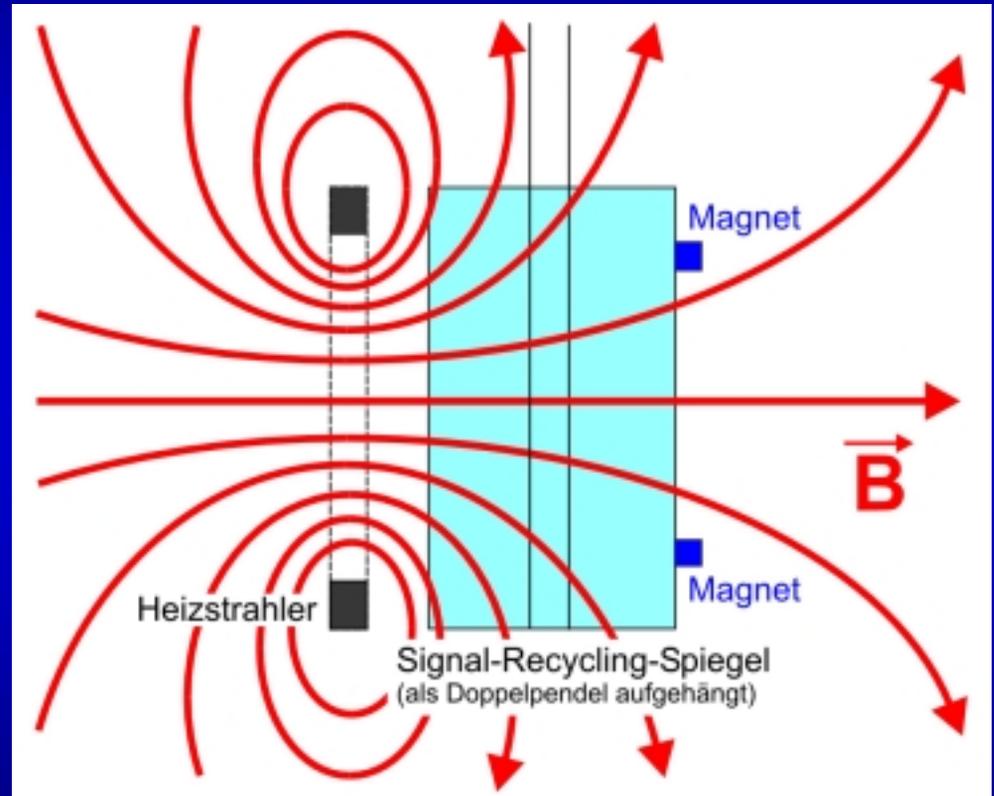
# Magnetfeld der Strahlungsheizquelle

- Ringheizer ist eine einfache Stromschleife
- Kraft auf die Dauermagnete ist abhängig vom Magnetfeldgradienten:

$$F_i = p_m \frac{\delta B_i}{\delta i}$$

- Konstanter Magnetfeldgradient: kein Problem
- **ABER PROBLEM:** Variation des Magnetfeldgradienten!

- *Ankopplung des Heaters an Seismik*
- *Variation des Stroms durch den Heater*



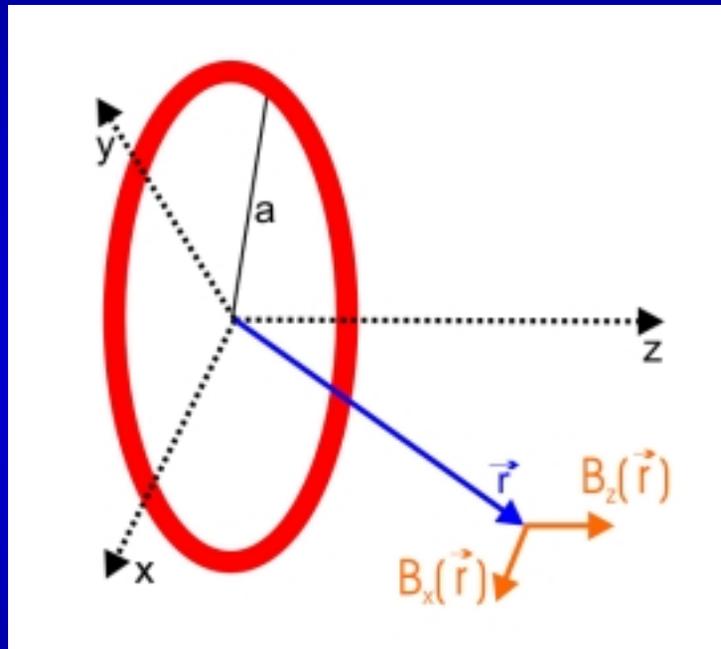
# Auswirkung des Heaters auf MSR-Position

- Betrachte ausschließlich Spiegelbewegung in z-Richtung
- Komplette Berechnung ist konservativ !!
- Messung der entsprechenden Magnetfeldgradienten
- Berechnung der Kraftvariation auf die Spiegelmagnete:

$$\text{Seismik: } \Delta F = p_m \frac{\delta^2 B_z}{\delta^2 i^2} \Delta z \approx 2 \cdot 10^{-14} \frac{N}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

$$\text{Strom: } \Delta F = p_m \frac{\delta \left( \frac{\delta B_z}{\delta z} \right)}{\delta I} \Delta I \approx 1,5 \cdot 10^{-15} \frac{N}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

- Berechnung einer resultierenden Spiegelauslenkung:
- Umrechnung der Spiegelauslenkung in scheinbare Verzerrung

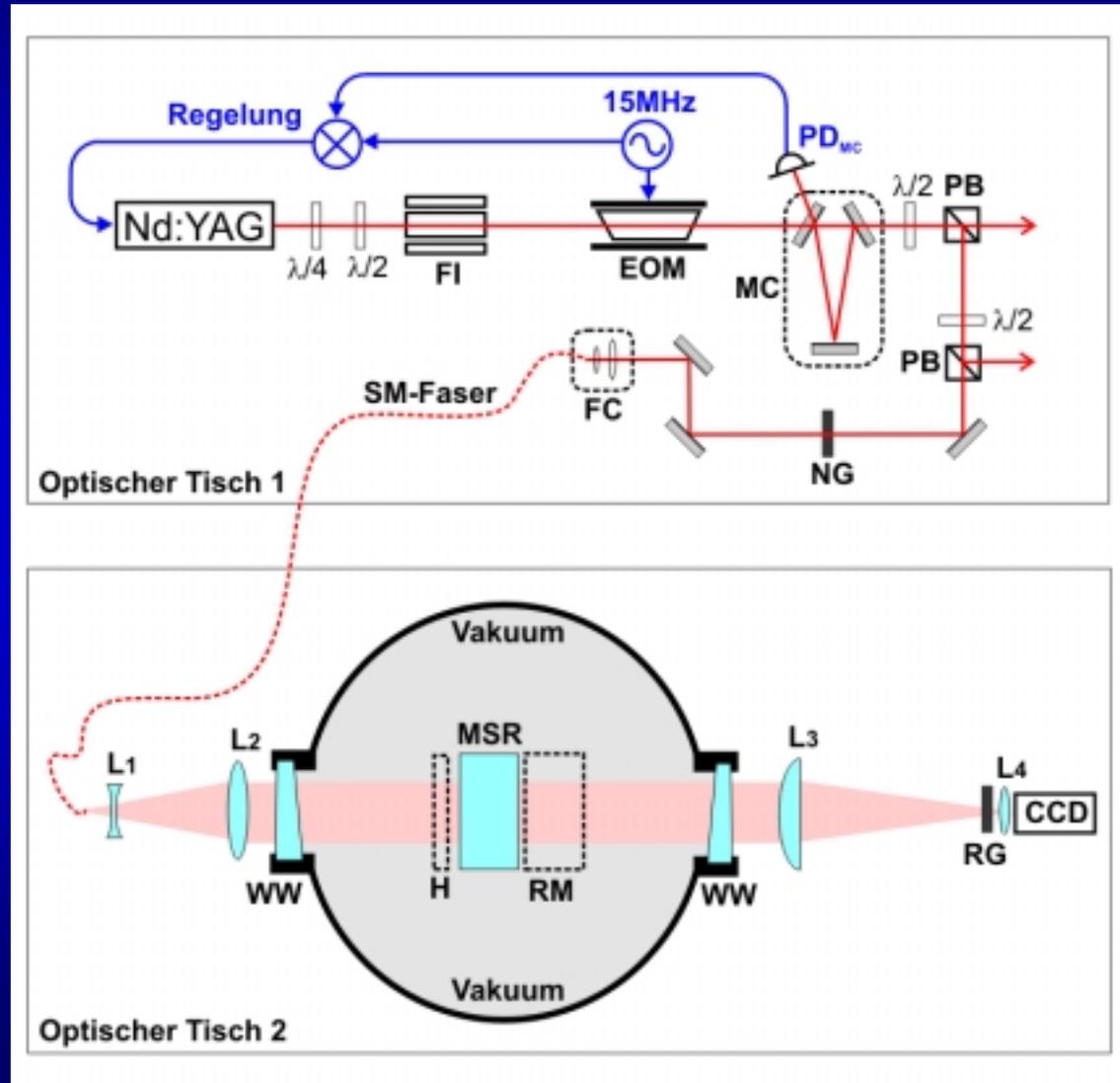


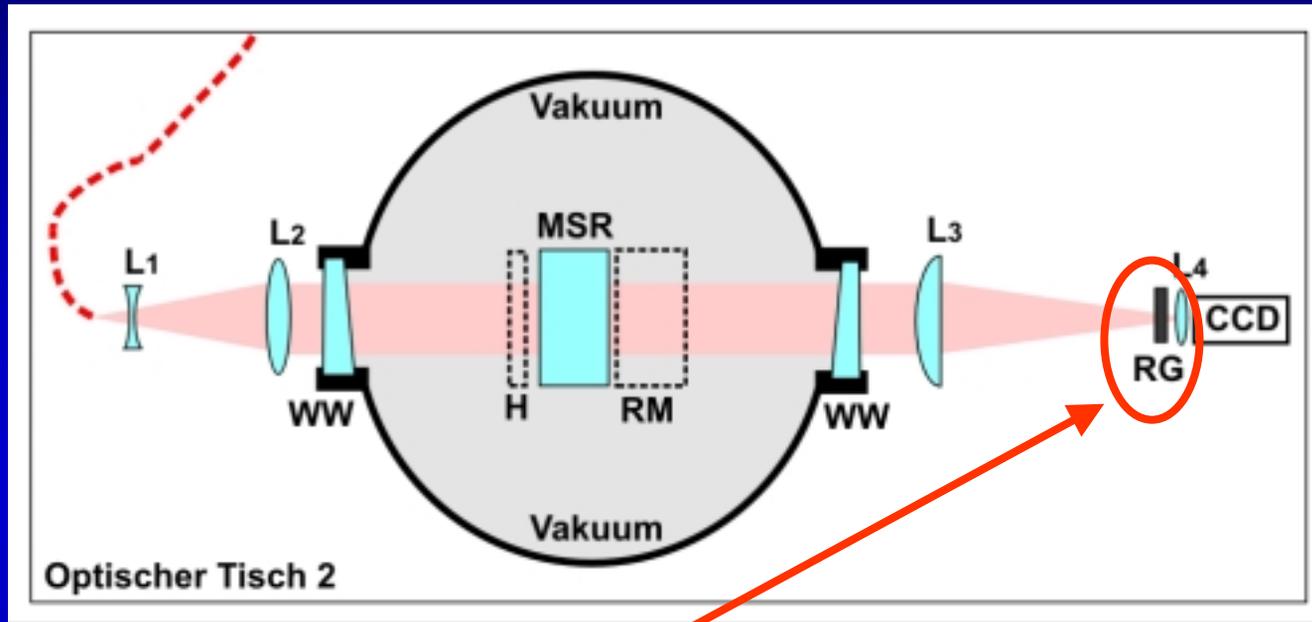
$$\Delta z_{\max} \approx 8 \cdot 10^{-20} \frac{m}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

$$h = \frac{C_{\text{int}} \Delta z_{\max}}{Nl} \approx 3,3 \cdot 10^{-24} \frac{m}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

# Optischer Aufbau des Experiments

- Experiment zur Untersuchung der lateralen Transmissionsverteilung eines Spiegels.
- Untersuchung über einen Durchmesser von 80 mm.
  - Erzeugung eines „großen“ kollimierten Laserstrahls
  - Abbildung mit einer CCD-Kamera
- Aufbau in einer GEO600-ähnlichen thermischen Umgebung





## Großer Strahldurchmesser bedeutet:

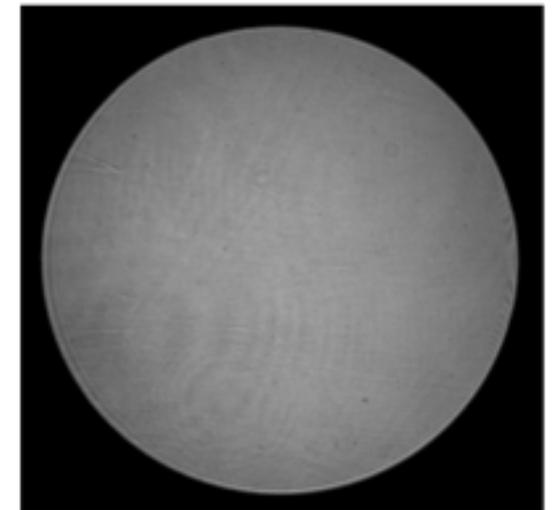
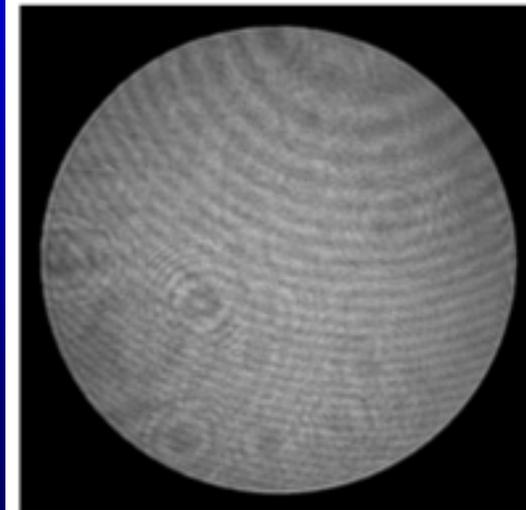
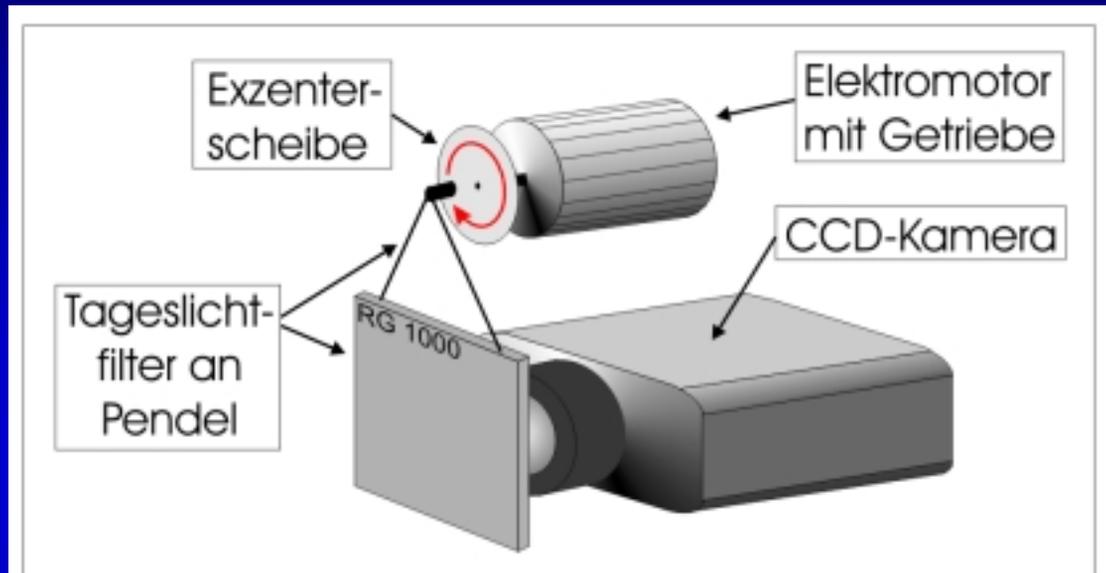
- **Interferenz**
- Beugung
- Streuung

## Gegenmaßnahmen

- AR-Coatings
- Optiken mit Keil

# Der Trick mit dem „bewegten Filter“

- Einsatz eines Tageslichtfilters (RG1000) unumgänglich, da CCD-Chip aus Silizium.
- Der Filter wird leicht bewegt und verkippt. (Filter ist als Pendel an der Exzenter Scheibe eines Elektromotors aufgehängt)
- Durch Mittelung über einige hundert CCD-Aufnahmen lassen sich Störmuster herausfiltern.





# CCD-Kamera und Grabbersystem

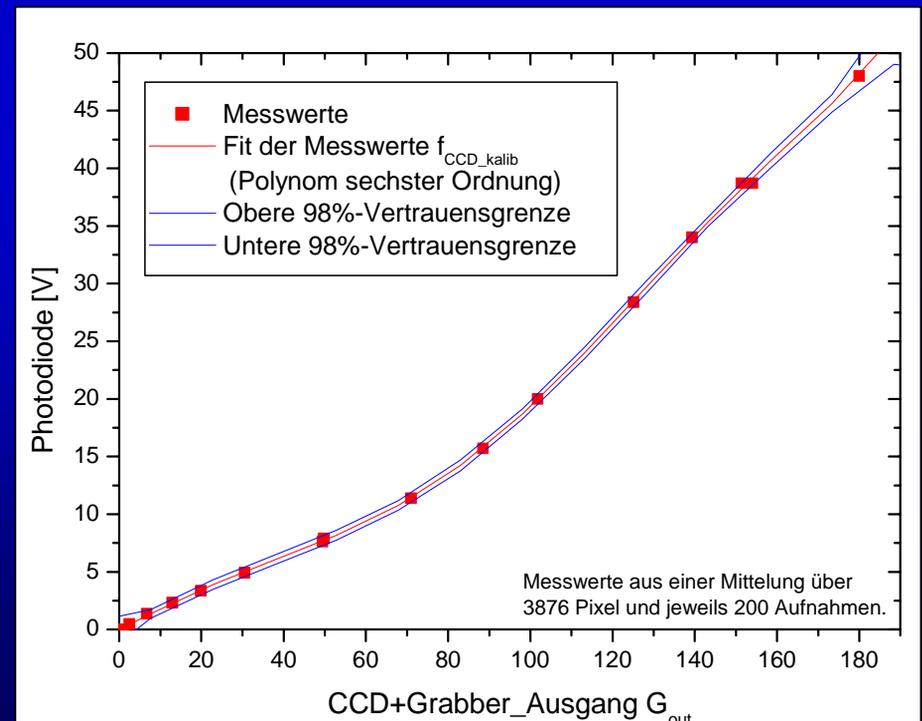
- **Homogenität des CCD-Chips / PRNU (Photoresponse Nonuniformity)**
- **Linearität der Empfindlichkeit**  
(gemessen mit Photodiode und mit NG-Filtern)



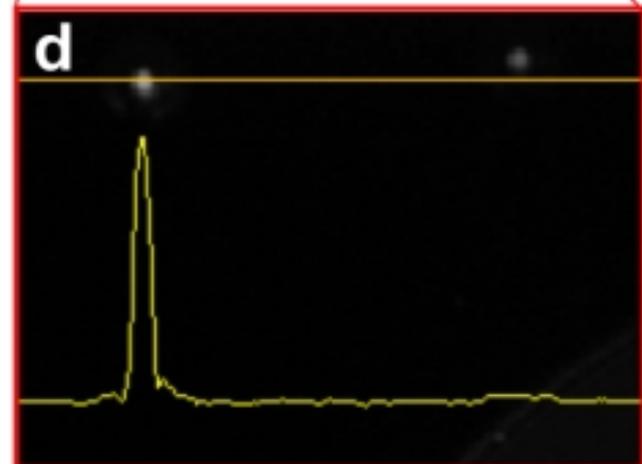
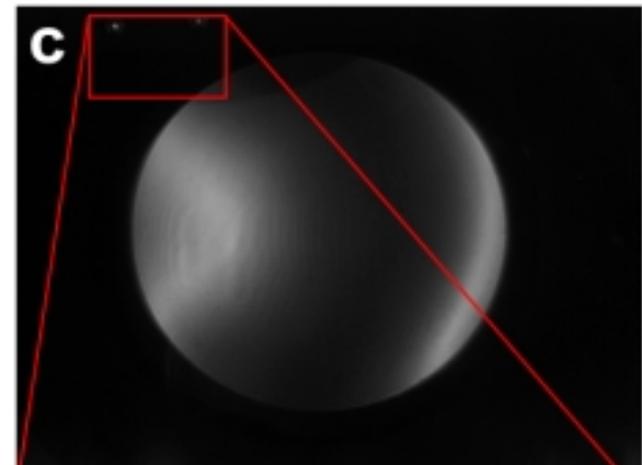
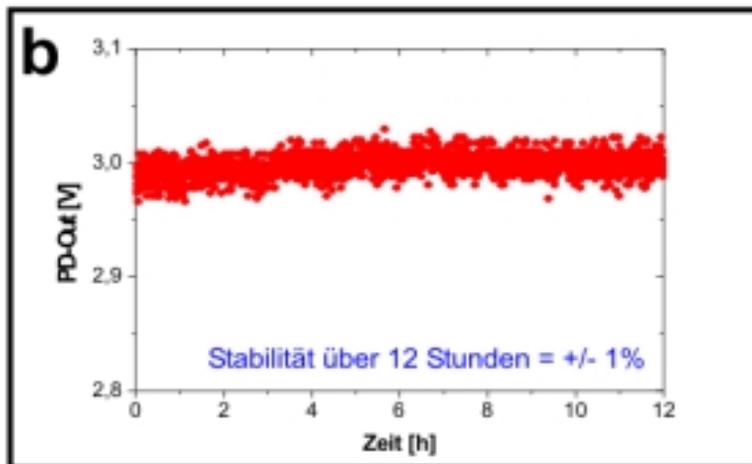
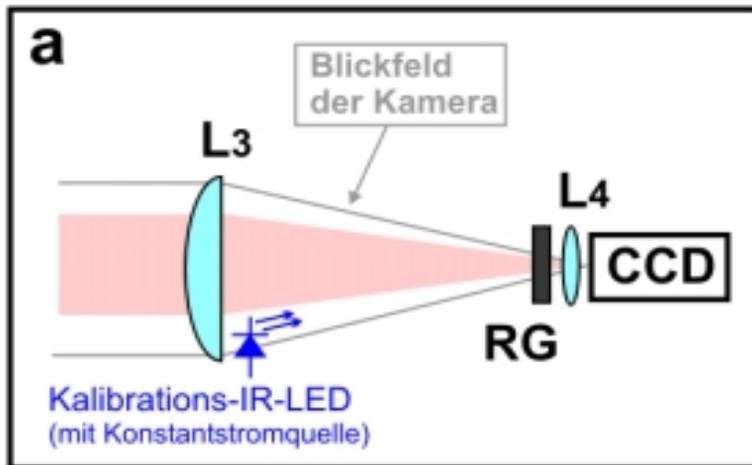
Aufgrund der nicht linearen Empfindlichkeit kann vom Ausgabewert nicht auf die Lichtintensität am CCD-Chip zurückgeschlossen werden!

Daher Bearbeitung jedes einzelnen Pixels mit einer Kalibrationsfunktion (Polynom 6. Ordnung)

$$I_{CCDin}(G_{out}) = -0,03337 + 0,18292 \cdot G_{out} + 2,83169 \cdot 10^{-4} \cdot G_{out}^2 - 5,18723 \cdot 10^{-5} \cdot G_{out}^3 + 9,74365 \cdot 10^{-7} \cdot G_{out}^4 - 5,92140 \cdot 10^{-9} \cdot G_{out}^5 + 1,18921 \cdot 10^{-11} \cdot G_{out}^6$$

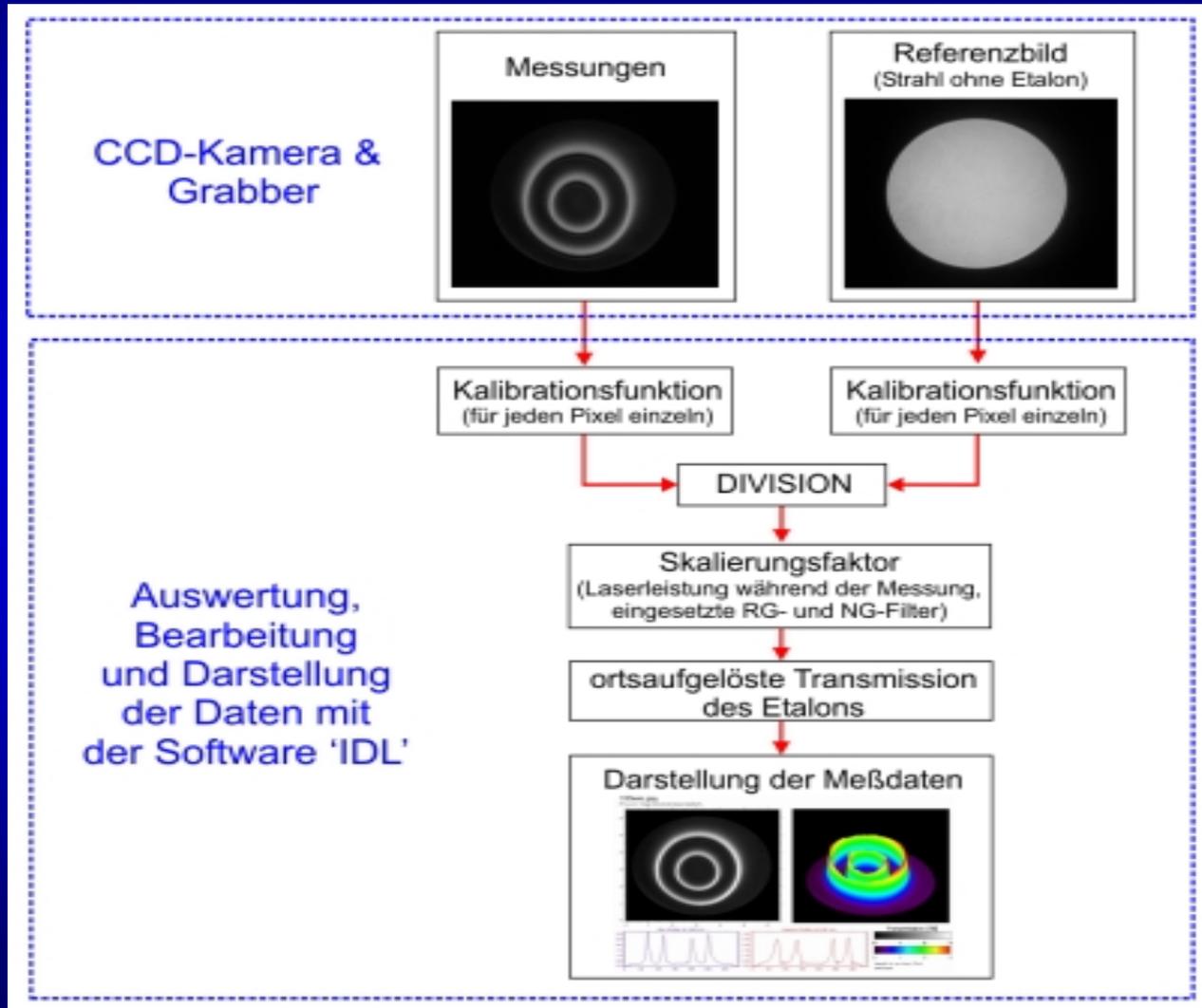


# Kalibrations-LEDs



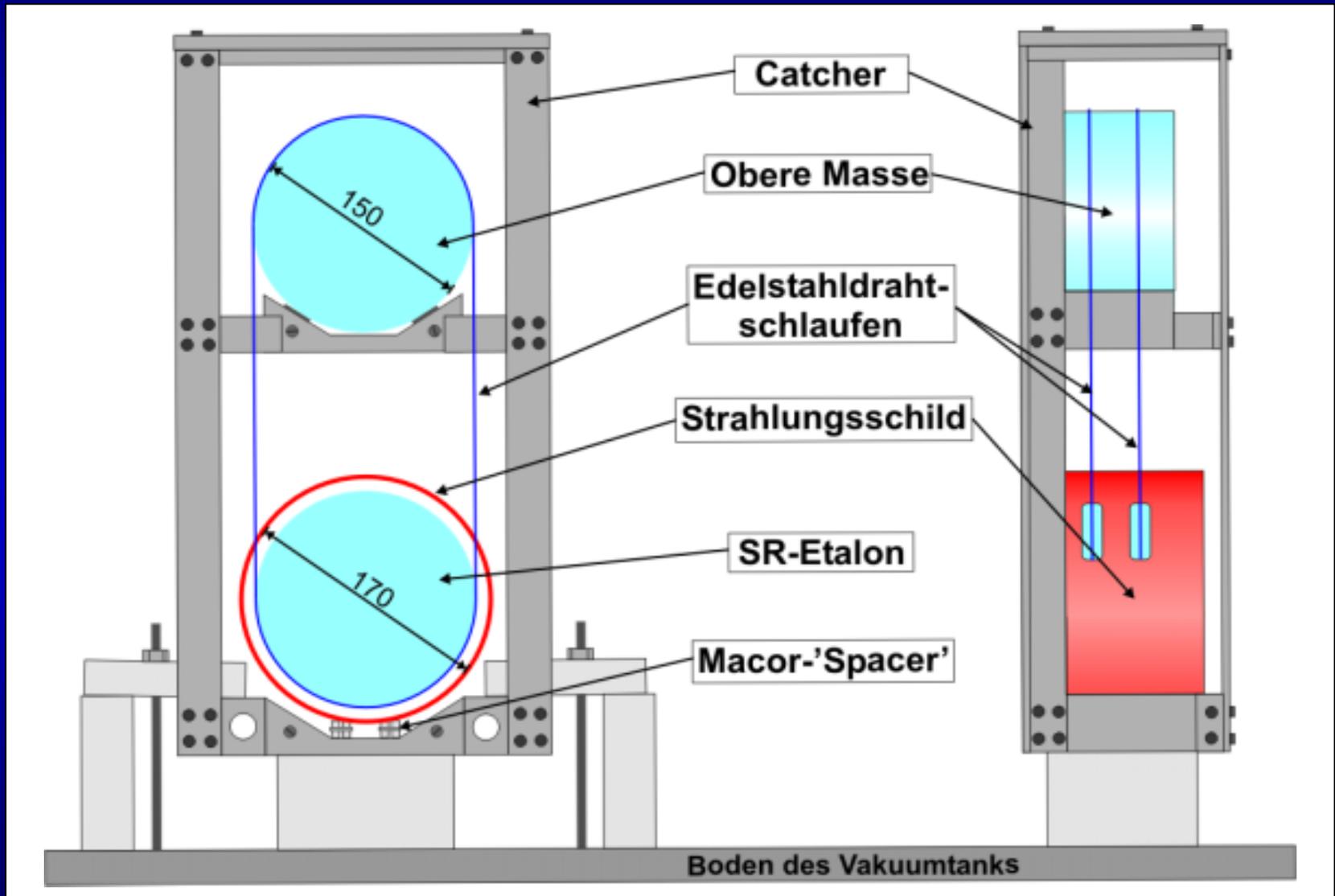
Dient zur Kontrolle des Datenaufnahmesystems

# Schema der Datenauswertung



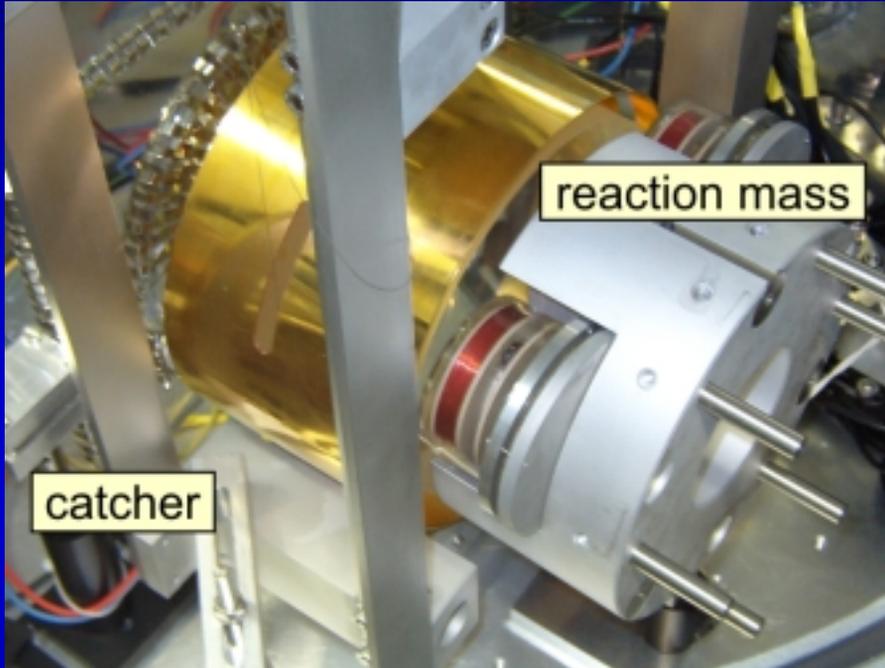


# Mechanischer Aufbau (1)



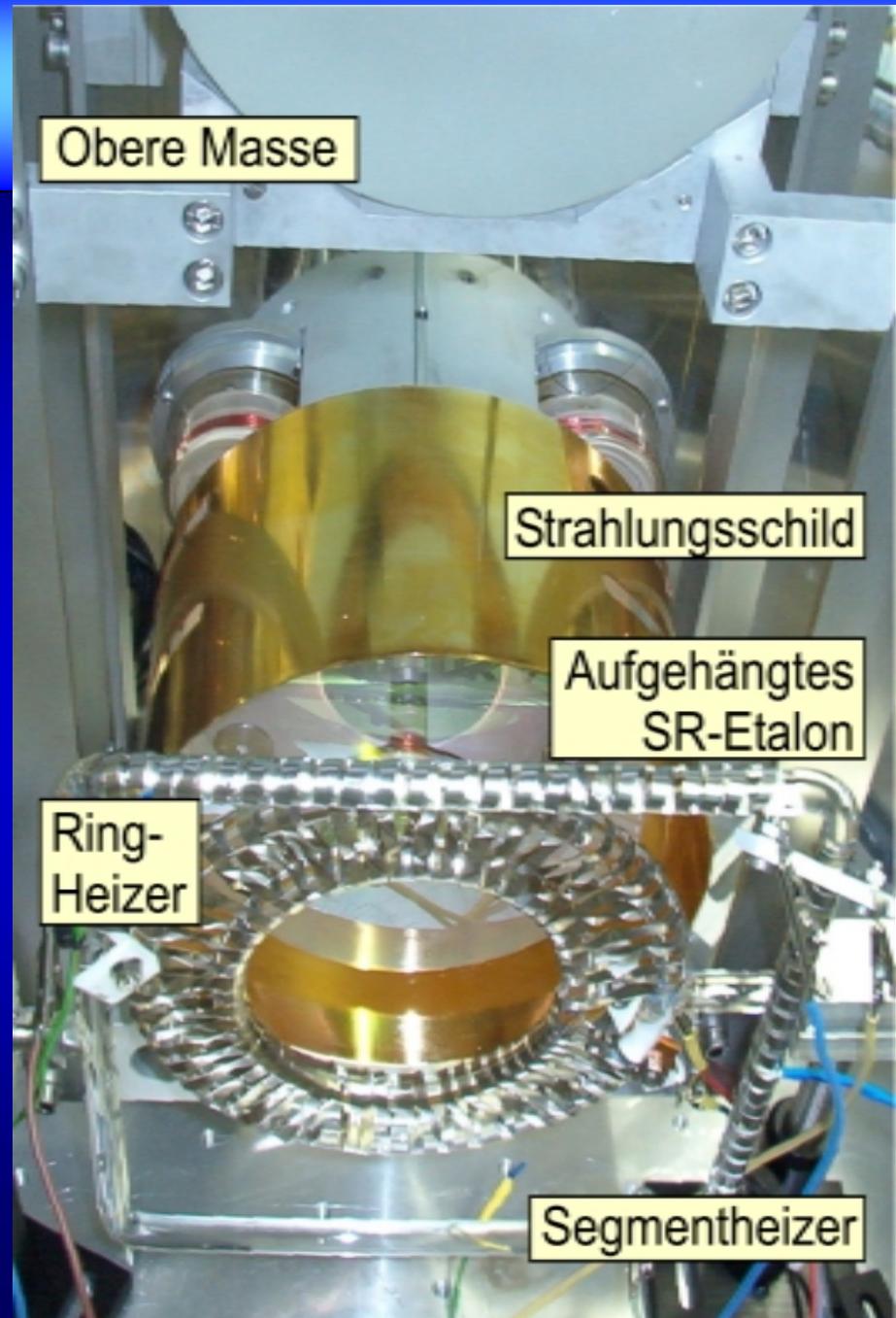


# Mechanischer Aufbau (2)



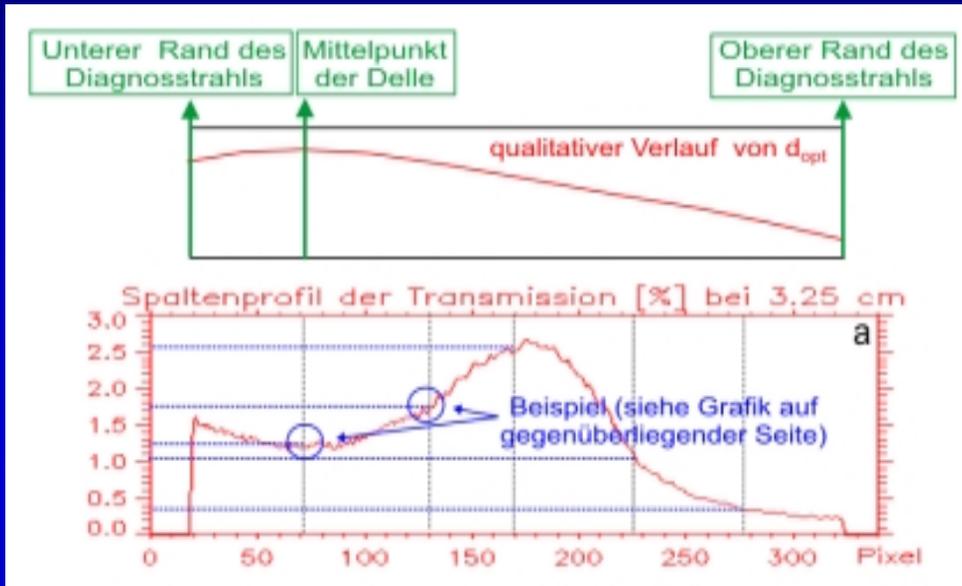
**Strahlungsschild:**  
Kupfering, galvanisiert, 0.4  $\mu\text{m}$  Gold

**Spiegelaufhängung:**  
2 Drahtschlaufen (Edelstahl)  
Drahtdurchmesser: 0,25mm





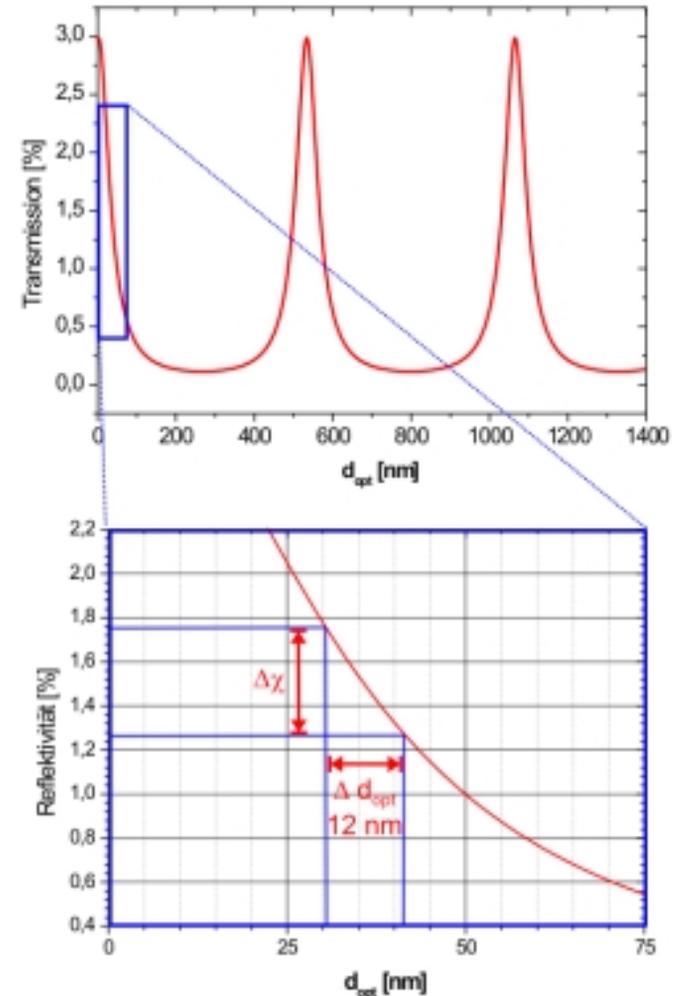
# Quantitative Bestimmung der Beule



- Homogen temperiertes Etalon.
- Aus Variation der Transmission wird Variation der optischen Etalondichte ermittelt (Airy-Funktion).

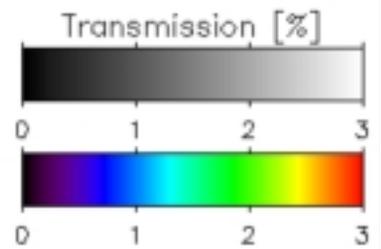
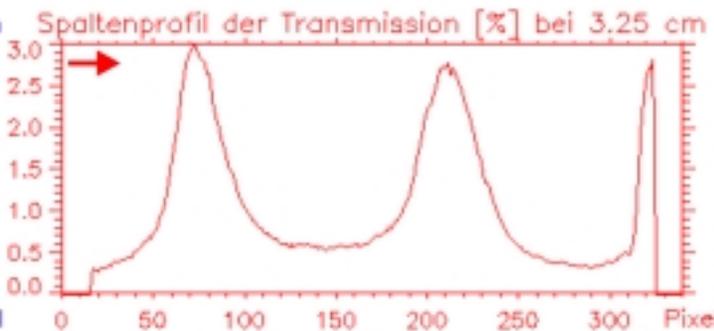
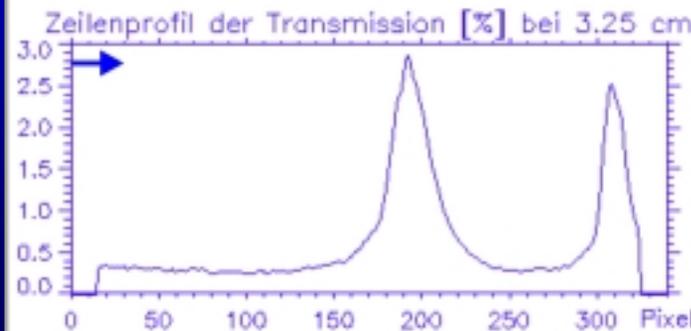
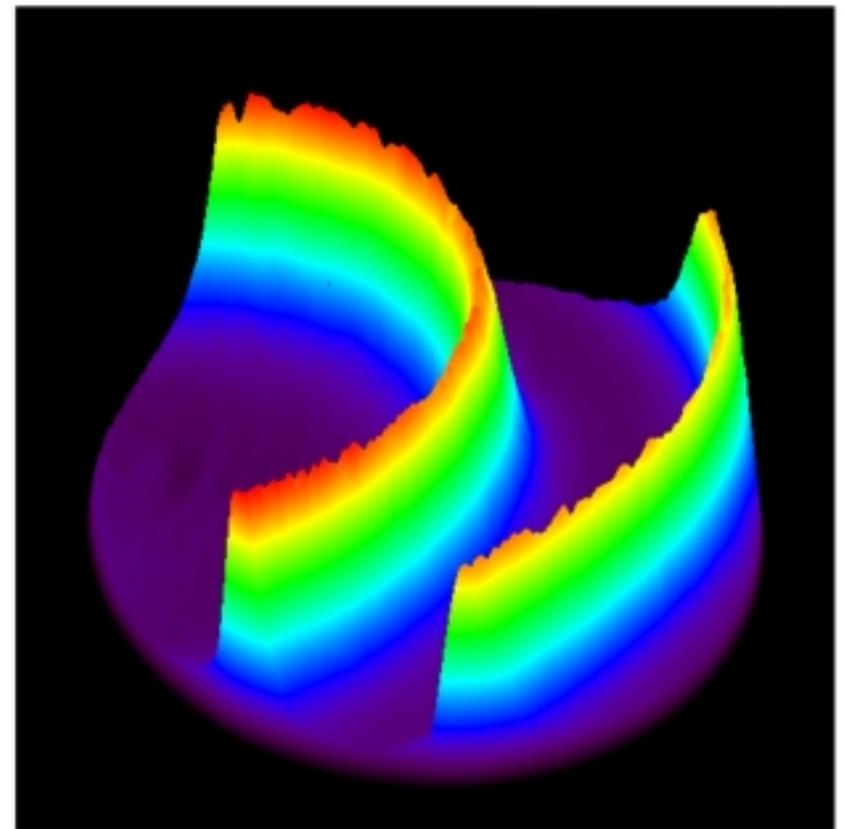
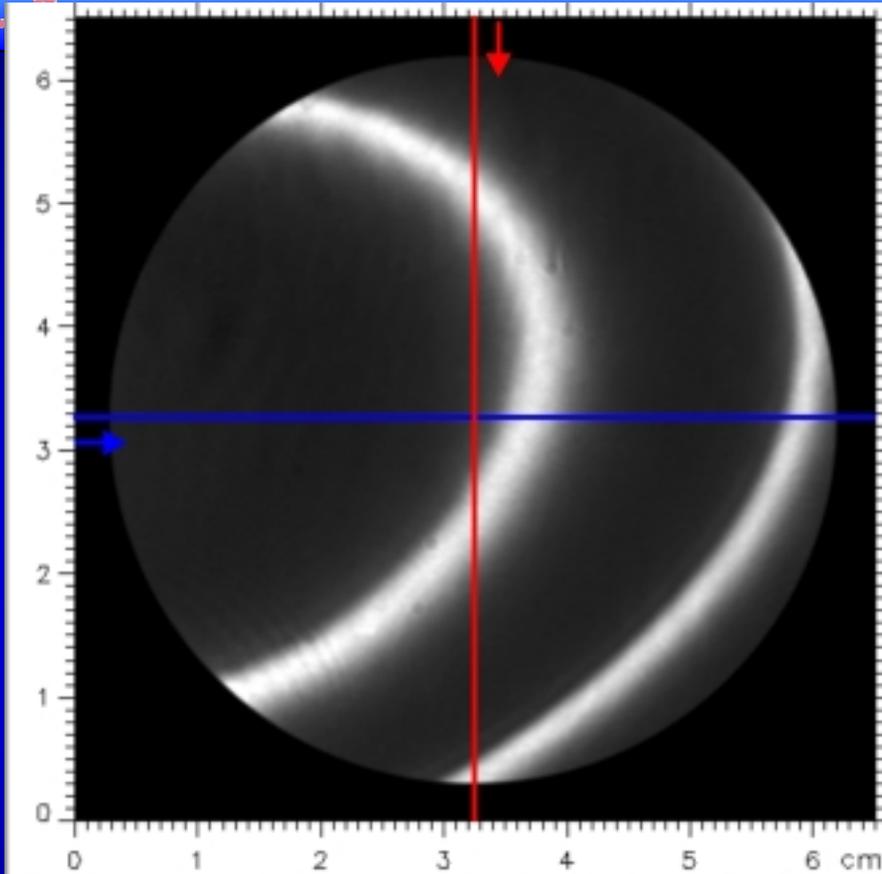
$$\Delta d_{opt} \approx 160 \text{ nm} \quad (\text{über } 60\text{mm})$$

Begrenzung der Messgenauigkeit !!



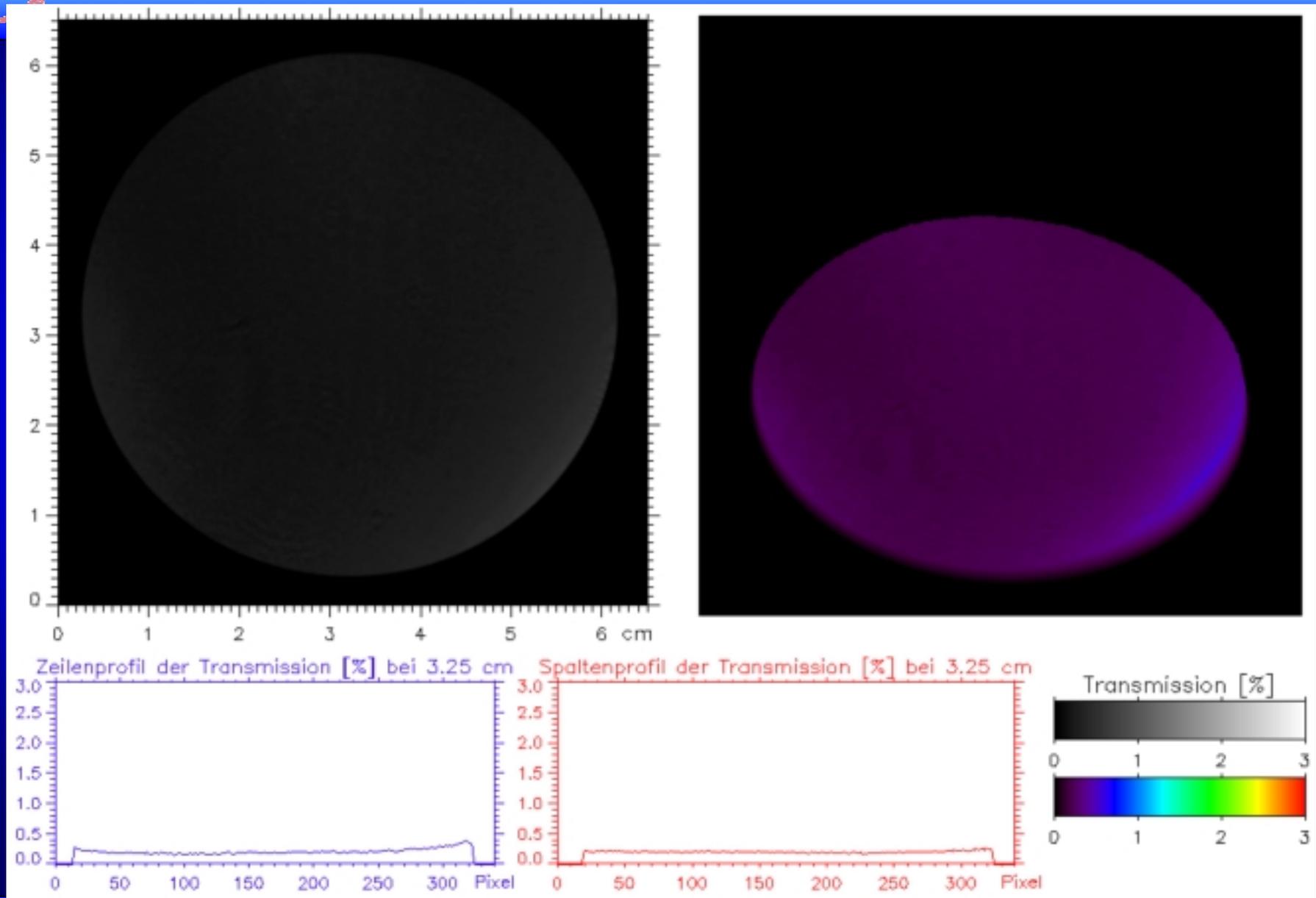


# Heizleistung: 70W, ohne Strahlungsschild



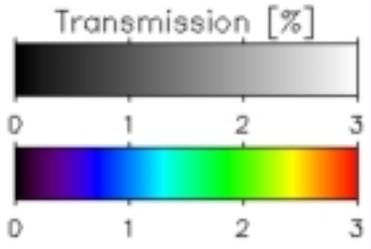
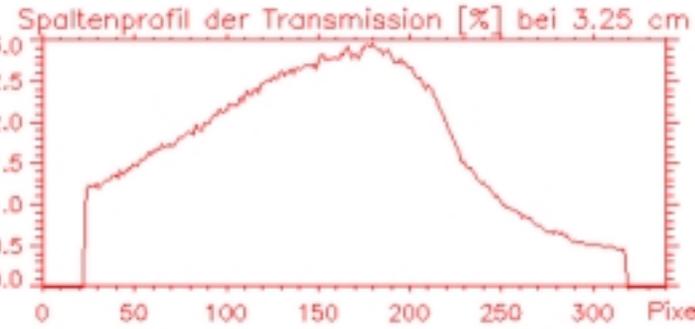
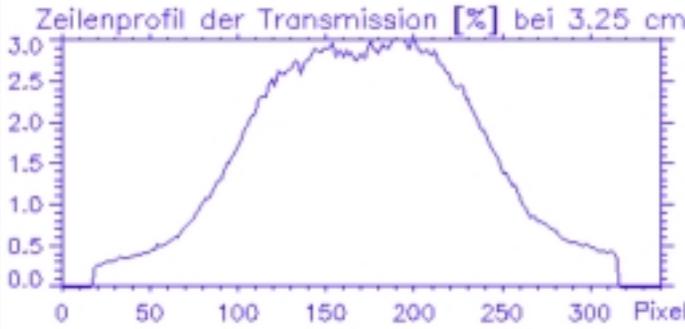
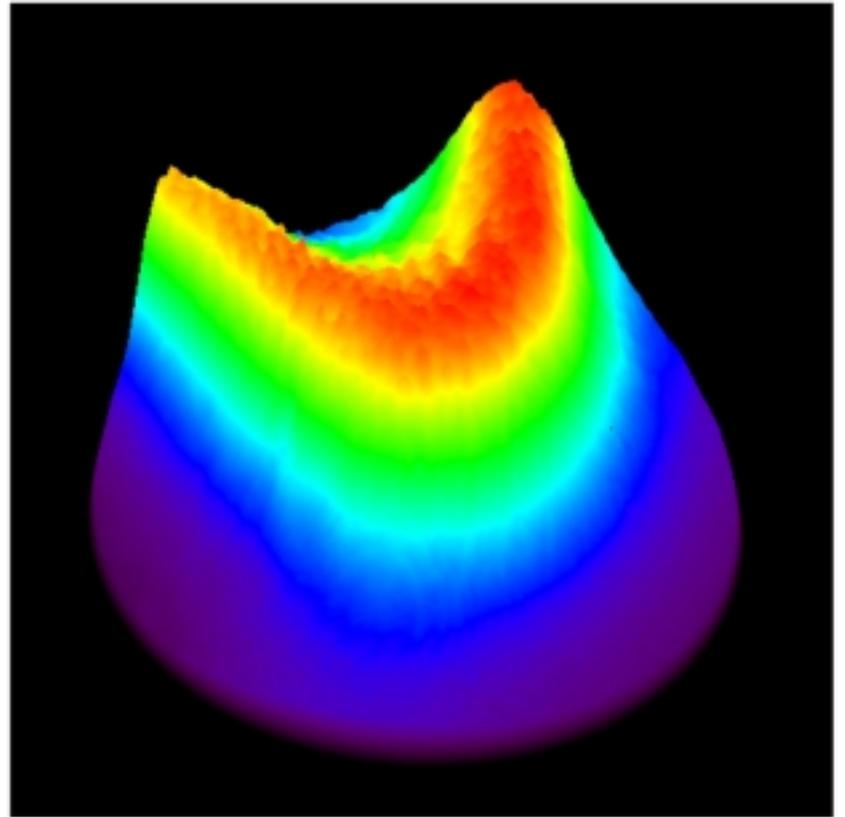
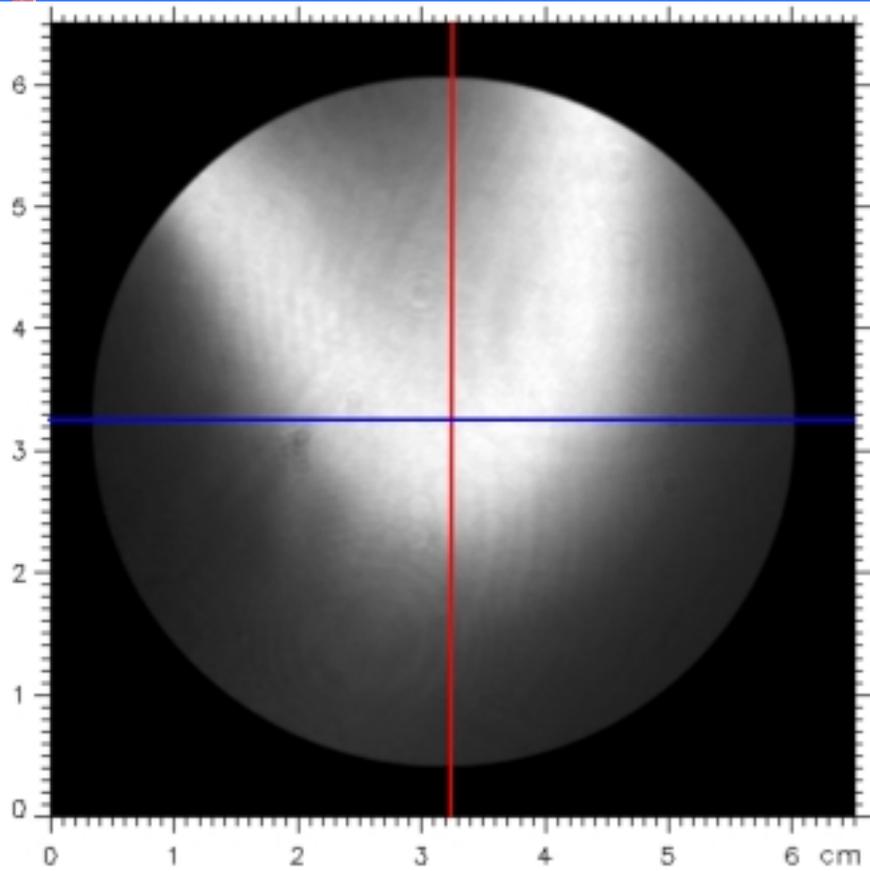


# Heizleistung: 70W, mit Strahlungsschild

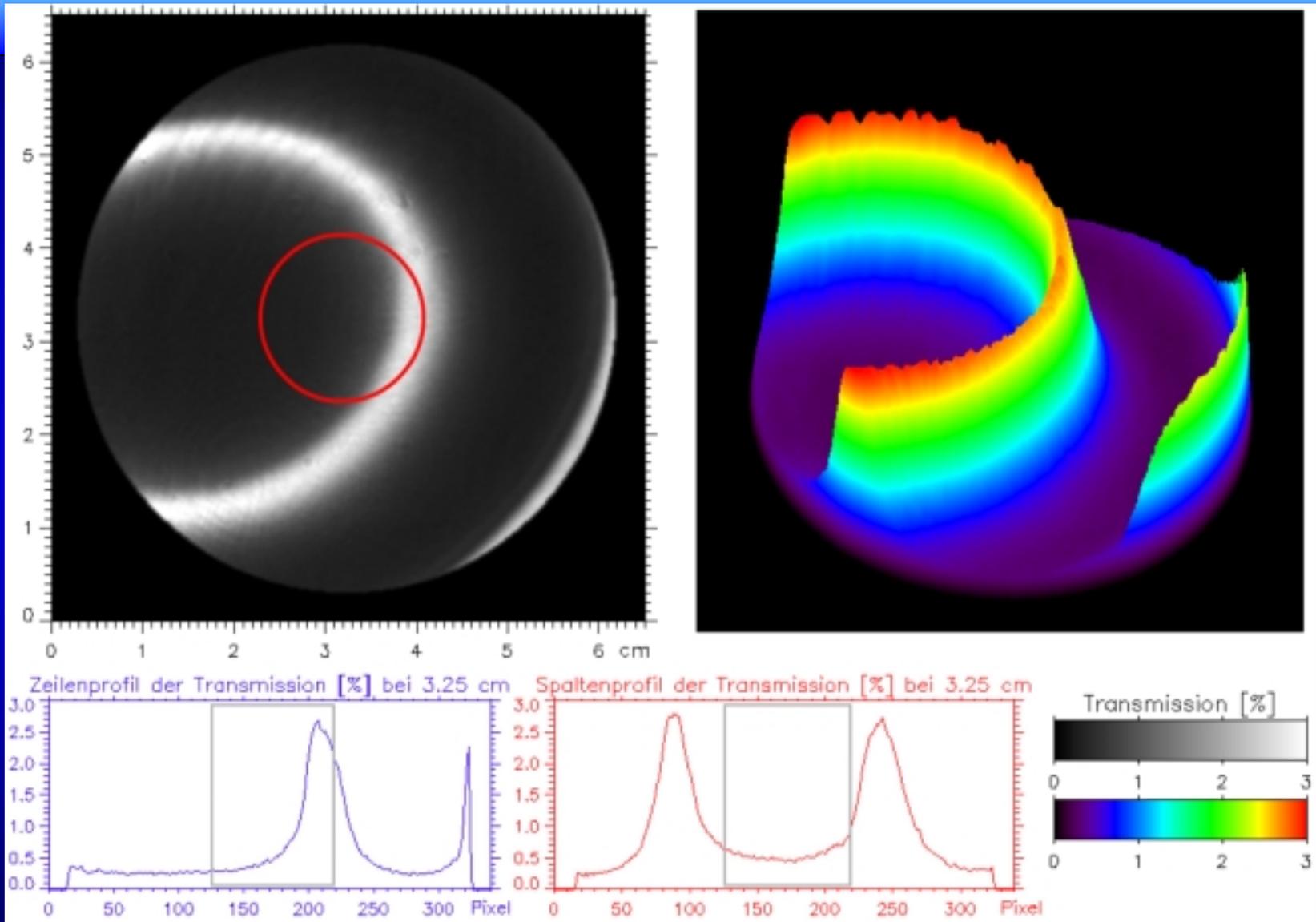




# Heizleistung: 70W, mit Strahlungsschild

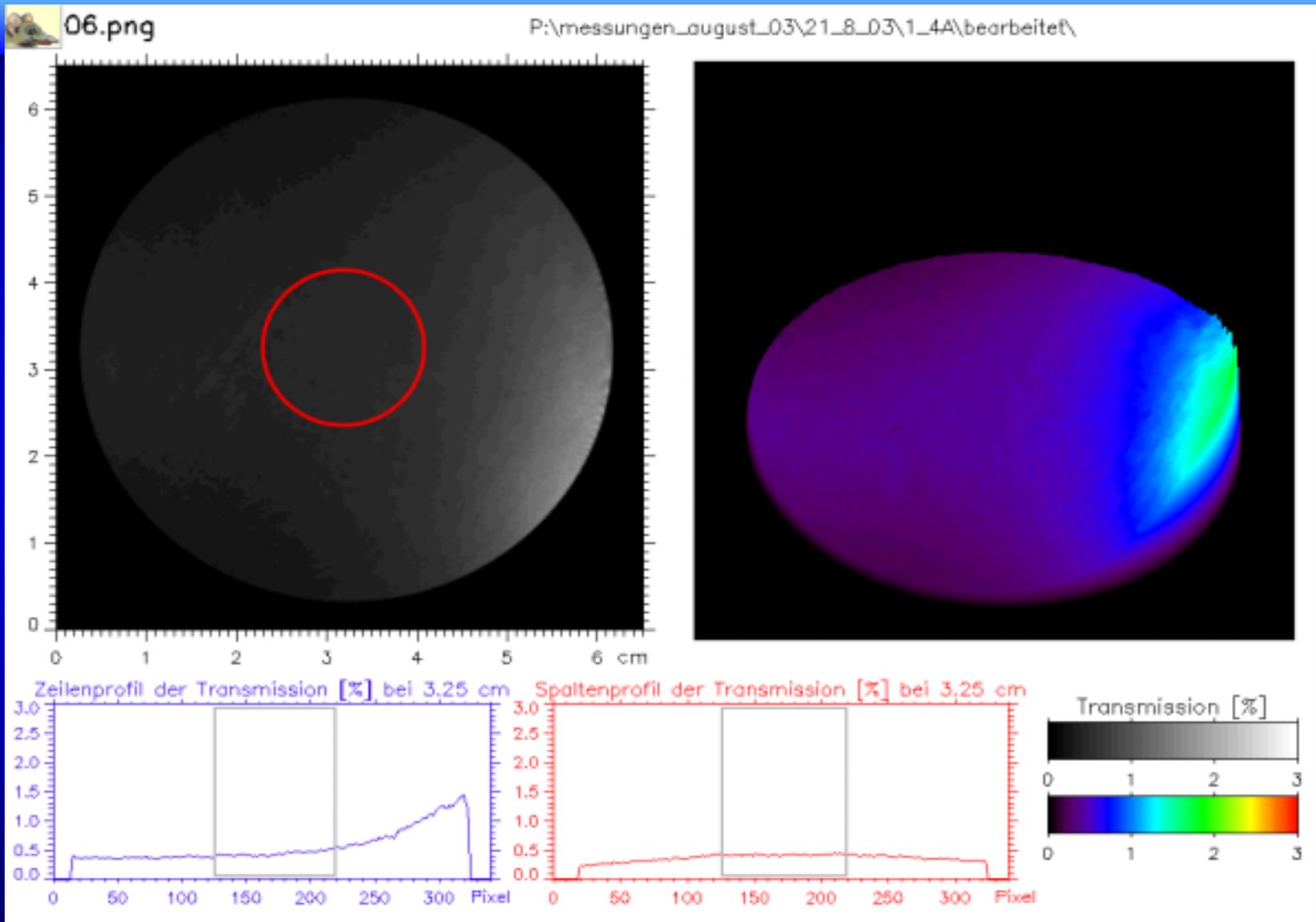


# Heizleistung: 38W, ohne Strahlungsschild



Variation der optischen Etalondicke (über 18mm) = 150nm

# Heizleistung: 38W, mit Strahlungsschild

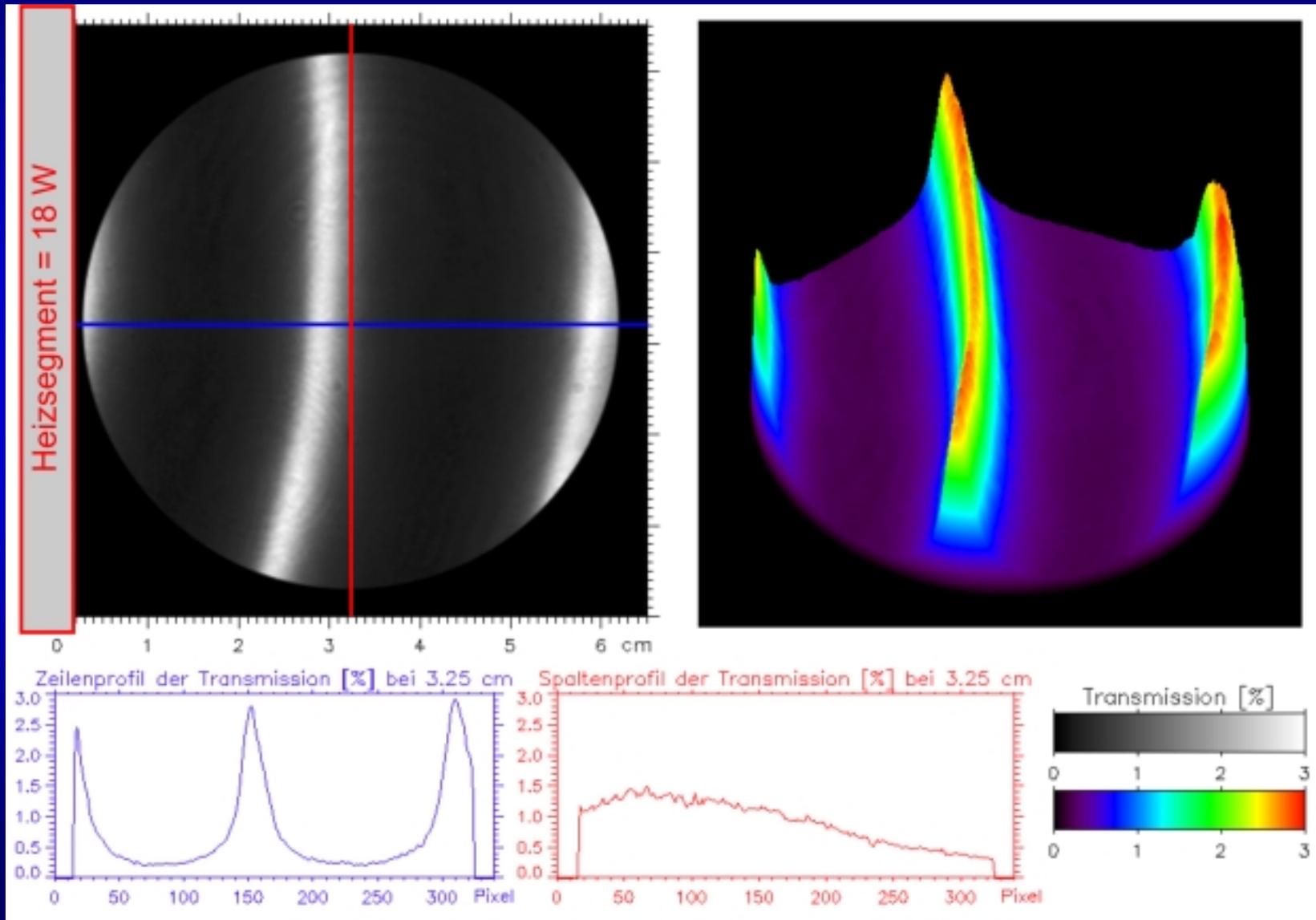


Maximale Variation der optischen Etalondicke (über 18mm) = 20nm



# Segment-Heizer:

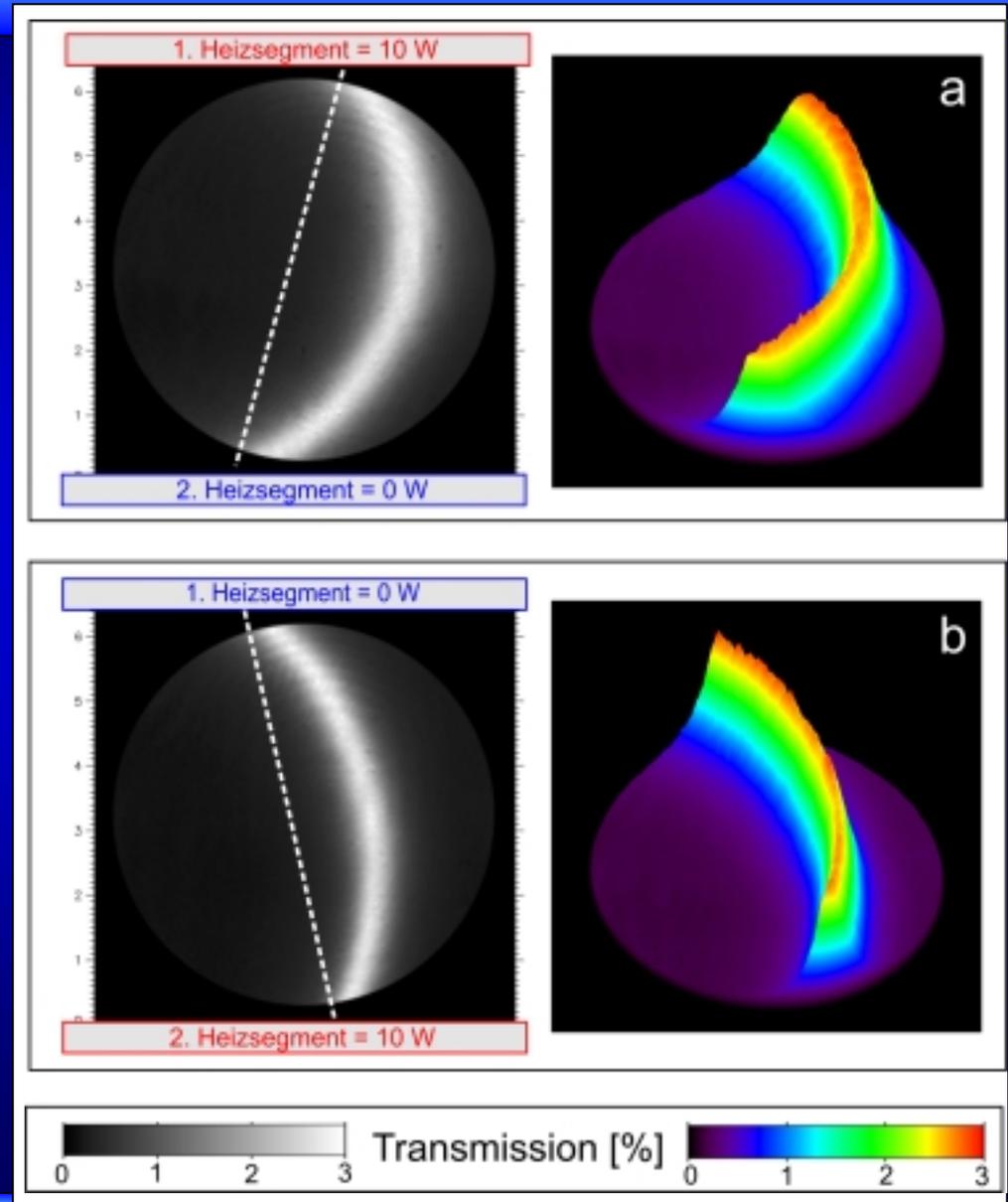
## Erzeugung eines linearen Temperaturgradienten



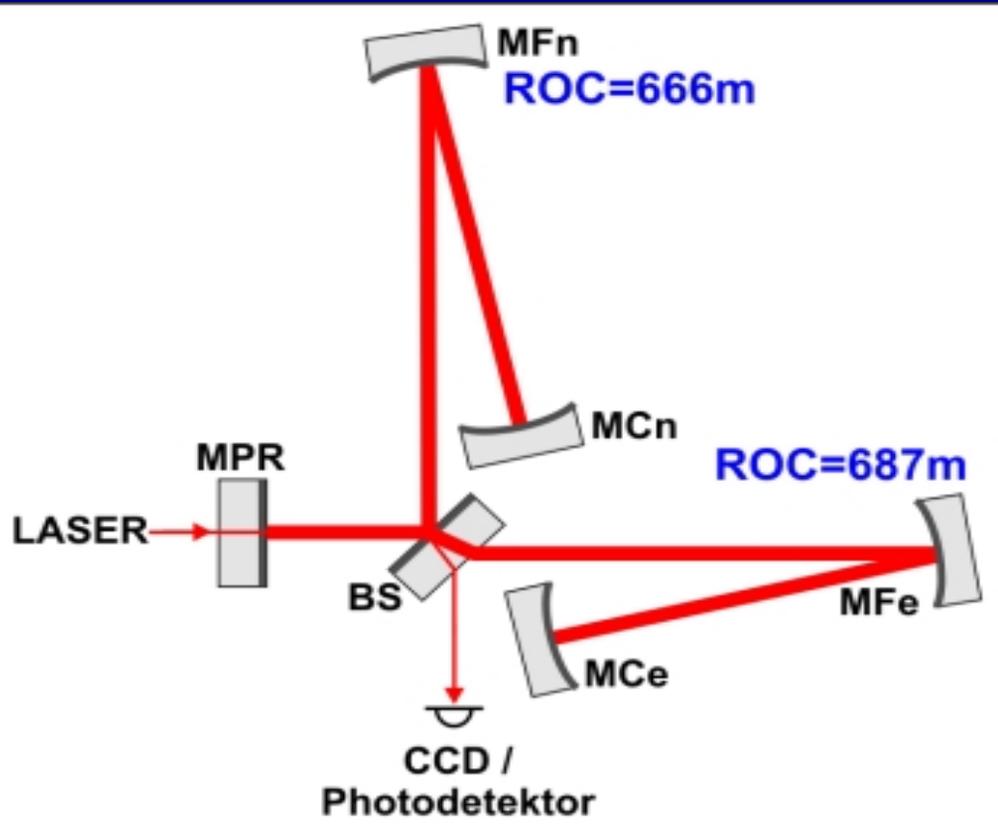
# Korrekturen durch Segmentheizer

- Kombiniertes Einsatz von Ring- und Segmentheizer
- Inhomogene Temperaturverteilungen können korrigiert werden
- Inhomogene Temperaturverteilungen können gezielt erzeugt werden

Korrektur der ROC  
bei GEO600 ??



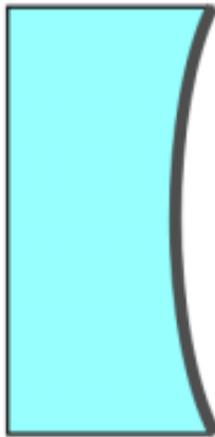
# ROC-Korrektur am MFE



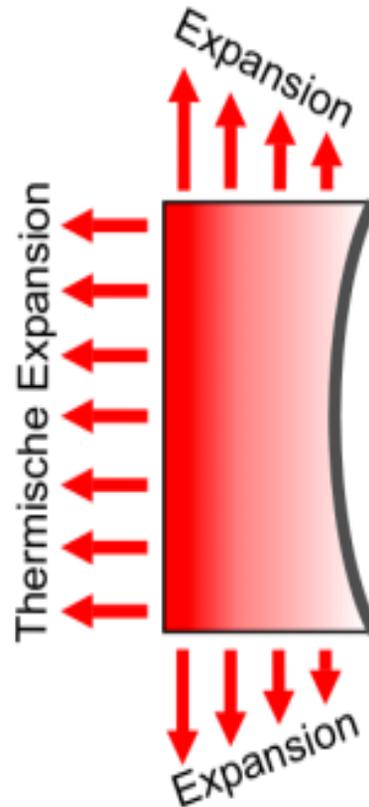
- Endspiegel mit falschen ROC
- **DARK PORT NICHT „DARK“ !**
- Korrektur durch gezielt induzierten longitudinalen Temperaturgradienten

# „Verbiegen“ des Spiegels

Kalter Spiegel

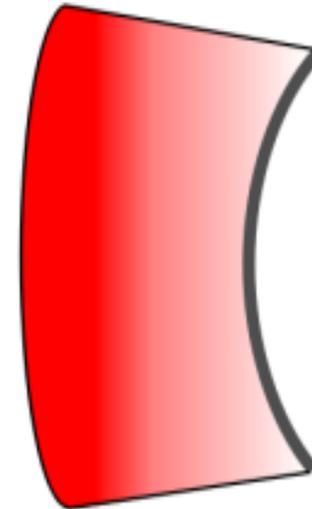


Krümmungsradius  
zu groß



50°C      20°C  
Temperaturgradient

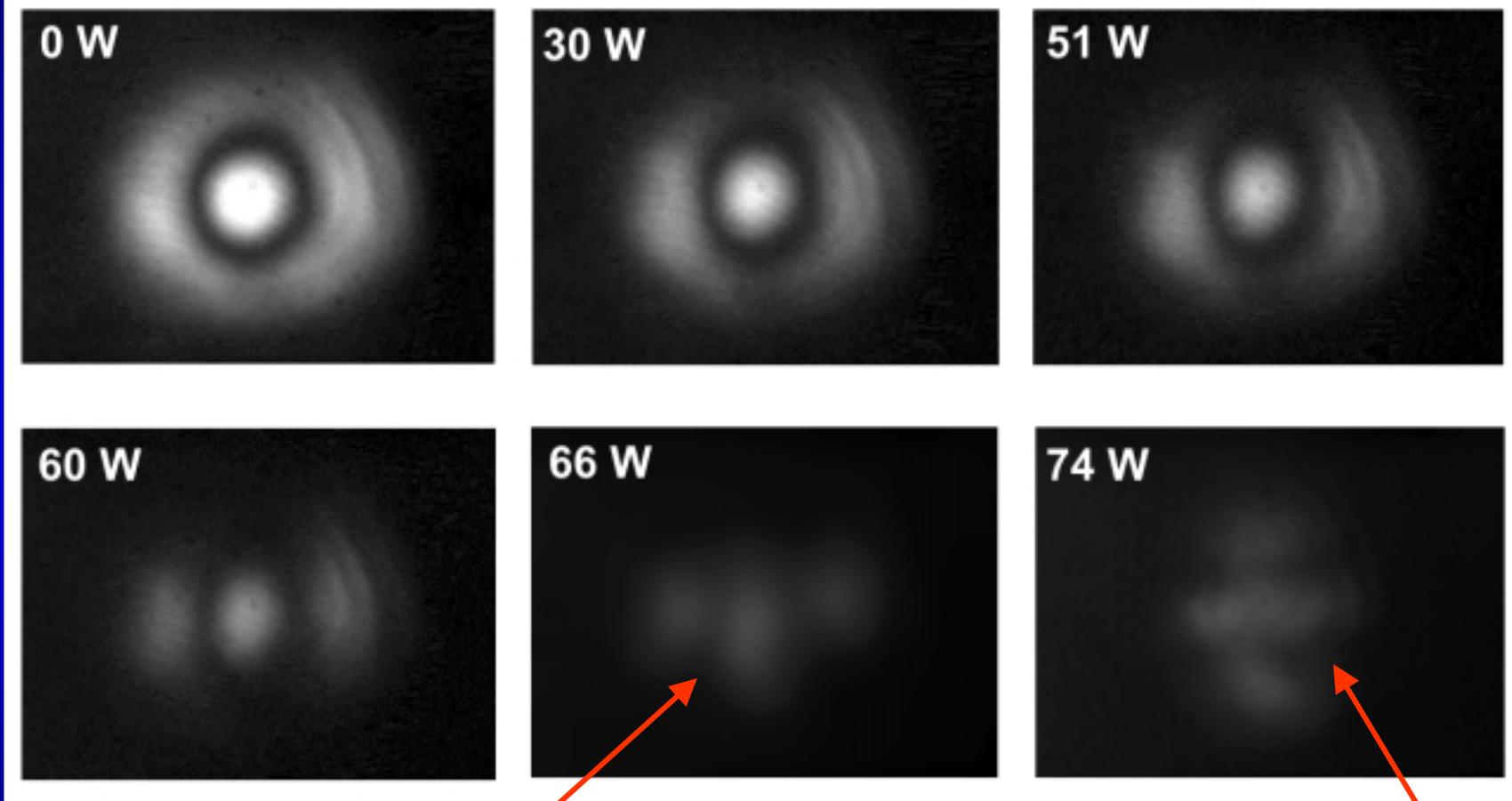
Verbogener Spiegel



Korrigierter  
Krümmungsradius



# Astigmatismus bei ROC-Korrektur

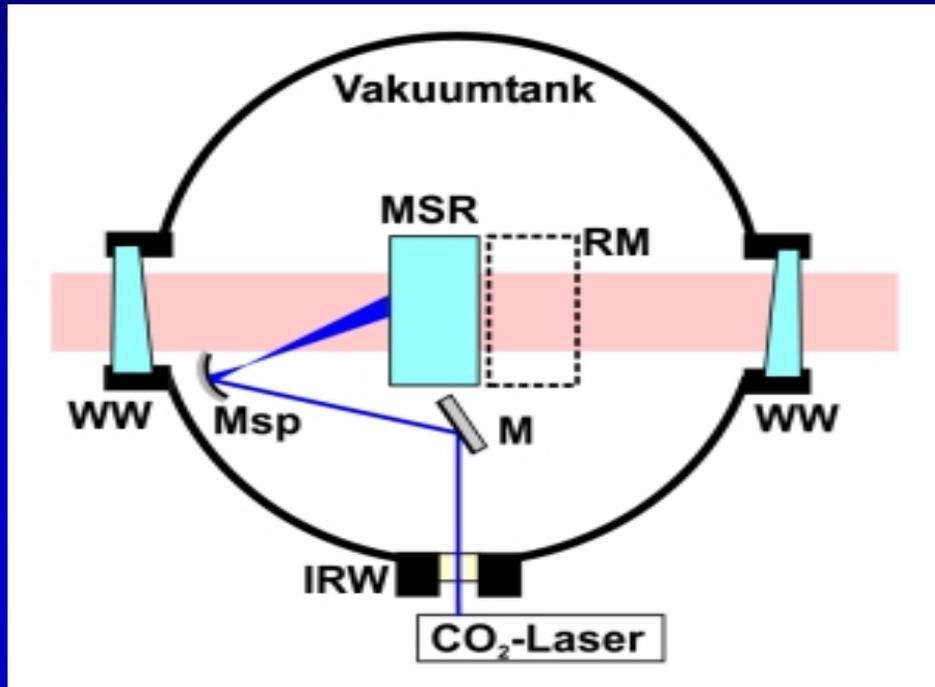


vertikal: kompensiert  
horizontal: nicht kompensiert

vertikal: überkompensiert  
horizontal: kompensiert

Vollständige Korrektur durch Einsatz des Segmentheizers ??

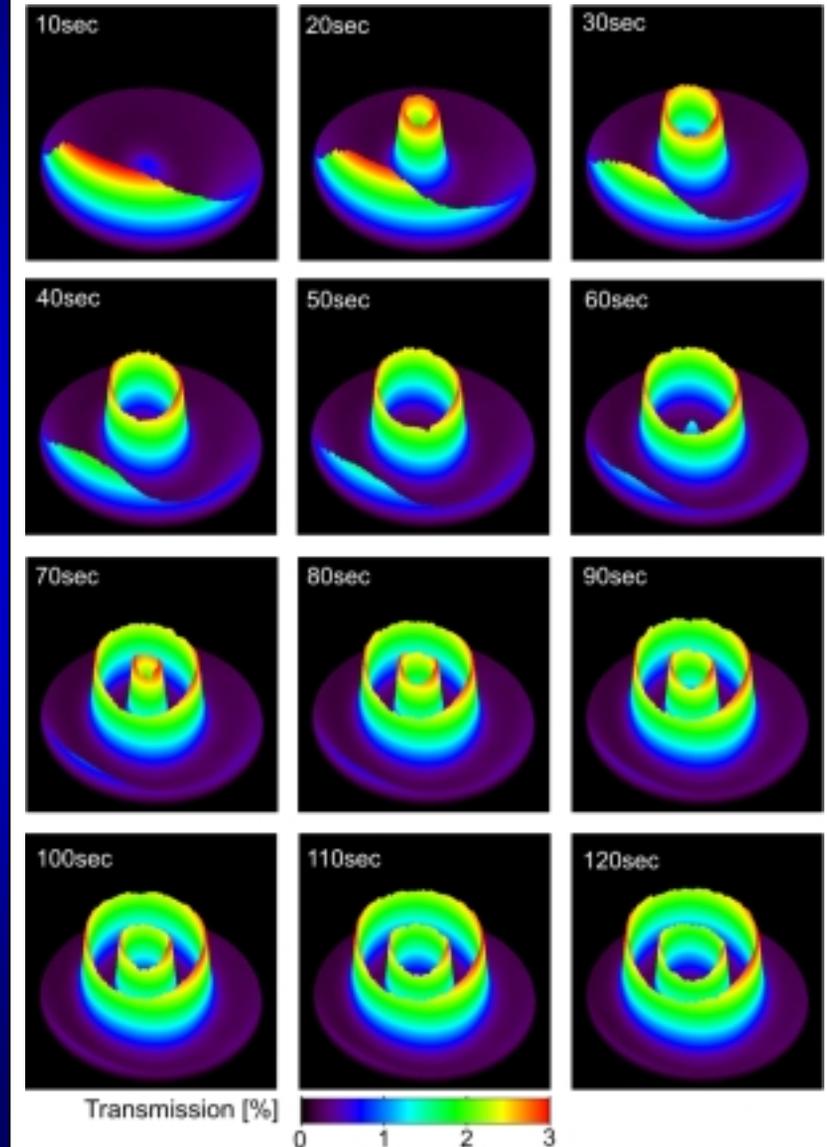
# Einsatz eines CO<sub>2</sub>-Laser (10,6 μm)



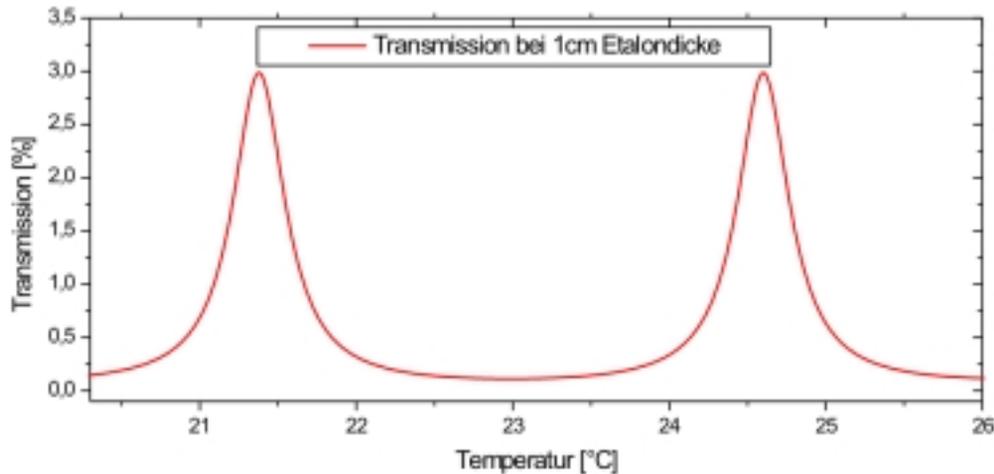
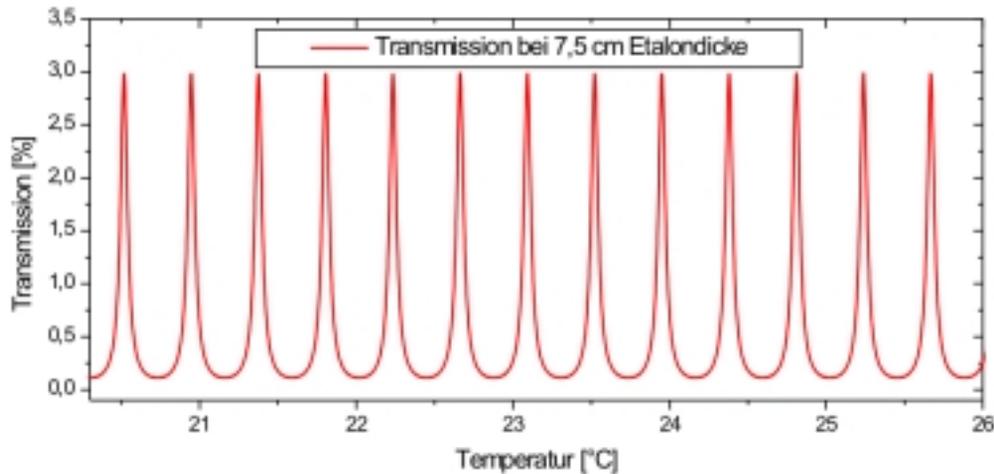
- Strahl auf 18 mm am MSR aufgeweitet
- Leistung des CO<sub>2</sub>-Lasers = 2,5 Watt
- Schnelles punktuell Heizen

- Korrektur Temperaturfehler höherer Ordnung (Scanner)

**Vorsicht: Strahlungsdruckfluktuationen !**

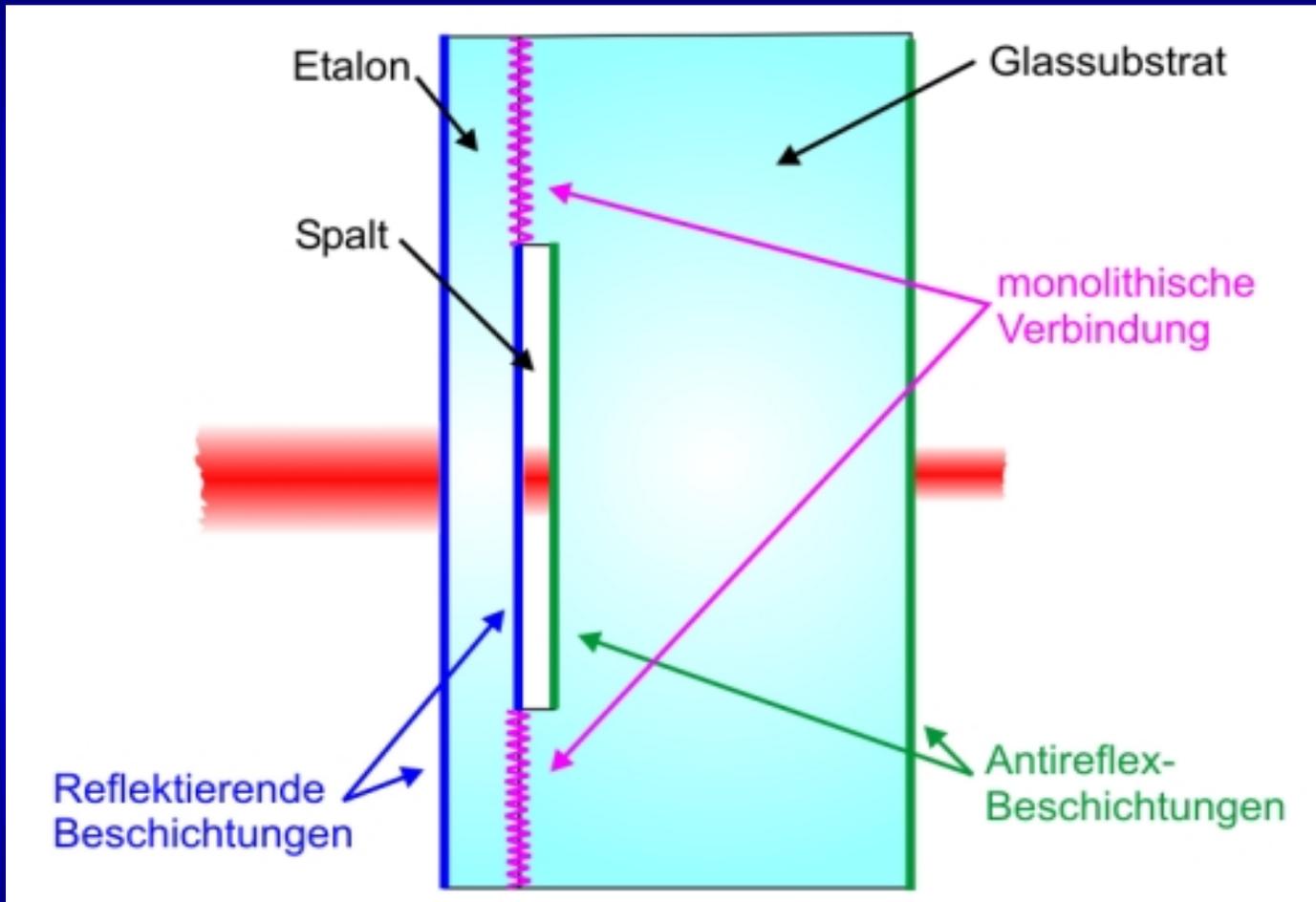


# Dünnes Etalon



Realisierung einer  
homogeneren lateralen  
Reflektivität des  
SR-Etalons bei  
identisch inhomogener  
Temperaturverteilung

# Mögliche Realisierung eines dünnen Etalons



**Vorsicht: Eigenmoden des dünnen Etalons !**  
**Vorsicht: Thermisches Rauschen (Verbindung) !**



# Zusammenfassung

- Vorstellung verschiedener einstellbarer SR-Spiegel
- Demonstration von thermisch durchstimmbarem SR am Garching Prototypen.
- Entwicklung von UHV-Strahlungsheizquellen (Ring- und Segment-Heizer, Heater für MFe)
- Experiment zur Bestimmung der lateralen Homogenität der Reflektivität
- Charakterisierung des Etalons (Beule)
- Deutliche Verbesserung durch Einsatz des Strahlungsschilds  
Von  $\Delta d_{\text{opt}} = 150 \text{ nm}$  (ohne) auf  $\Delta d_{\text{opt}} = 20 \text{ nm}$  (mit)
- Erste Tests mit Einsatz eines  $\text{CO}_2$ -Lasers



# Ausblick

- Einsatz eines besseren / homogeneren Etalons (teuer!!) ??
- Test eines dünnen Etalons ??
- Einsatz des Segment-Heizers bei GEO600 ??
  - Korrektur der Krümmungsradien
  - Kompensation der thermischen Linse im Strahlteiler
- Thermisch adaptive Optik mit gescanntem CO<sub>2</sub>-Laser ??
- Viele Simulationen und Berechnungen:
  - Requirement für laterale Homogenität der Reflektivität
  - Strahlungsdruckfluktuationen (gescannter CO<sub>2</sub>-Laser)
  - Mechanische Eigenschaften eines dünnen Etalons
  - • • •



Ende - Ende – Ende – Ende - Ende

ZUSATZFOLIEN