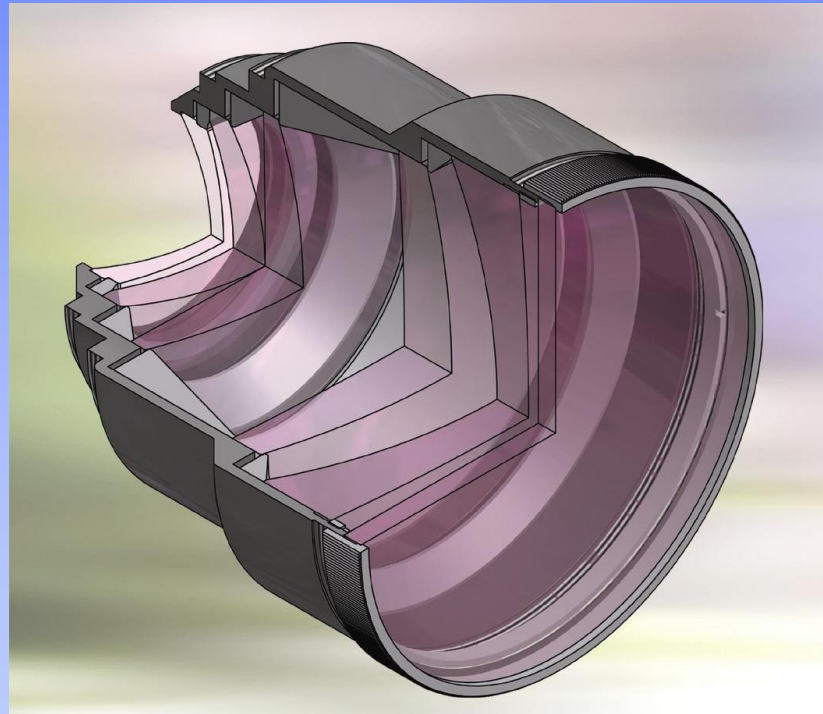
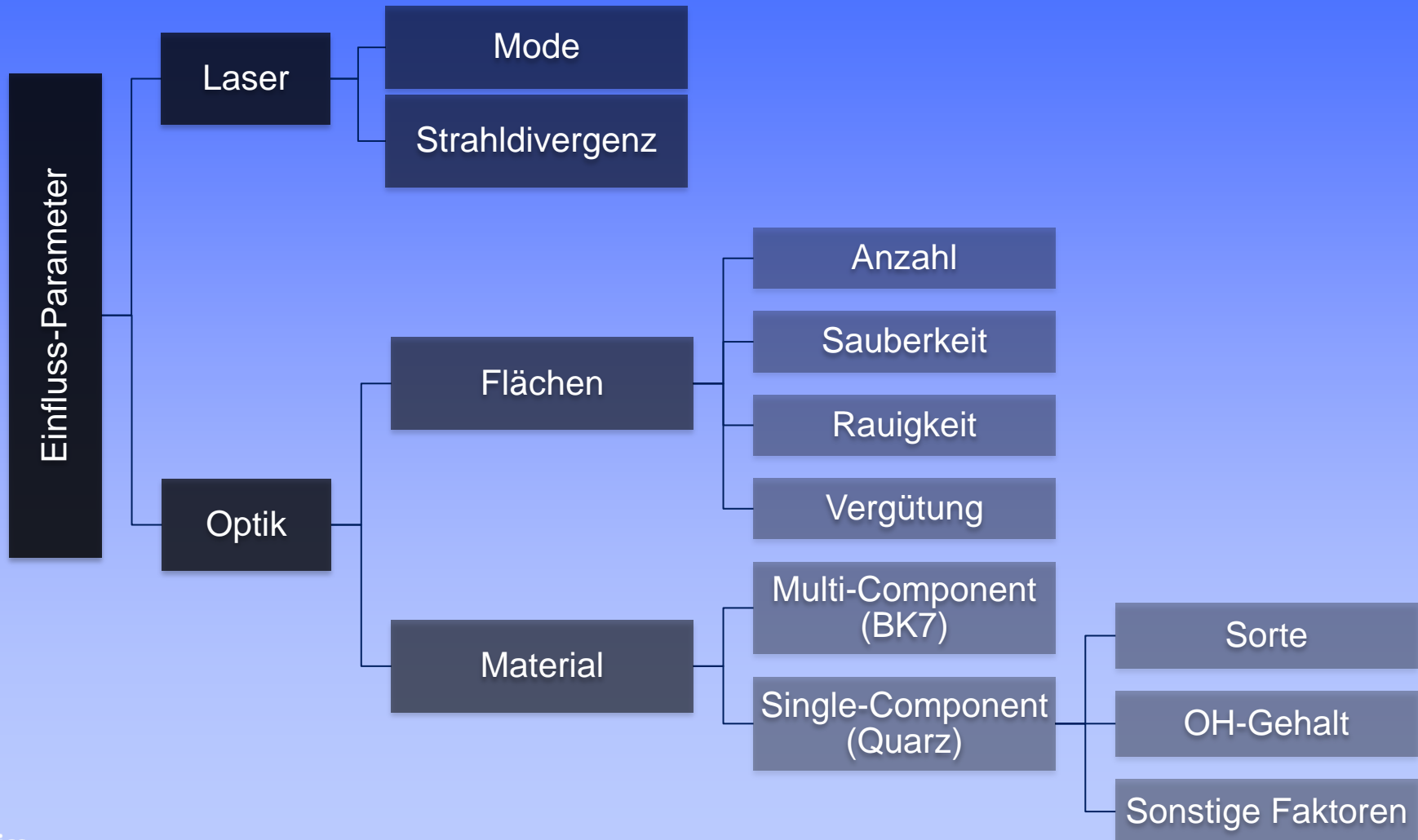


# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern



# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Mögliche Ursachen



# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Lasersysteme

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

- BK7
- Quarz
  - Sorte
  - OH-Gehalt
  - Sonstige Faktoren

Durchführung von mehreren Messungen der gleichen Objekte auf zwei verschiedenen Lasersystemen:

### System 1:

- 6kW-Faserlaser
- Multi-Mode
- 1064nm
- Ø150µm Faser
- $M^2 \approx 13$

### System 2:

- 1kW-Faserlaser
- Single-Mode
- 1064nm
- Ø15µm Faser
- $M^2 = 1,15$

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Aufbau der Testsysteme

### Laser

- Mode
- Strahldivergenz

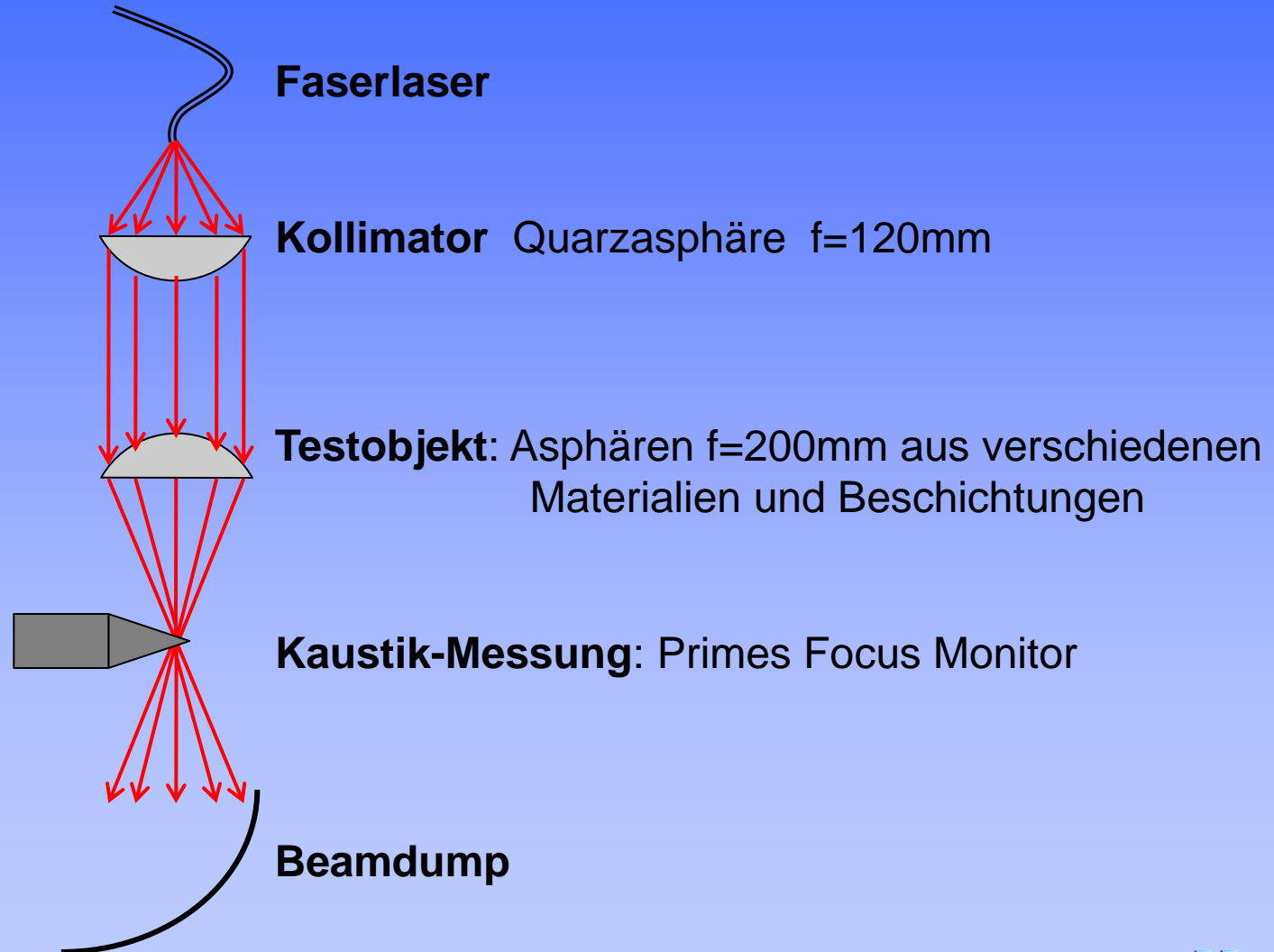
### Optik

#### Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

#### Material:

- BK7
- Quarz
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren



# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Anzahl der optischen Flächen

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

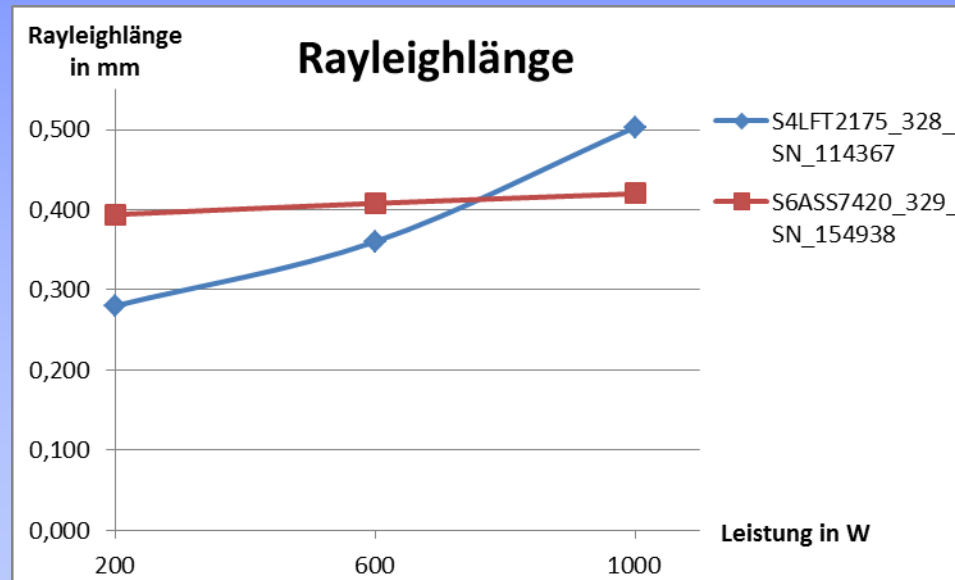
- BK7
- Quarz
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren

### S6ASS7420/328:

- Asphäre
- 1 Linse
- Corning7980 0F
- Gleiche Vergütung (/328)

### S4LFT2175/328:

- F-Theta-Objektiv
- 4 Linsen
- Corning7980 0F
- Gleiche Vergütung (/328)



# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Anzahl der optischen Flächen

### Laser

Mode

Strahldivergenz

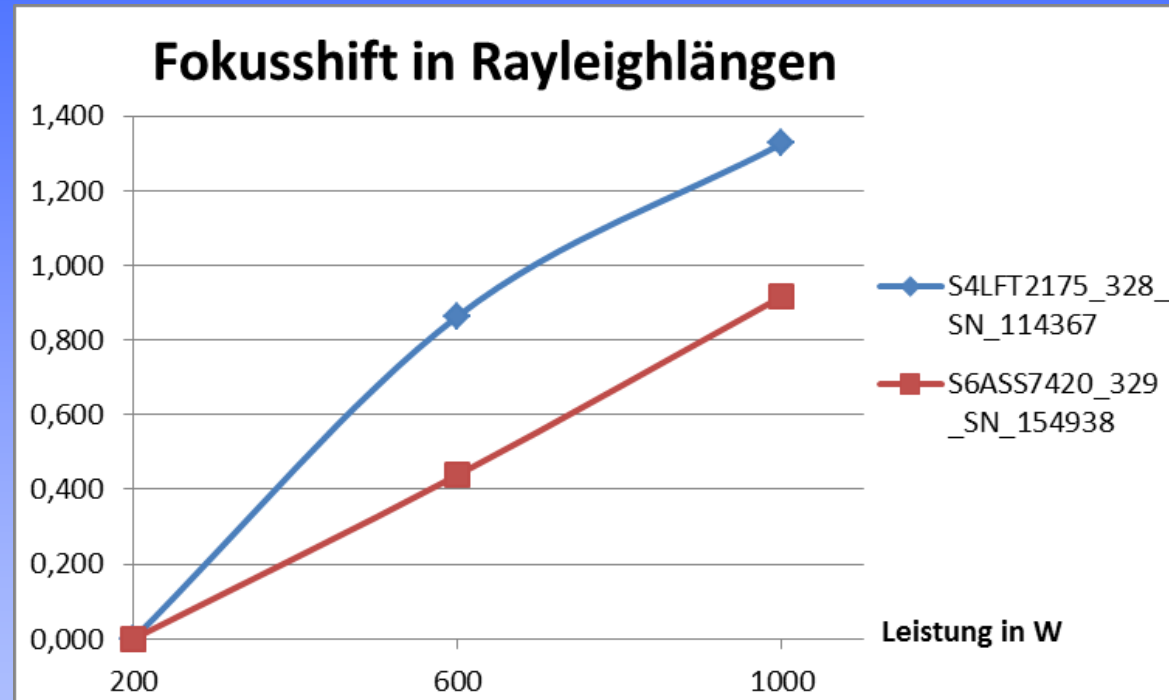
### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

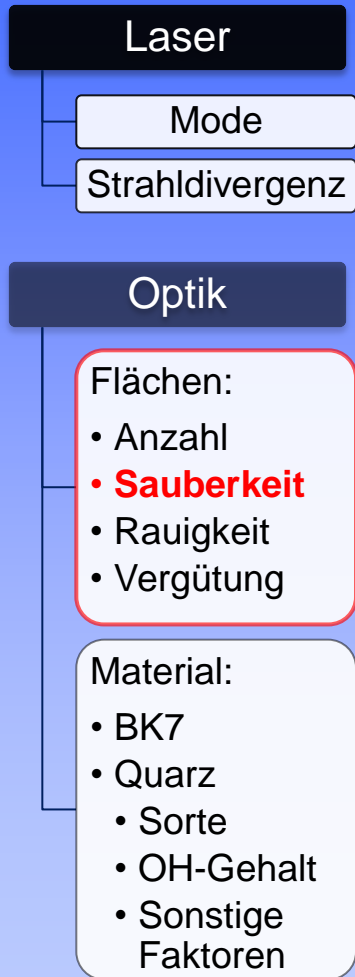
- BK7
- Quarz
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren



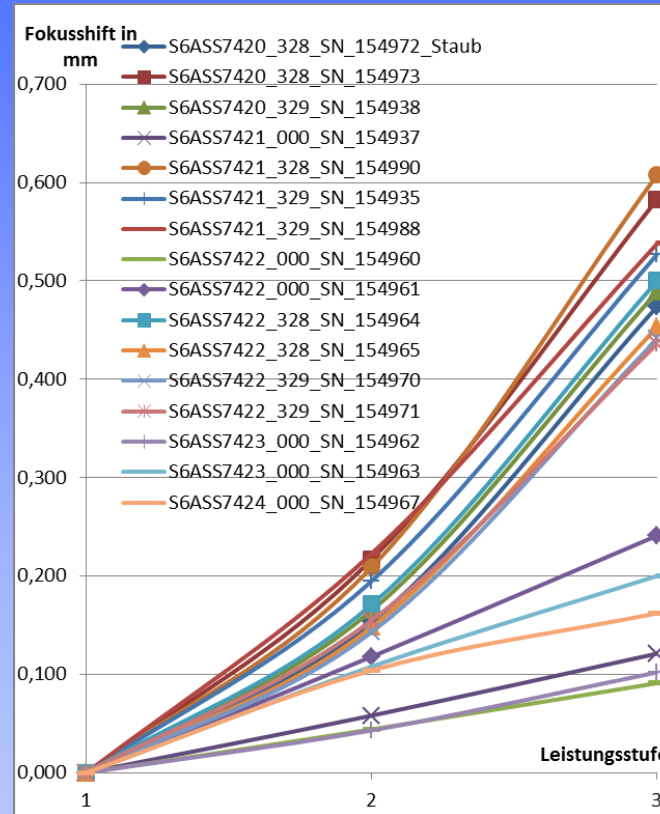
Der Fokusshift der einzelnen Linsen summiert sich nicht auf. Er kann also durch das Objektivdesign teilweise kompensiert werden.

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

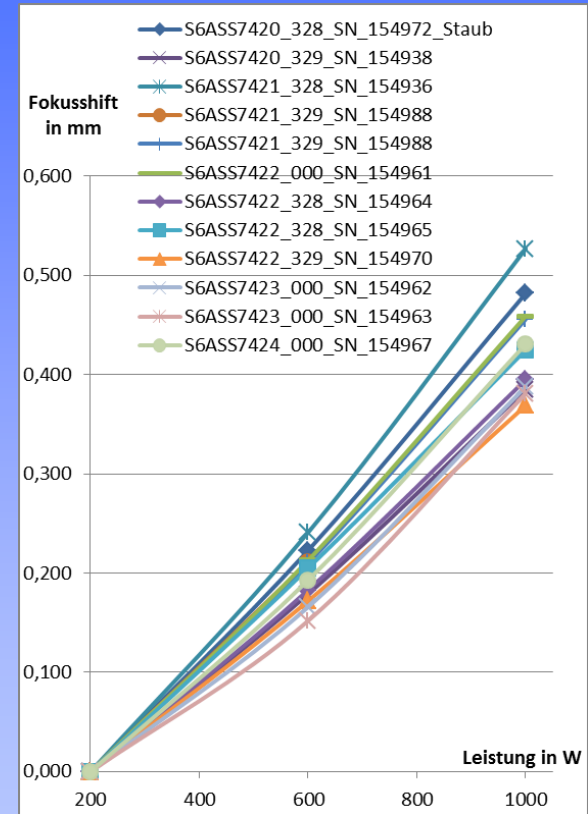
## Sauberkeit



System 1:



System 2:



Keine sichtbaren Ausreißer, keine Auffälligkeiten an Linsen  
 → Weitere Untersuchungen notwendig

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Oberflächenrauigkeit

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- **Rauigkeit**
- Vergütung

Material:

- BK7
- Quarz
  - Sorte
  - OH-Gehalt
  - Sonstige Faktoren

Momentan wird eine 3-Rauten-Politur eingesetzt.

Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit soll mit zukünftigen Tests noch geklärt werden.

Der Vergleich „3-Rauten-Politur ↔ SuperPolish“ ist geplant.

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Vergütungen

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- **Vergütung**

Material:

- BK7
- Quarz
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren

Asphärische Fokussierlinsen  $f=200$  (S6ASS742y/xxx) mit 3 verschiedenen Vergütungen  $x$ :

/xxx	Vergütung	Verfahren	Gemessen bei:
/000	Unvergütete Linsen	unvergütet	500W, 750W, 1000W
/328	MIL-C-48497; $R < 0,15\%$ ; 1030..1090nm;	IP (absorptionsarm)	1kW, 2.5kW, 5kW
/329	MIL-C-48497; $R < 0,15\%$ ; 1030..1090nm;	E-Beam (absorptionsarm)	1kW, 2.5kW, 5kW

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Vergütungen

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- **Vergütung**

Material:

- BK7
- Quarz
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren

### System 1:

Mittelwerte von $\Delta Z$ in mm				
Leistung	750W	1000W	2500W	5000W
000	0,079	0,153	-	-
328	-	-	0,180	0,524
329	-	-	0,176	0,486

### System 2:

Mittelwerte von $\Delta Z$ in mm		
Leistung	600W	1000W
000	0,181	0,393
328	0,210	0,457
329	0,187	0,403

### Normierung von $\Delta Z$ über Leistungsdichte und Rayleighlänge:

Mittelwerte von $\Delta Z$ (normiert*1000)				
Leistung	750W	1000W	2500W	5000W
000	11,576	16,586	-	-
328	-	-	6,727	10,282
329	-	-	6,771	8,907

Mittelwerte von $\Delta Z$ (normiert*1000)		
Leistung	600W	1000W
000	92,989	113,088
328	113,573	127,513
329	91,666	113,917

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Leistungsdichte

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

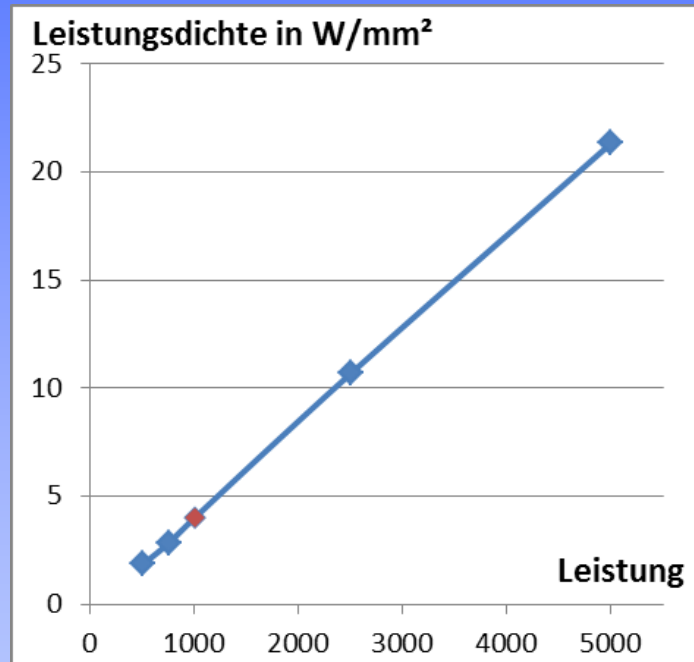
Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- **Vergütung**

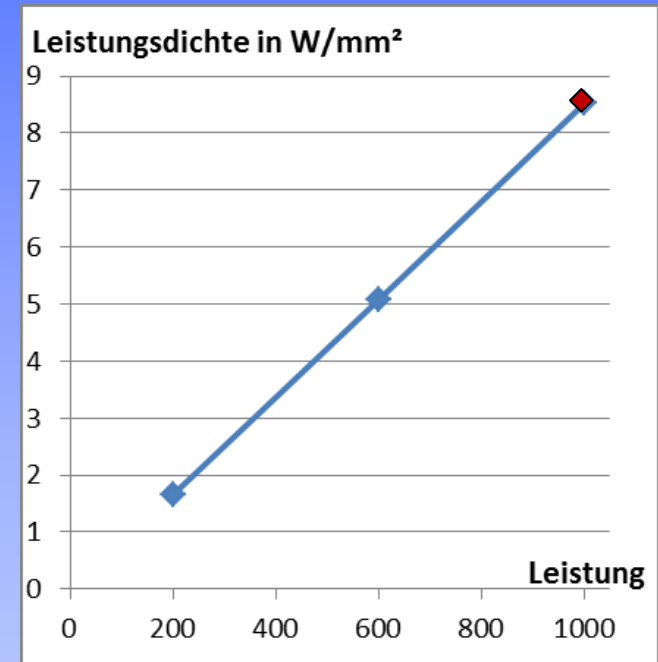
Material:

- BK7
- Quarz
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren

### System 1:



### System 2:



# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Gemessene Rayleighlängen

Laser

Mode

Strahldivergenz

Optik

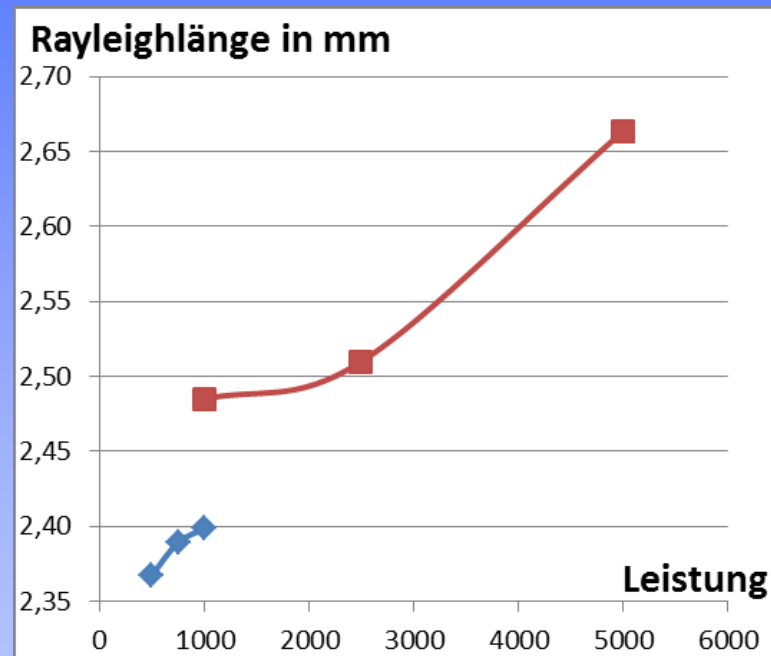
Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- **Vergütung**

Material:

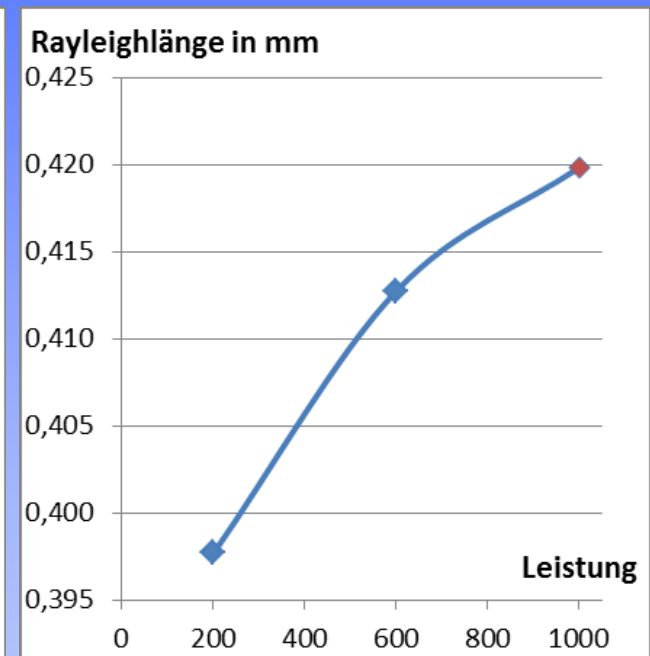
- BK7
- Quarz
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren

System 1:



Errechnete Rayleighlänge:  
2,210mm

System 2:



Errechnete Rayleighlänge:  
0,362mm

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Vergütungen

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- **Vergütung**

Material:

- BK7
- Quarz
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren

### System 1:

Mittelwerte von $\Delta Z$ in mm				
Leistung	750W	1000W	2500W	5000W
000	0,079	0,153	-	-
328	-	-	0,180	0,524
329	-	-	0,176	0,486

Mittelwerte von $\Delta Z$ (normiert*1000)				
Leistung	750W	1000W	2500W	5000W
000	11,576	16,586	-	-
328	-	-	6,727	10,282
329	-	-	6,771	8,907

### System 2:

Mittelwerte von $\Delta Z$ in mm		
Leistung	600W	1000W
000	0,181	0,393
328	0,210	0,457
329	0,187	0,403

Mittelwerte von $\Delta Z$ (normiert*1000)		
Leistung	600W	1000W
000	92,989	113,088
328	113,573	127,513
329	91,666	113,917

**Aber:** Die IP (/328) – Vergütung ist unempfindlicher gegenüber größeren **Einfallswinkeln** und hat deutliche Vorteile bei der **Haftung** und Robustheit

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Vergleich Winkelabhängigkeit 328 ⇔ 329

### Laser

Mode

Strahldivergenz

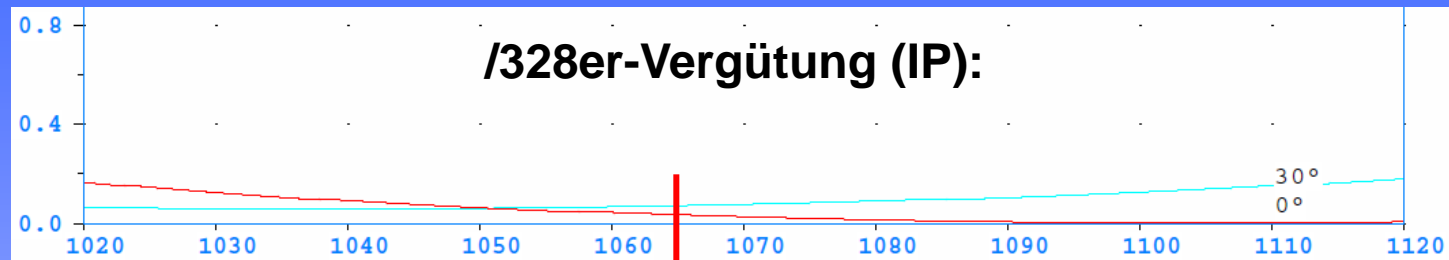
### Optik

Flächen:

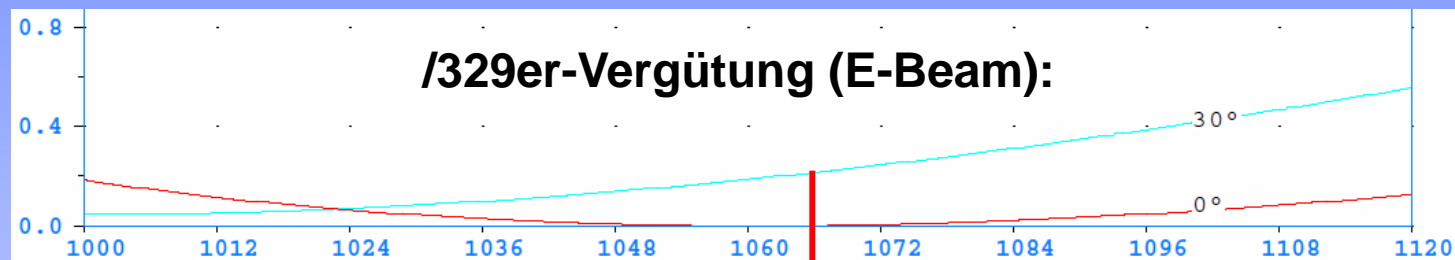
- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- **Vergütung**

Material:

- BK7
- Quarz
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren



1064nm



1064nm

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Material: Ergebnis vorangehender Sitzungen

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

- **BK7**
- **Quarz**
  - Sorte
  - OH-Gehalt
  - Sonstige Faktoren

Änderung des **Fokus-Shifts** für folgende Fokussiersysteme bei Erhöhung der Laserleistung von 100W auf 1000W:

System	Artikel-Nr.	Fokusgrößen-Änderung	Fokus-Shift
BK7-System	S6ASS5090/328	~ 350%	~ 0,7mm
Quarzglas-System	S6ASS5080/328	~ 10%	~ 88 µm
Quarzasphäre	S6ASS7480/328	~ 2%	~ 73 µm

BK7 um **Faktor 8** schlechter als Quarz!

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Bestätigung der Ergebnisse

Ähnliche Ergebnisse die **Absorption** betreffend von der „Optical Society of America“

Laser

Mode

Strahldivergenz

Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

- **BK7**
- **Quarz**
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren

	Coating Material, Deposition Technique, and Optical Thickness							
	SiO <sub>2</sub>			Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				Bare Substrate Typical Values
	EB		IAD	IAD	IP			
	3λ/2	3λ/2	λ/2	3λ/2	3λ/2	3λ/2	3λ/2	
Substrate material								
Fused silica	85	58	29	71	76	46	47	8
CaF <sub>2</sub>					x 44			15
BK7			390	2450	3340	2930	2990	52
BK7			360		3420			52
BK7					2770			52
C 20-36	330	310	1540					69
C 20-36			1460					69
Evaporation	1	2	3	4	5	6	7	

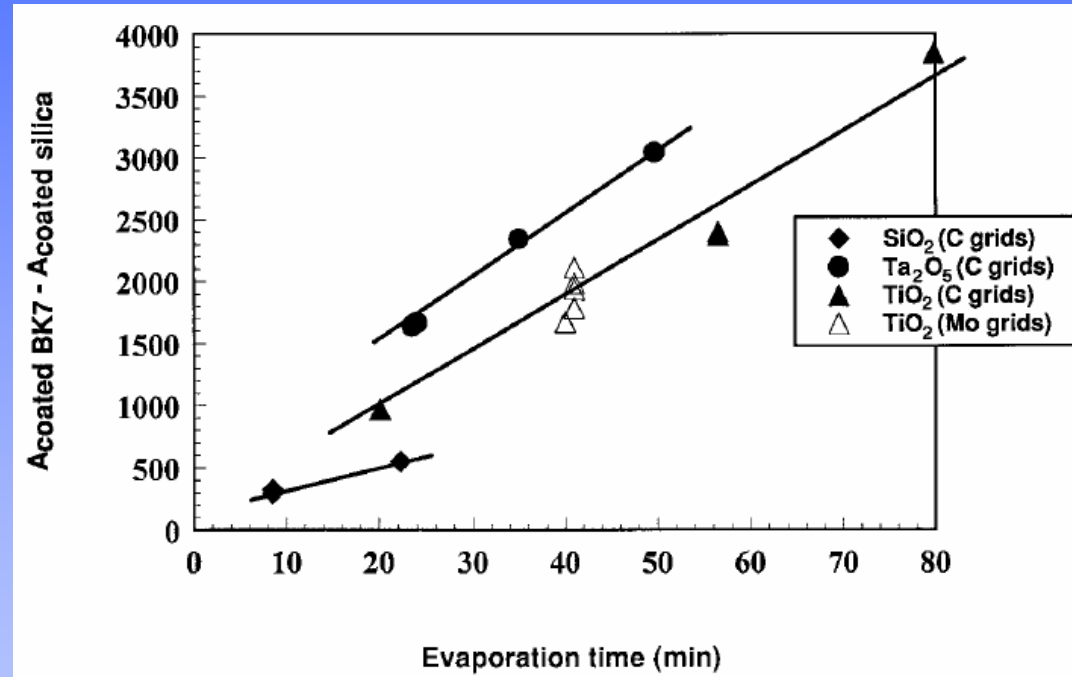
*Note: Handwritten annotations in the table include a green arrow from 76 to 46 labeled 'x 9,5', a red arrow from 46 to 3340 labeled 'x 44', a green arrow from 47 to 2990 labeled 'x 6,5', and a red arrow from 2990 to 2770 labeled 'x 53'.*

Das Material ist nicht alleine Ausschlag gebend für die hohe Absorption.

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Weitere Einflüsse

Absorptionsdifferenzen bei gleichzeitiger Vergütung von BK7 und Quarz:



Schichtdicken für Absorptionsdifferenz zwischen BK7 und Quarz nicht Ausschlag gebend, da diese in gleichem Maße steigen.  
→ Grenzflächenabsorption, Near-Surface-Absorption

Laser

Mode

Strahldivergenz

Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

- **BK7**
- **Quarz**
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Reduzierung der Absorption durch Tempern

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

- **BK7**
- **Quarz**
- Sorte
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren

	Coating Material, Deposition Technique, Substrate, and Optical Thickness							
	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>							
	IP				IAD			
	BK7		Fused Silica		BK7		Fused Silica	
	4H	6H	6H	8H	4H	4H	4H	SiO <sub>2</sub> EB Fused Silica 6L
Before annealing ( $\times 10^{-6}$ )	3260	3200	3770	3300	50	1870	51	85
After annealing ( $\times 10^{-6}$ )	90	105	100	110	34	750	41	49
Annealing conditions	48 h, 400 °C	48 h, 400 °C	48 h, 400 °C	48 h, 400 °C	48 h, 400 °C	45 min, 200 °C	45 min, 200 °C	24 h, 250 °C

→ **Near-Surface-Absorption** ist für großen Teil der Absorption verantwortlich. (Quelle: „Substrate effects on absorption of coated surfaces“ Optical Society of America)

→ Energiereiche (UV-)Strahlung beim Beschichten bricht bestehende Verbindungen auf.

→ Die getrennten Ionen verbinden sich neu

→ Lokale Dichteunterschiede

→ **Brechzahlunterschiede!**

→ Reversibel durch Tempern

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Glassorten

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

- BK7
- Quarz
- **Sorte**
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren

Asphärische Fokussierlinsen  $f=200$  (S6ASS742 $y/xxx$ ) aus verschiedenen **Materialien**  $y$ :

Nr.	Bezeichnung	Blasen und Einschlüsse	$\Delta n / \Delta T$ in 1/K	OH-Gehalt in ppm	Andere Verunreinigungen
7420	Corning 7980 0F	$\leq 0.03 \text{ mm}^2$	$9.6 \cdot 10^{-6}$	$\leq 1000$	$\leq 1 \text{ ppm}$
7421	Infrasil 302	$\leq 0.10 \text{ mm}^2$	$9.8 \cdot 10^{-6}$	$\leq 8$	$\leq 25,9 \text{ ppm}$
7422	Suprasil 3001	$\leq 0.03 \text{ mm}^2$	$10.5 \cdot 10^{-6}$	$\leq 1$	$\leq 0,065 \text{ ppm}$

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Glassorten

### Laser

Mode

Strahldivergenz

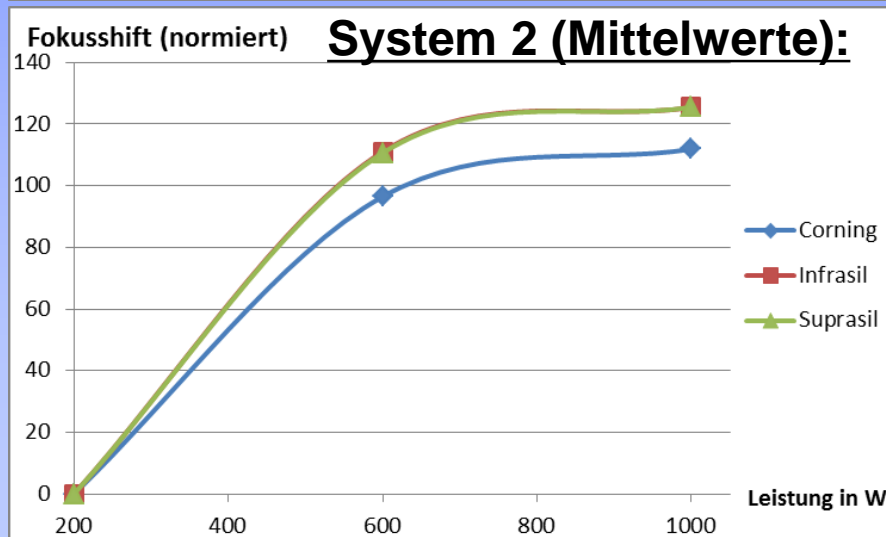
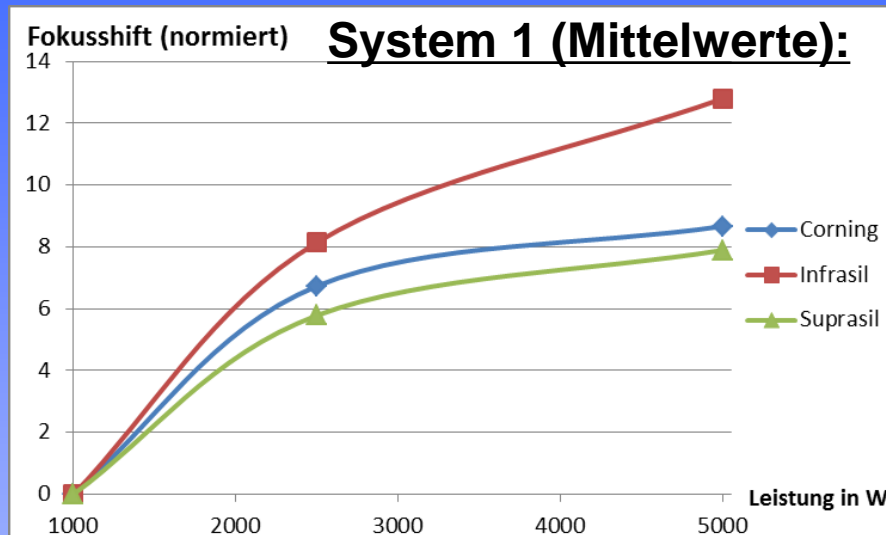
### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

- BK7
- Quarz
- **Sorte**
- OH-Gehalt
- Sonstige Faktoren



- Je kleiner der Strahl-Ø, desto größer der Fokusshift
- Sättigung
- Fehlerbalken unnorm. ~0,1mm  
→ System 1: ±2,5  
→ System 2: ±13
- Tendenz erkennbar: Infrasil ↘  
Corning & Suprasil ↗ mit leichtem Vorteil für Corning

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## OH-Gehalt

Vermutung: Hoher OH-Gehalt → großer Fokusshift

**Falsch!**

Corning mit 1000ppm, scheint besser zu sein als Infrasil mit 8ppm.

Im Gegenteil, Patent DE112005003308T5 zählt etliche Schriften auf, in denen nachgewiesen wurde, dass ein OH-Gehalt >50ppm das Glas resistenter gegenüber lokalen Dichteschwankungen macht.

Laser

Mode

Strahldivergenz

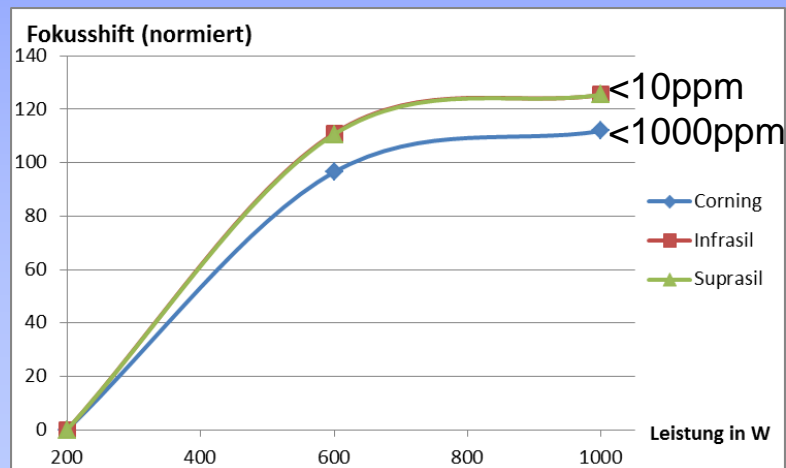
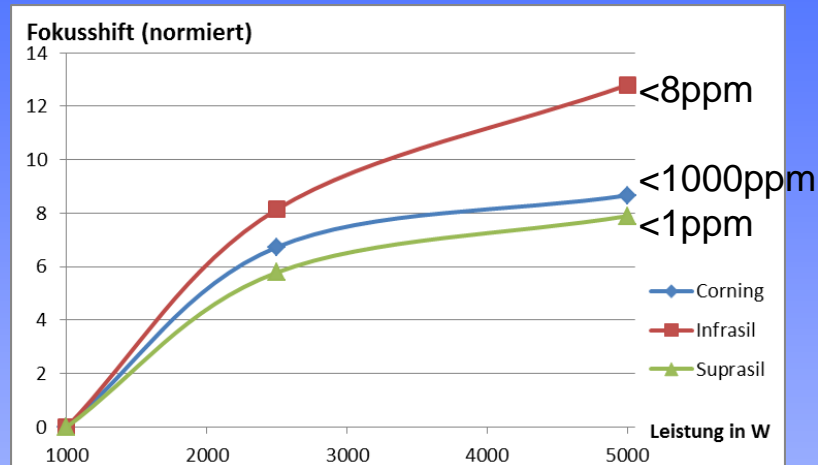
Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

- BK7
- Quarz
- Sorte
- **OH-Gehalt**
- Sonstige Faktoren



# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Fokusbereich

### Laser

Mode

Strahldivergenz

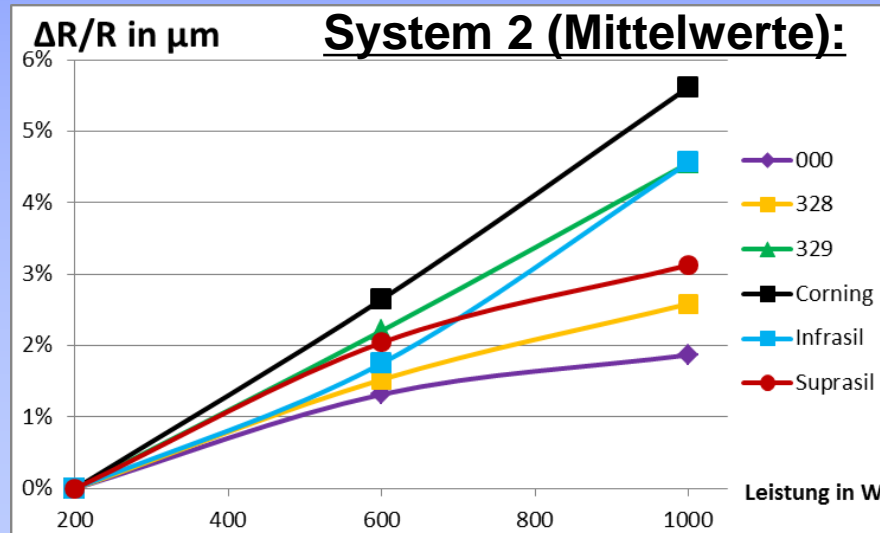
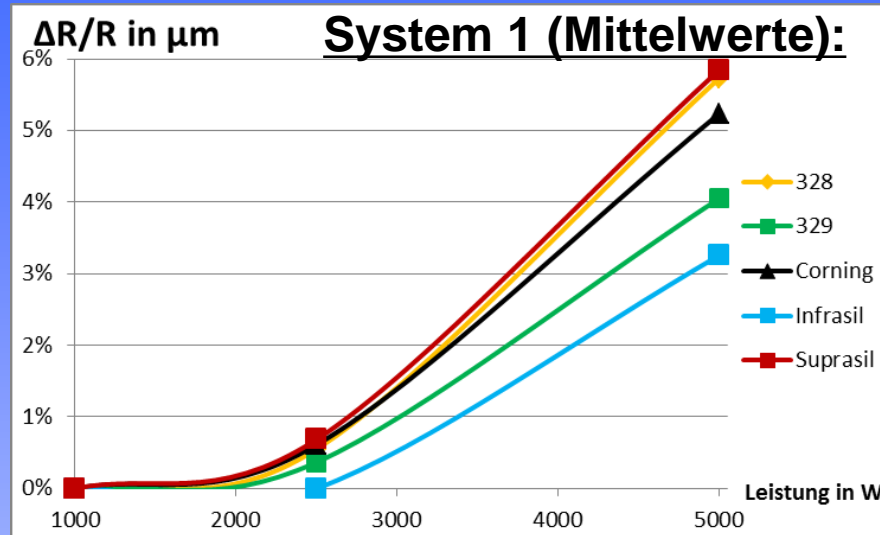
### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

- BK7
- Quarz
- Sorte
- OH-Gehalt
- **Sonstige Faktoren**



- Änderung des Durchmessers bei beiden Systemen etwa im gleichen Bereich (2-6%)
- Keine eindeutige Aussage möglich, welches Material oder Vergütung am besten ist.
- Unvergütete Linsen scheinen Vorteile zu haben (System 1: <1% für 1000W)

Optics

■ made

■ in

■ Germany

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

## Ausblick

### Laser

Mode

Strahldivergenz

### Optik

Flächen:

- Anzahl
- Sauberkeit
- Rauigkeit
- Vergütung

Material:

- BK7
- Quarz
  - Sorte
  - OH-Gehalt
- **Sonstige Faktoren**

Weitere **Untersuchungen** sollen folgen:

- Einfluss der **Oberflächengüte**

- Weitere **Separation** von Vergütungseffekten zu Materialeffekten

# Fokus-Shift bei Hochleistungslasern

*It is over now!*



*Our next exhibition is:  
Photonics West 2011*



*25.01. - 27.01.2011  
North Hall / Booth 4608*