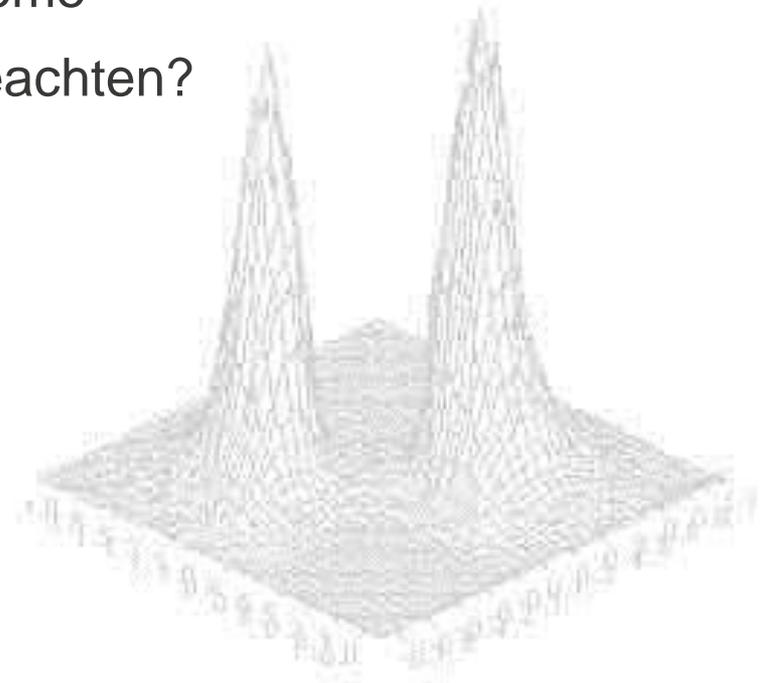


Durchführung einer Messung **Wie wird`s gemacht?**

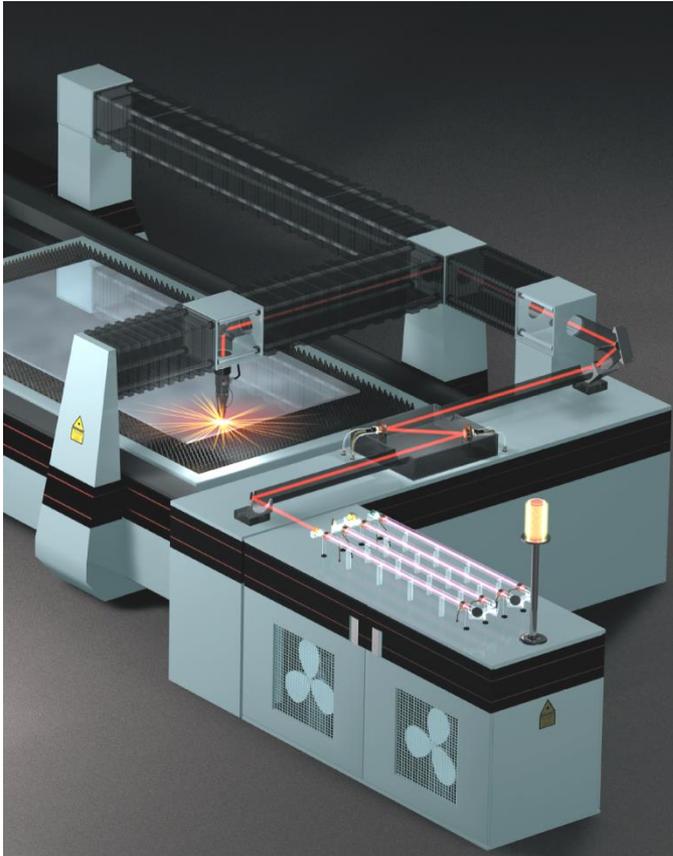
Dr. Harald Schwede

Übersicht

1. Einleitung
2. Von der Problemanalyse zum Handeln
3. Auswahl geeigneter Messsysteme
4. Was ist bei der Messung zu beachten?
5. Zusammenfassung



Virtuelles Beispielsystem

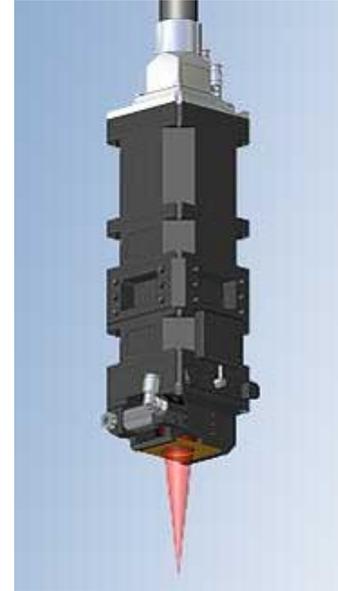


- Wo wird gemessen?
 - Zugänglichkeit
 - sichere Positionierung
- Was wird aus der Sicherheit?
 - Weg von Laserklasse I zu IV
- Zeit für die Vermessung?
 - Wasserversorgung
 - Maschinensteuerung

Die reale Messaufgabe



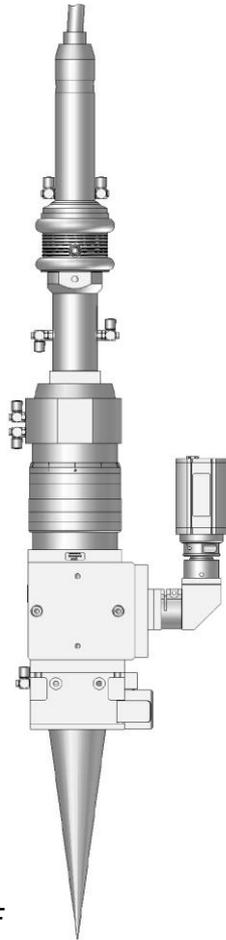
Source: Volkswagen AG



HIGHYAG

Die Fokussieroptik eines Festkörperlaser mit 1 kW cw Leistung und 300 μm Spot wird untersucht.

Definition der Messaufgabe



TRUMPF

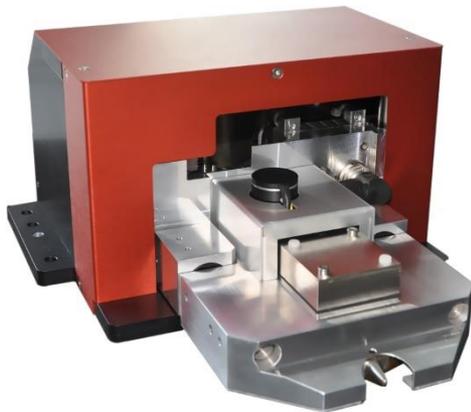
Qualifizierung Fokussierkopf

- Messungen an der Faser
 - Ist-Leistung über Sollwert
 - Nahfeldverteilung
 - Fernfelddivergenz
 - Fehlwinkel
 - Fokus-shift über Sollleistung
- Messungen am Kopf mit/ohne Schutzglas
 - Ist-Leistung über Sollwert
 - Fokusgeometrie und -shift über Sollleistung
- Verlustleistung am Kopf

Von der Analyse zur Umsetzung

Die Auswahl der Messmittel

- Leistung (ISO 11554): Die Kenngröße jeder Laserbearbeitung
- Fokus (ISO 11146): Das eigentliche Werkzeug für die meisten Laserbearbeitungsprozesse charakterisiert durch Fokusabmessungen und -lage im Raum sowie M^2



Laserleistungsmessung

Anforderungen an die Geräte

- cw-Laser mit hoher mittlerer Leistung
- hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit
- Strahlage- und Strahldurchmesserunabhängigkeit
- hohe Leistungsdichte möglich
- hohe Zeitauflösung hier von untergeordneter Bedeutung

Die Systeme zur Laserleistungsmessung unterteilen sich in

- thermo-elektrische Systeme
- kalorimetrische Systeme



Kalorimetrische Messsysteme

Absorbierte Laserstrahlung erwärmt den Leistungsmesser
 Messwerte sind: Temperaturerhöhung und gegebenenfalls Durchfluss

Prinzipbild des Stahlgangs im PowerMonitor mit zylindrischem Absorber und Eintrittsspiegel



- hohe mittlere Leistung
- Referenzverfahren
- durch Geometriefreiheit bei der Strahlformung sind hohe Leistungsdichten möglich



- Kontinuierliche Messung (z.B. PowerMonitor)
- Ballistische Messung (z.B. PocketMonitor)

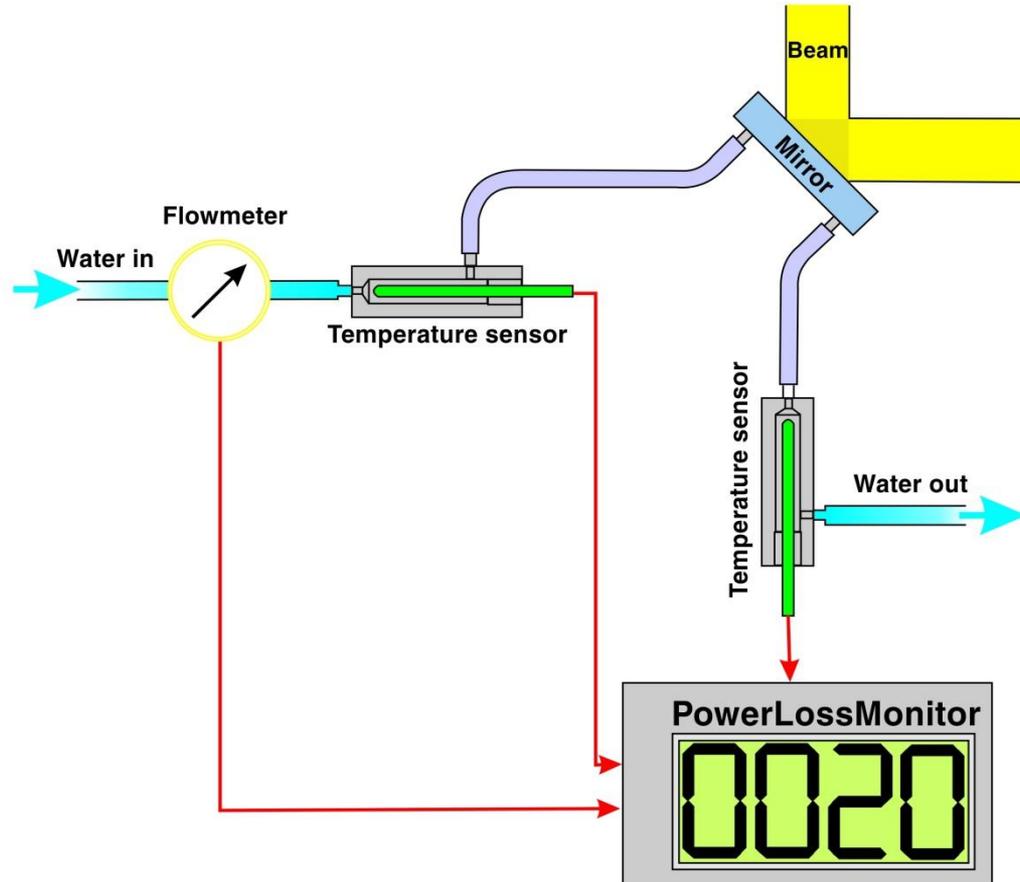
Randbedingungen der Leistungsmessung

- Kühlwasser: typ. 0,7 bis 1 l/min pro kW cw Leistung für kontinuierliche Messungen
- Maximale Leistungsdichte bei der Absorption auf ebenen Flächen cw typ. 1 kW/cm²
- Zeitauflösung im Sekundenbereich
- Hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit ermöglichen Vergleichsmessungen direkt aus der Faser oder hinter dem Fokussierkopf



PowerMonitor – Absorber nach Betrieb ohne Kühlung

PowerLossMonitor



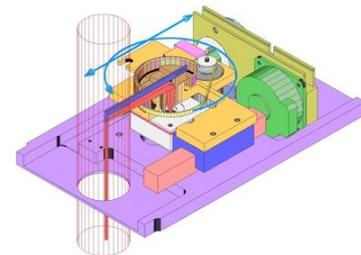
Kalorimetrische Messung der Leistungsverluste in wassergekühlten optischen System z. B.:

- der Strahlführung
- am Fokussierkopf
- auch während der Bearbeitung

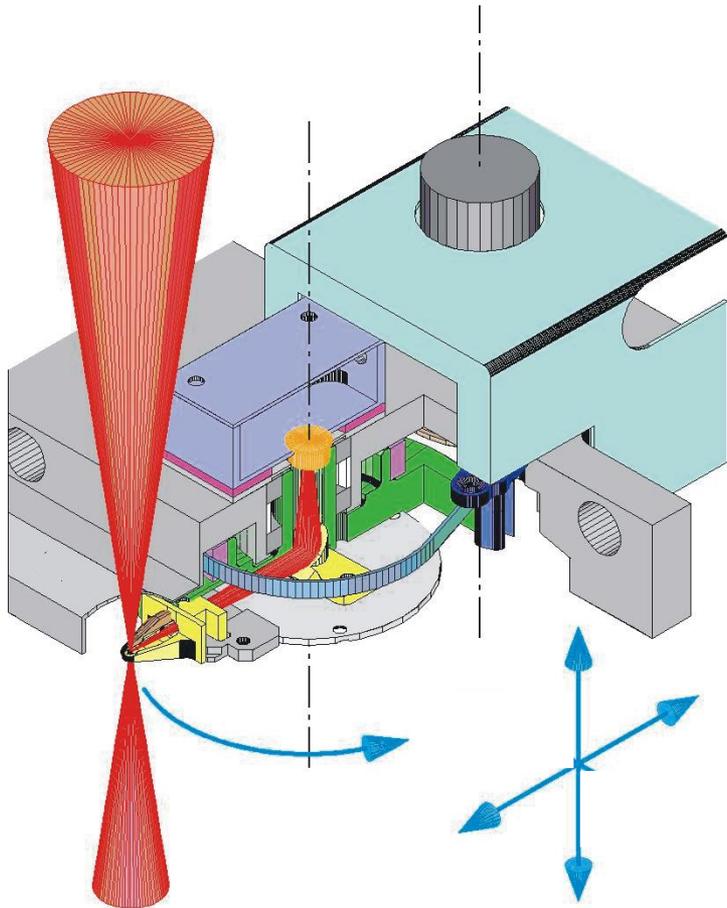
Kaustikmessung - die Anforderungen

Bestimmung: Strahlage, Strahldurchmesser und M^2 eines cw-Festkörperlaser in der kW-Klasse mit einem Spot vom $300\ \mu\text{m}$

- Burn-in
- Mechanisch-abtastende Systeme
(bewegte Pinholes, Schneiden, Schlitzblenden)
- 2-dimensionale Arrays
(CCD-Kamera, Pyro-Arrays, CMOS-Kamera)



Rotierendes Pinhole



FocusMonitor

- automatisierte Messung durch integrierte z- Achse
- die komplette Leistungsdichteverteilung bei voller Leistung (Multi-kW)
- Wellenlänge bis $10,6 \mu\text{m}$
- hohe Divergenz
- begrenzte räumliche Auflösung
minimale Spots: $70\text{--}80 \mu\text{m}$
- gepulste Strahlung nur eingeschränkt messbar
- Zerstörschwellen der Messspitzen begrenzt

Einsatzbereich des FocusMonitors

Messspitzen:

- Max. Leistungsdichte:
CO₂: 20–25 MW/cm²
FK: 8–10 MW/cm²



- Detektoren:
Pyro (DFCL)
Si-Photodioden (DFY...)
Andere HL (DFH...)

	Leistung / kW (CO ₂)								
	0,10	0,50	1,00	1,50	2,00	4,00	6,00	8,00	12,00
60	7,07	35,37	70,74	106,10	141,47	282,94	424,41	565,88	848,83
70	5,20	25,98	51,97	77,95	103,94	207,88	311,81	415,75	623,63
80	3,98	19,89	39,79	59,68	79,58	159,15	238,73	318,31	477,46
90	3,14	15,72	31,44	47,16	62,88	125,75	188,63	251,50	377,26
100	2,55	12,73	25,46	38,20	50,93	101,86	152,79	203,72	305,58
125	1,63	8,15	16,30	24,45	32,59	65,19	97,78	130,38	195,57
150	1,13	5,66	11,32	16,98	22,64	45,27	67,91	90,54	135,81
175	0,83	4,16	8,32	12,47	16,63	33,26	49,89	66,52	99,78
200	0,64	3,18	6,37	9,55	12,73	25,46	38,20	50,93	76,39
225	0,50	2,52	5,03	7,55	10,06	20,12	30,18	40,24	60,36
250	0,41	2,04	4,07	6,11	8,15	16,30	24,45	32,59	48,89
275	0,34	1,68	3,37	5,05	6,73	13,47	20,20	26,94	40,41
300	0,28	1,41	2,83	4,24	5,66	11,32	16,98	22,64	33,95
325	0,24	1,21	2,41	3,62	4,82	9,64	14,47	19,29	28,93
350	0,21	1,04	2,08	3,12	4,16	8,32	12,47	16,63	24,95
375	0,18	0,91	1,81	2,72	3,62	7,24	10,86	14,49	21,73
400	0,16	0,80	1,59	2,39	3,18	6,37	9,55	12,73	19,10
425	0,14	0,70	1,41	2,11	2,82	5,64	8,46	11,28	16,92
450	0,13	0,63	1,26	1,89	2,52	5,03	7,55	10,06	15,09
475	0,11	0,56	1,13	1,69	2,26	4,51	6,77	9,03	13,54
500	0,10	0,51	1,02	1,53	2,04	4,07	6,11	8,15	12,22
525	0,09	0,46	0,92	1,39	1,85	3,70	5,54	7,39	11,09
550	0,08	0,42	0,84	1,26	1,68	3,37	5,05	6,73	10,10
575	0,08	0,39	0,77	1,16	1,54	3,08	4,62	6,16	9,24
600	0,07	0,35	0,71	1,06	1,41	2,83	4,24	5,66	8,49
625	0,07	0,33	0,65	0,98	1,30	2,61	3,91	5,22	7,82
650	0,06	0,30	0,60	0,90	1,21	2,41	3,62	4,82	7,23
675	0,06	0,28	0,56	0,84	1,12	2,24	3,35	4,47	6,71
700	0,05	0,26	0,52	0,78	1,04	2,08	3,12	4,16	6,24
725	0,05	0,24	0,48	0,73	0,97	1,94	2,91	3,88	5,81
750	0,05	0,23	0,45	0,68	0,91	1,81	2,72	3,62	5,43
775	0,04	0,21	0,42	0,64	0,85	1,70	2,54	3,39	5,09
800	0,04	0,20	0,40	0,60	0,80	1,59	2,39	3,18	4,77

2-dimensionale Arrays

Aktuelle Arrays

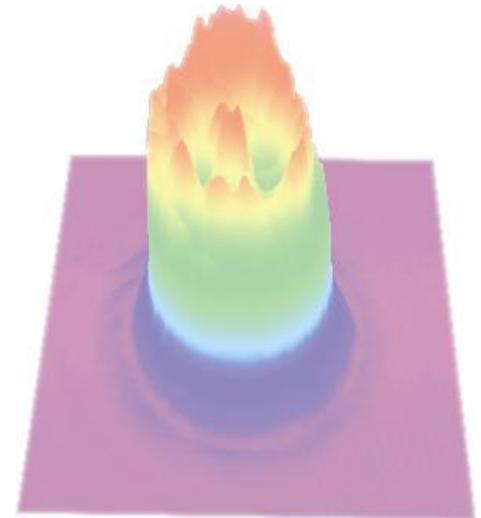
- CCD-Kamera (MicroSpotMonitor und LaserQualityMonitor)
- Pyro-Arrays
- CMOS-Kamera

Vorteile

- gepulste Strahlung einfach messbar
- hohe Repetitionsrate
- hohe Ortsauflösung durch Abbildung
- kein direkter Kontakt mit der Strahlung im Fokus

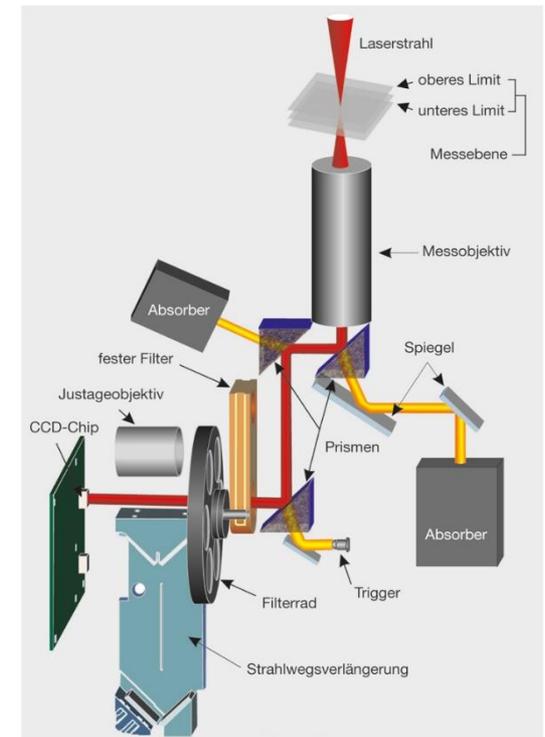
Nachteile

- im Allgemeinen ist Abschwächung nötig
- nur wenige Komplettsysteme verfügbar
- kaum Systeme für $10,6 \mu\text{m}$

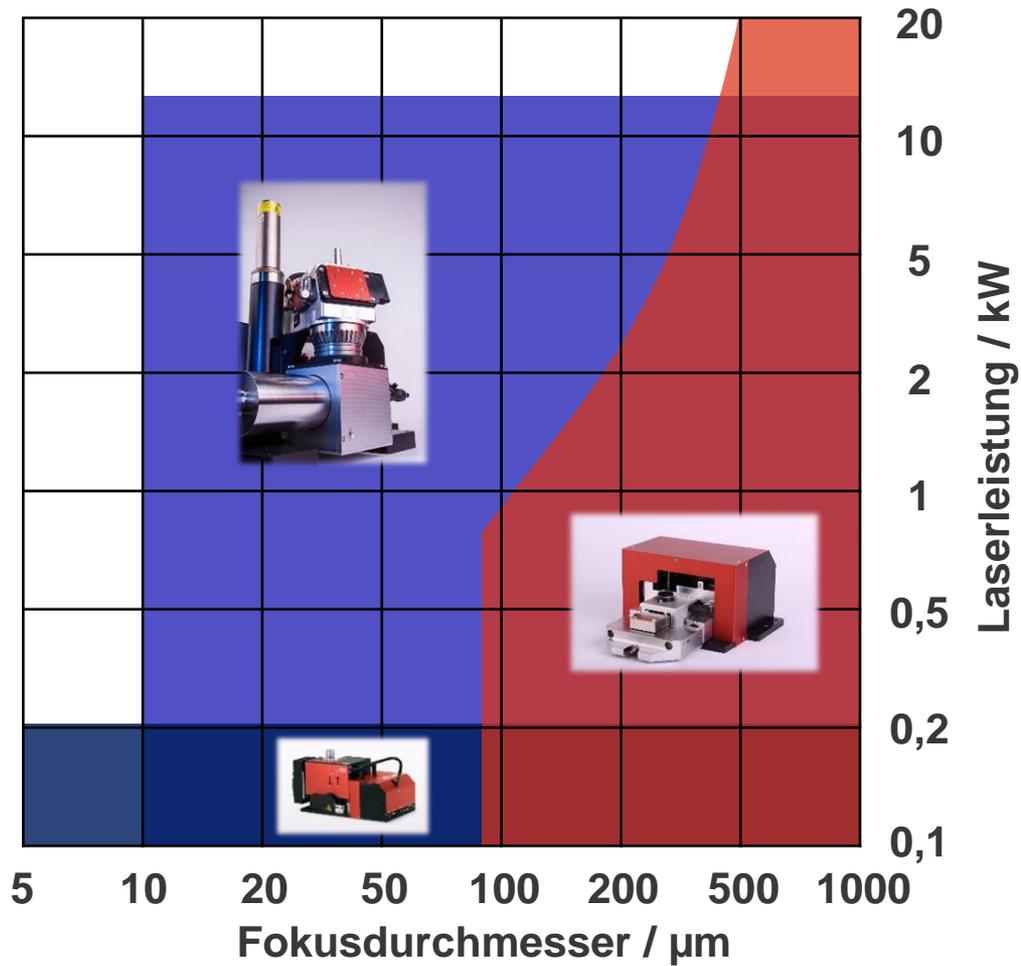


MicroSpotMonitor

Kamerabasierte automatisierte Fokusdiagnostik –
technisches Prinzip



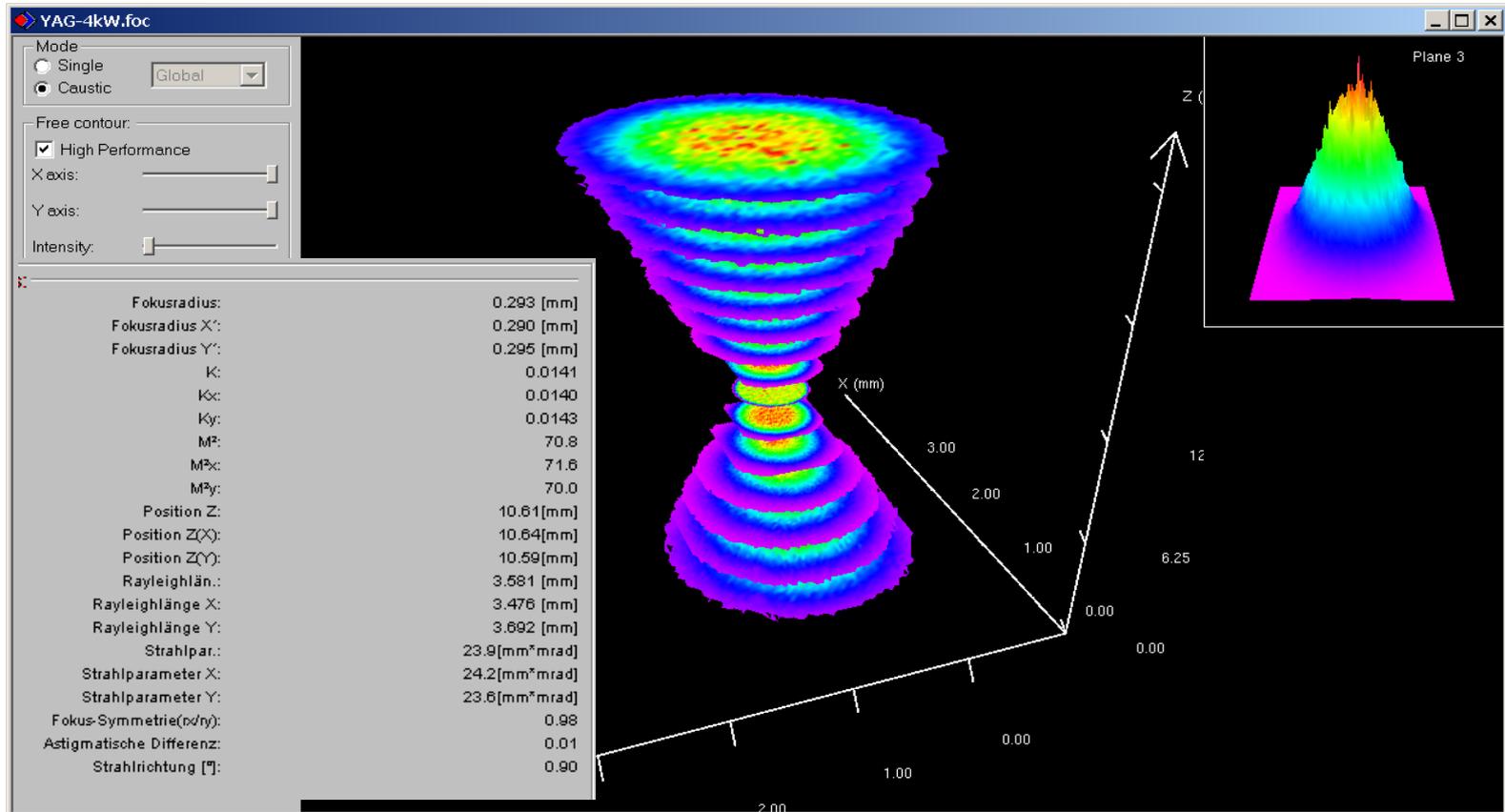
FocusMonitor – HighPower-MSM



Weitere Punkte:

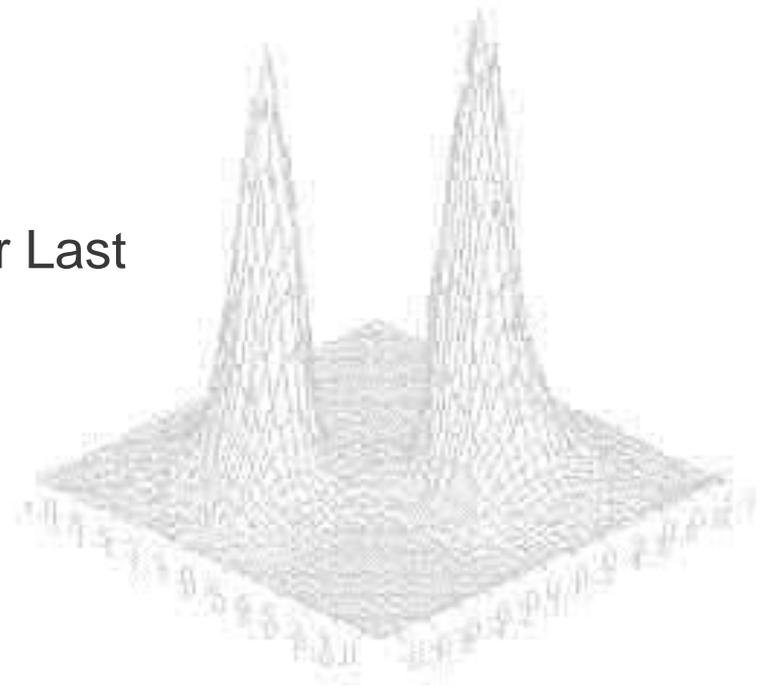
- Wellenlänge
- Divergenz
- Gepulste Strahlung

Typisches Ergebnis der Fokusanalyse

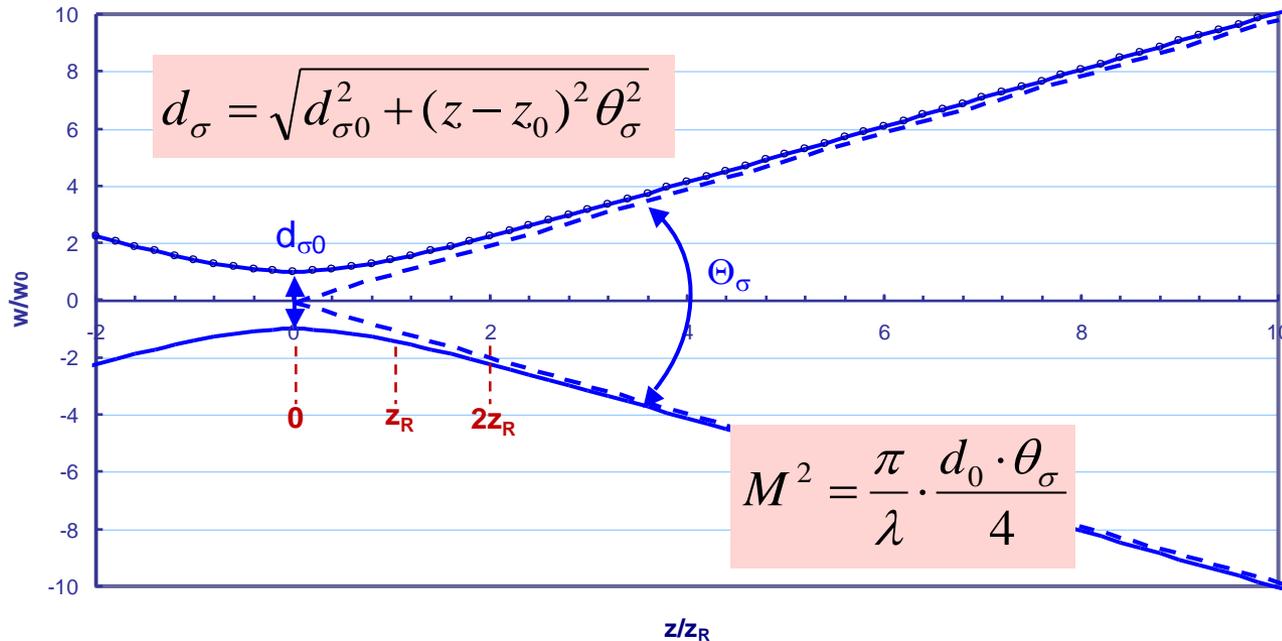


Praktische Strahlvermessung

- Sicherheit und Einrichtung!
- Welcher z-Bereich ist relevant? (ISO 11146)
- Füllfaktoren (ISO 11146)
- Signal-Rausch-Verhältnis
- Automatischer Konsistenz-Check
- Fokusvermessung unter optischer Last



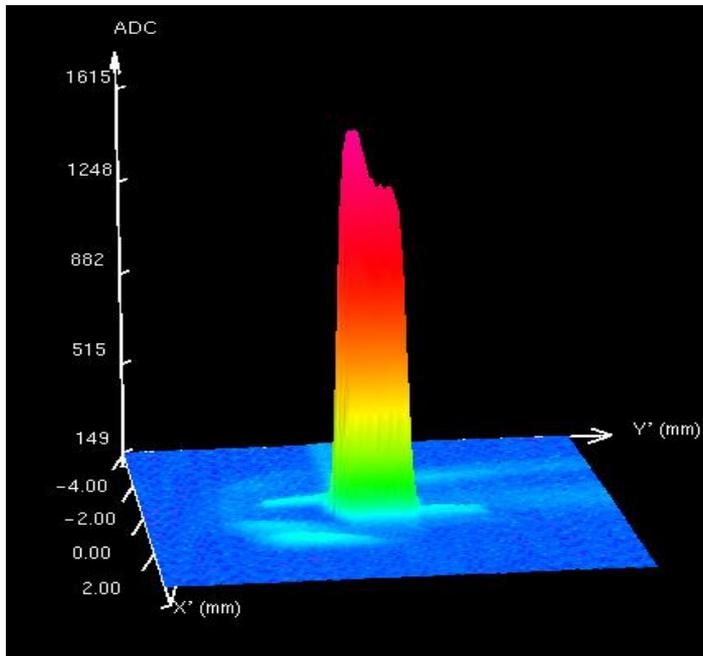
Auswahl des z-Bereichs



Min. 5 Messungen innerhalb $\pm 1 z_R$ + Min. 5 Messungen entfernter als $2 z_R$

Reale Fokusgeometrie – ist oft nur begrenzt zugänglich

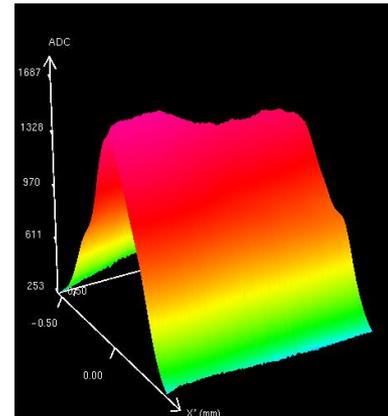
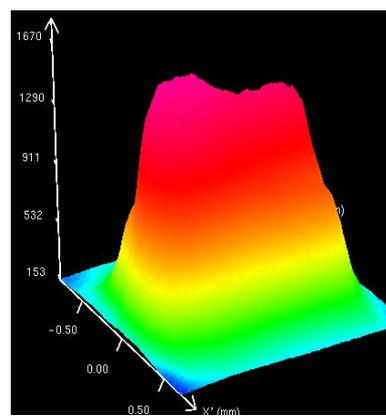
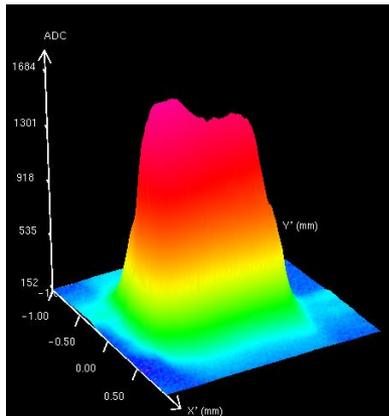
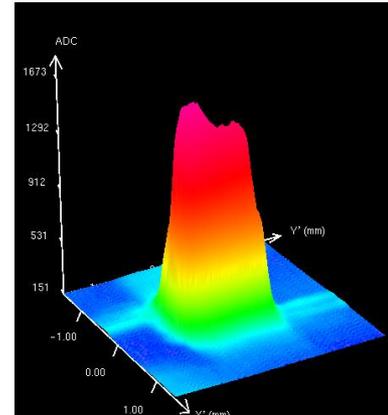
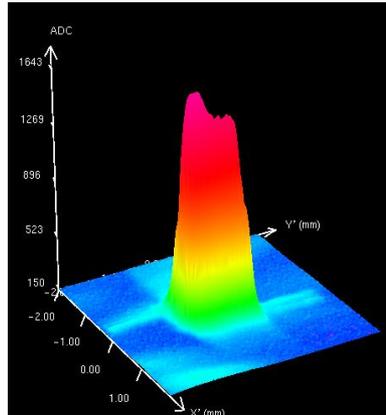
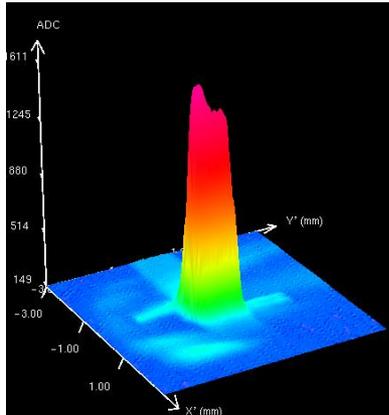
Wie groß ist der Strahl?

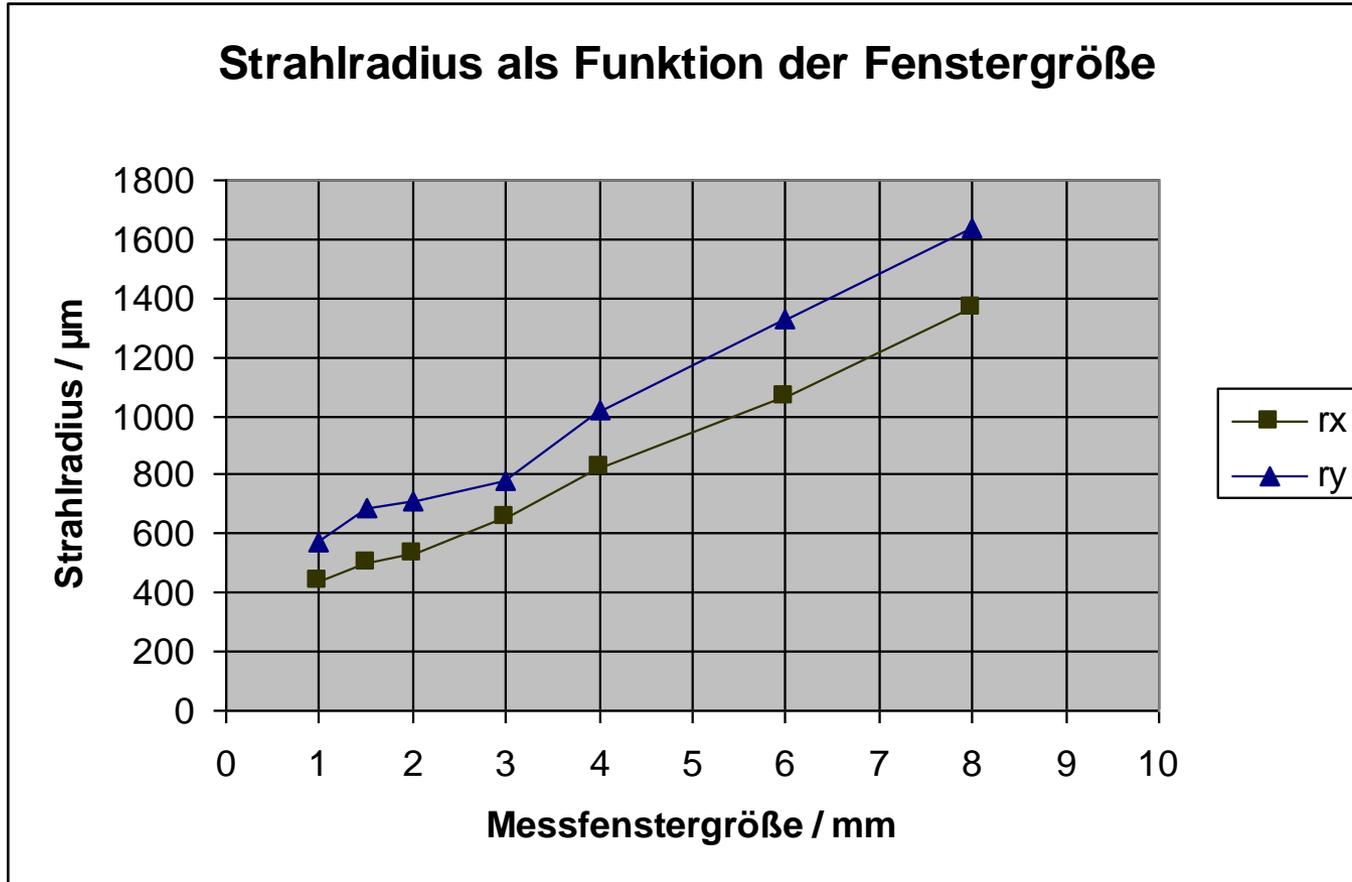


Abhängig vom Messbereich

- ISO 11146 empfiehlt: 3 x Durchmesser
- In der Praxis sind oft kleinere Messbereiche sinnvoll
- insbesondere bei geringem Signal-Rausch-Verhältnis
- Typischerweise schlägt die Software LDS sinnvolle Werte vor

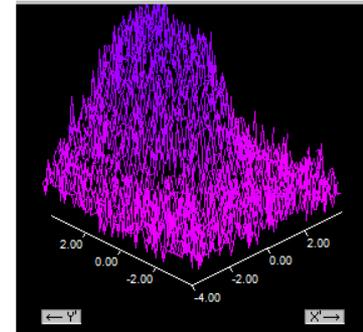
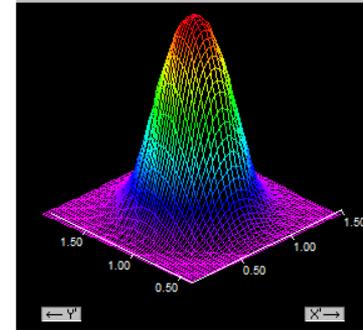
Fenstergrößen/Randfelder I



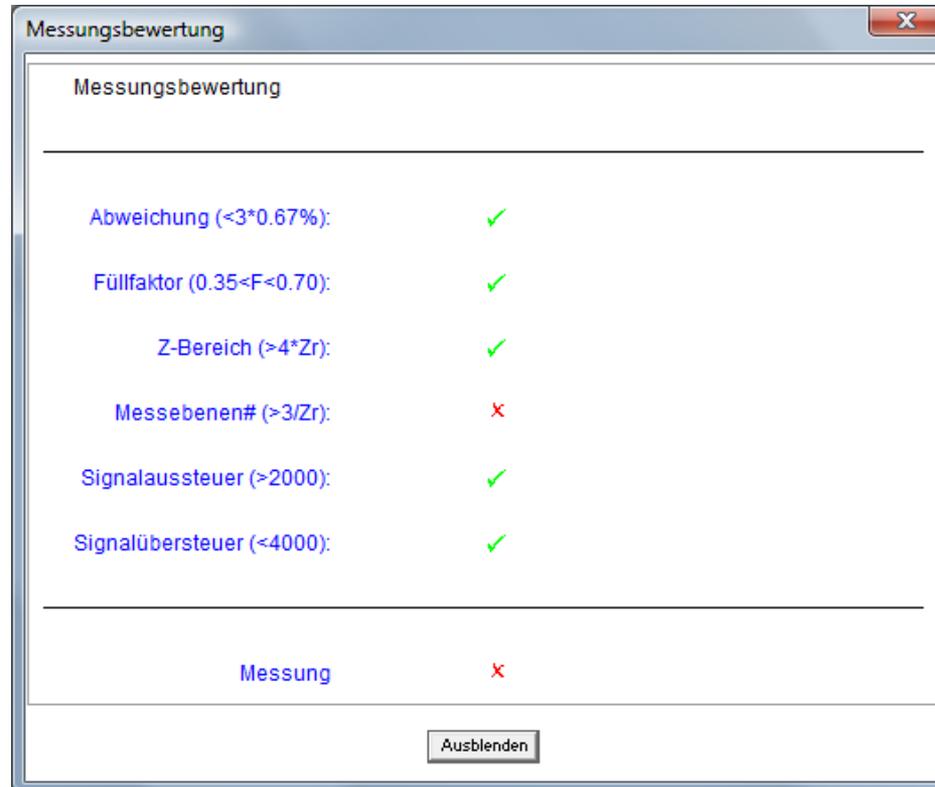


Zwischen Rauschen und Sättigung

- Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) – besser 100:1 als 3:1
- FocusMonitor
 - 12 bit A/D-Wandler + Verteiler:
effektiv etwa 16.000 counts.
 - Detektoren (Rauschen: 5–20 cts)
 - Empfindlichkeit der Spitzen entsprechend wählen
- HighPower-MSM, optimale Aussteuerung und S/N durch:
 - automatisierte Integrationszeitsteuerung
 - zuschaltbare Neutralglasfilter



Messbewertung MSM

A screenshot of a software window titled "Messungsbewertung". The window contains a table of measurement evaluation results. The table has two columns: the left column lists measurement parameters and their ranges, and the right column shows the status of each parameter with a green checkmark for success and a red 'x' for failure. At the bottom of the window, there is a "Messung" label with a red 'x' and an "Ausblenden" button.

Messungsbewertung	
Abweichung ($<3 \cdot 0.67\%$):	✓
Füllfaktor ($0.35 < F < 0.70$):	✓
Z-Bereich ($>4 \cdot Z_r$):	✓
Messebenen# ($>3/Z_r$):	✗
Signalaussteuer (>2000):	✓
Signalübersteuer (<4000):	✓
Messung	✗

Ausblenden

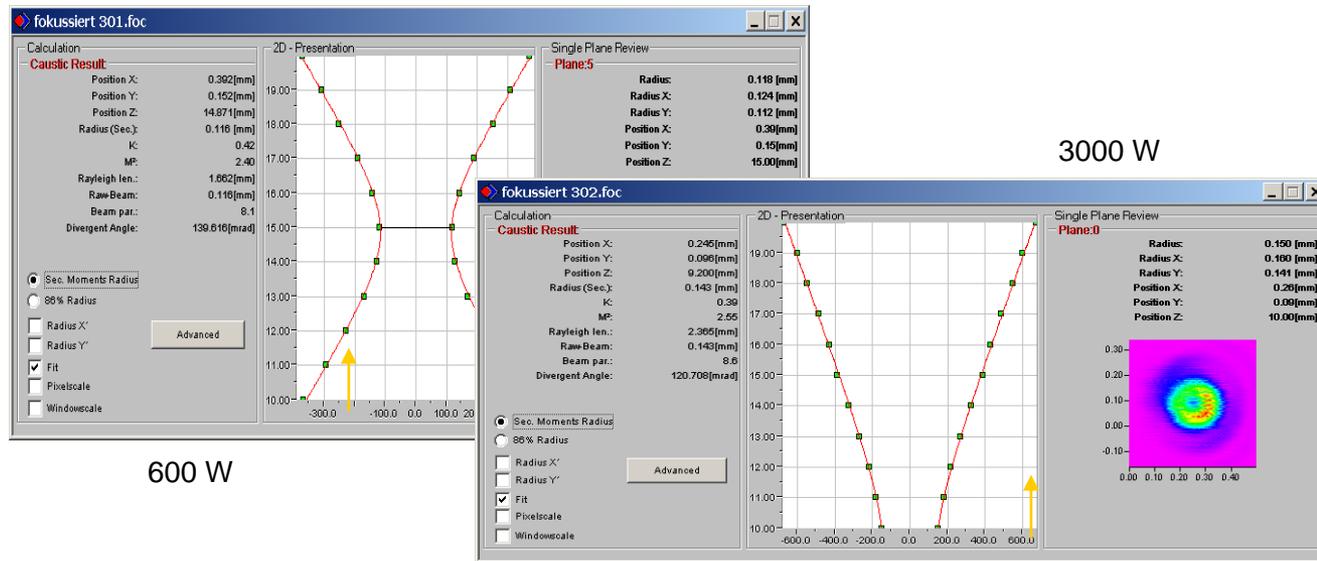
Leistungsabhängigkeit der Fokusparameter

- Wie stabil ist der Strahl eines cw-Laser am Werkstück?
- Absorption der Laserstrahlung verändert das optische Verhalten von transmissiven und reflektiven optischen Komponenten wie Linsen und Spiegel
- Das hat direkte Auswirkungen auf den Fokus
- Zeitlichen Änderungen können viele Messverfahren nur bedingt verfolgen



Strategie bei der Fokusanalyse

Veränderung der Strahlparameter, speziell der Fokuslage, mit der Leistung am Beispiel eines CO₂-Lasers. Messungen der Leistungsabhängigkeit geben oft auch ein qualitatives Maß für die zu erwartende Zeitabhängigkeit.



Zusammenfassung

- Eine Vielzahl von Messsystemen steht bereit
- Die Auswahl der Messgeräte erfordert zunächst eine Analyse der Messaufgabe
- Messen bei Prozessparametern
- Messgrößen und Verfahren sind auf Normale oder Normen rückführbar
- Belastbare Ergebnisse entstehen nur bei bestimmungsgemäßem Einsatz der Messgeräte

Sollten Sie Schwierigkeiten mit der Bedienung der Geräte oder der Interpretation der Ergebnisse haben, unterstützen wir Sie gerne.