



---

*„Optische Sprayuntersuchungen:  
Praktische Durchführung“*

---

Tobias Breuninger  
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

## Optische Sprayuntersuchungen: Praktische Durchführung

### 1. Hochgeschwindigkeits-Visualisierung

- Komponenten
- Schattenverfahren
- Schlierenverfahren

### 2. Phasen-Doppler Anemometrie (PDA)

- Grundlagen
- Versuchsaufbau
- Streuwinkel
- Referenzmessung
- Einfluss der Laserleistung
- Messung im dichten Spray
- Praktische Hinweise

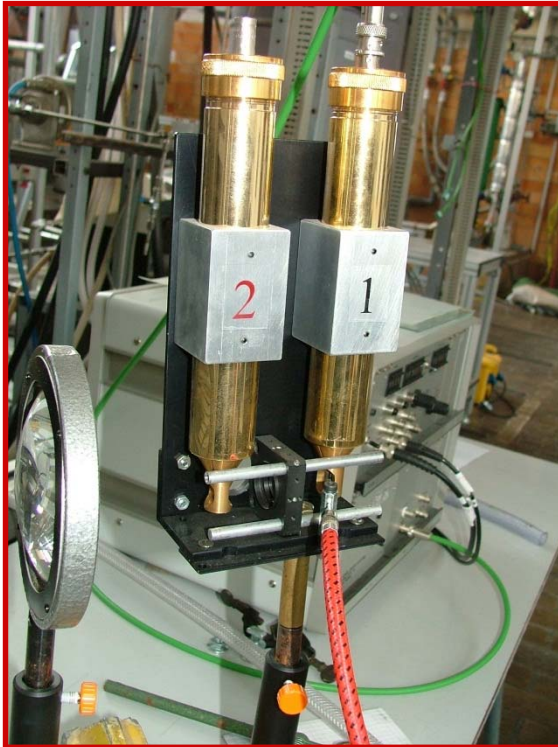
### *HighSpeed Star 6 (Photron FastCam SA1)*

- Auflösung/Aufnahmerate  
1024 x 1024 Px bis 5.4 kHz  
64 x 16 Px bis 675 kHz
- s/w-Chip
- Pixelgröße: 20  $\mu\text{m}$  x 20  $\mu\text{m}$
- Dynamik: 12 bit-CMOS  
(4096 Graustufen)
- min. Shutter: 1/Rate bis 1  $\mu\text{s}$
- interner Speicher: 8 GB



### *Software „DaVis 7.2“*

- Hardwaresteuerung,
- Bildverarbeitung:
  - Skalierung
  - automatisches Ausmessen
  - Hintergrundbild abziehen
  - Mittelbilder, Graustufenprofile
  - Export
  - ...



Zum Vergleich:  
Stroposkop:  
Frequenz: ca. 4 kHz  
Blitzdauer: ca. 10  $\mu$ s

### *Ministrobokin 20 TW Hochgeschwindigkeits Blitz*

- für Schattenverfahren gut geeignet, für Auflichtverfahren nur kleine Bildfelder
- max. Frequenz: 20kHz
- Blitzdauer: ca. 20 ns  
Belichtungszeit wird durch Blitzdauer bestimmt und nicht durch elektronischen Shutter der Kamera
- Funkenstrecke mit ölfreier Druckluft anblasen (ca. 4 bar), um alten Plasmakanal zu entfernen
- Doppelblitz mit geringem Bildabstand (PIV), bis 20 Hz
- Helligkeit von Blitz zu Blitz schwankt: per Davis korrigierbar

Blitzlampe

Linse

Mattscheibe

Objektiv

Kamera



- Blitzlampe, Linse, Messobjekt und Kamera auf einer gemeinsamen optischen Achse ausrichten
- Geeignetes Objektiv auswählen (ggf. mit Zwischenringen)
- Blitzlampe auf Objektiv justieren (ohne Mattscheibe)
- Mattscheibe (Glasscheibe mit Folie) einsetzen und Blitzlampe feinjustieren, bis eine homogene Hintergrund erreicht wird

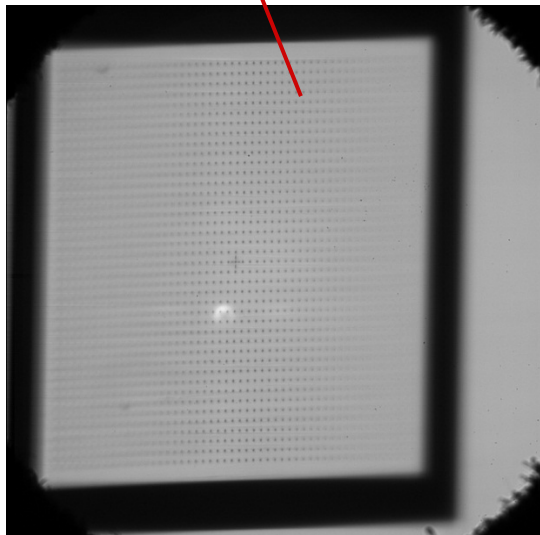
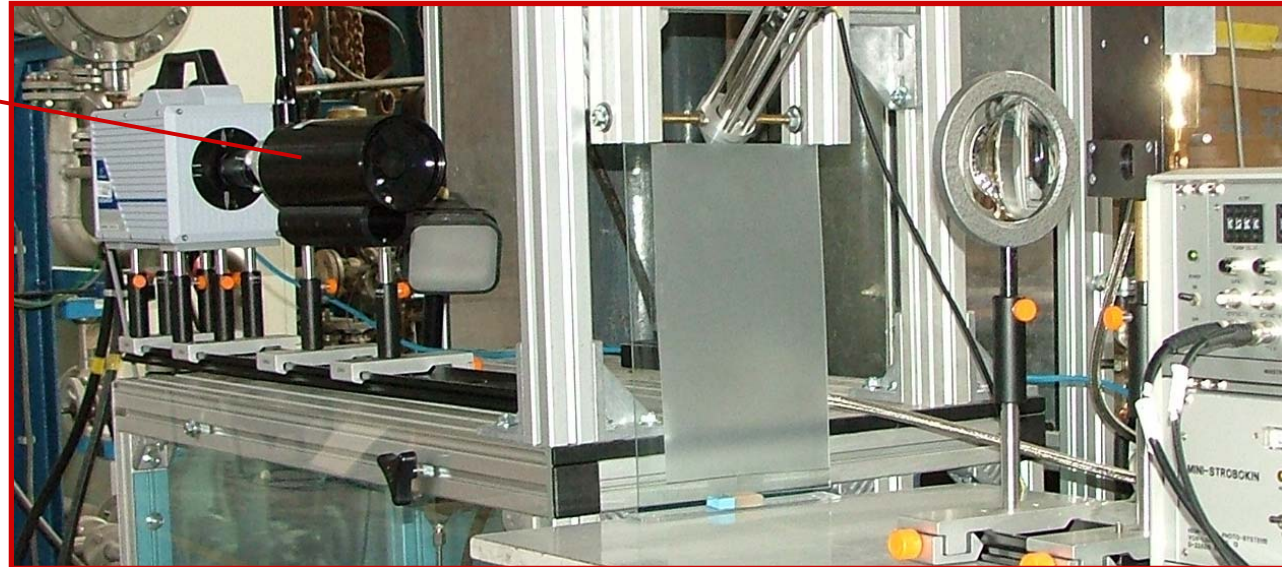
# Hochgeschwindigkeits-Visualisierung

## Schattenverfahren

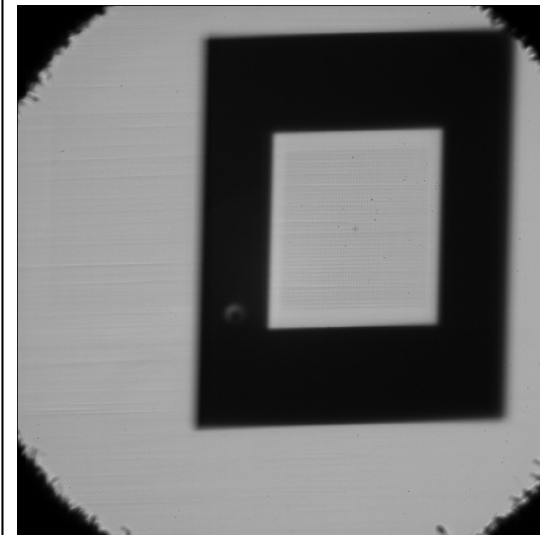
Fernfeldmikroskop  
„Qustar“

max. Auflösung:  
2.6  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$   
(Gesichtsfeld: 2.7 mm)

Kalibrierplättchen



Punktabstand:  
50  $\mu\text{m}$   
Punktdurchmesser:  
12,5  $\mu\text{m}$

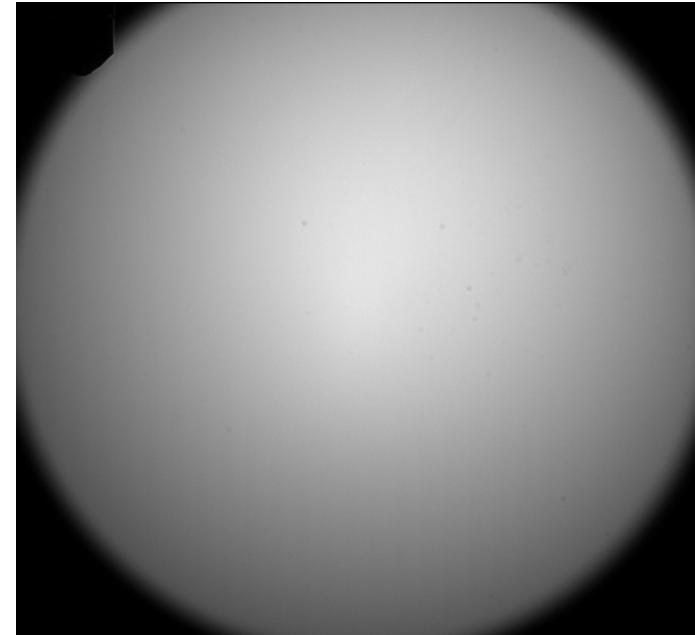


Punktabstand:  
20  $\mu\text{m}$   
Punktdurchmesser:  
5  $\mu\text{m}$

## High-Speed-Diffusor (für High-Speed-Laser)

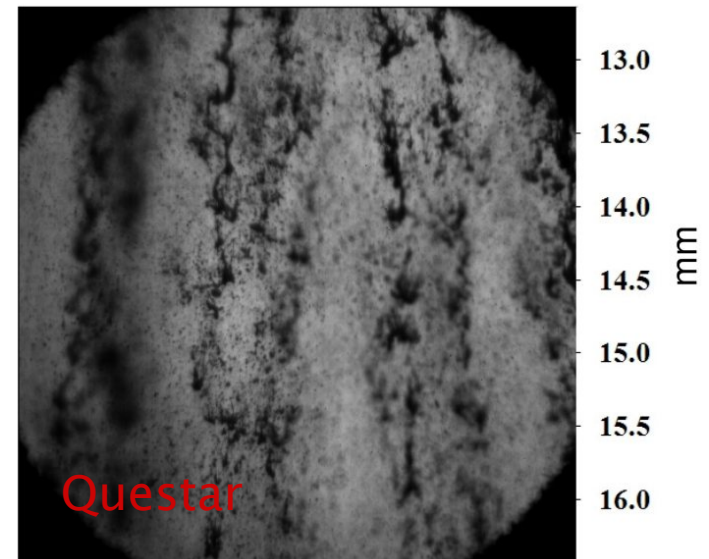
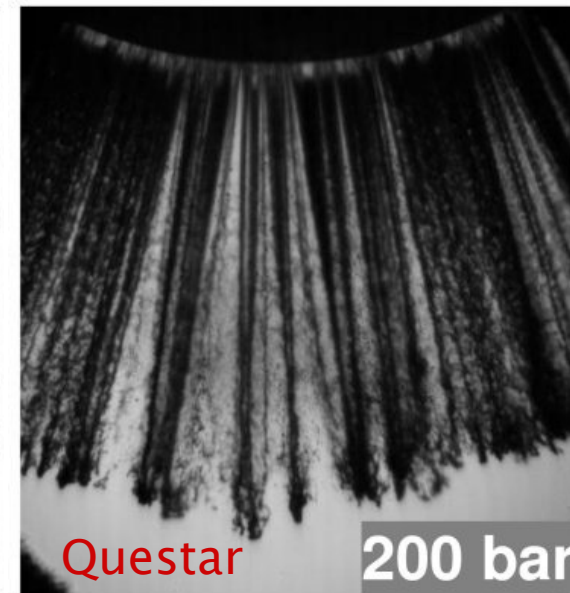
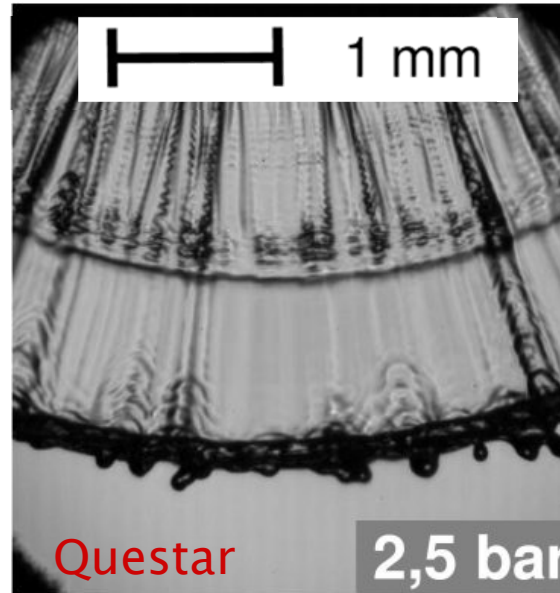


Farbstoff:  
Rhodamin 6G gelöst in Methanol



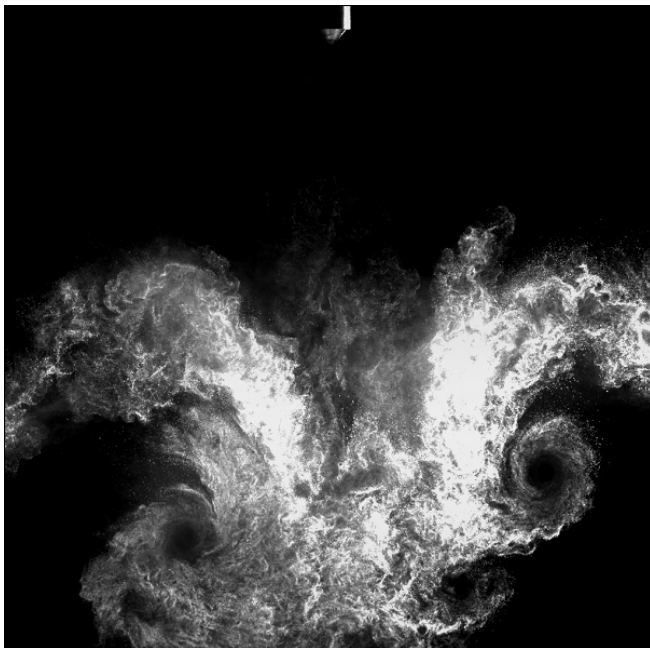
- Gaußförmiges Intensitätsprofil des Laserstrahls
- Gute Reproduzierbarkeit
- Aufwändig, Lasersicherheit

Beispielaufnahmen:



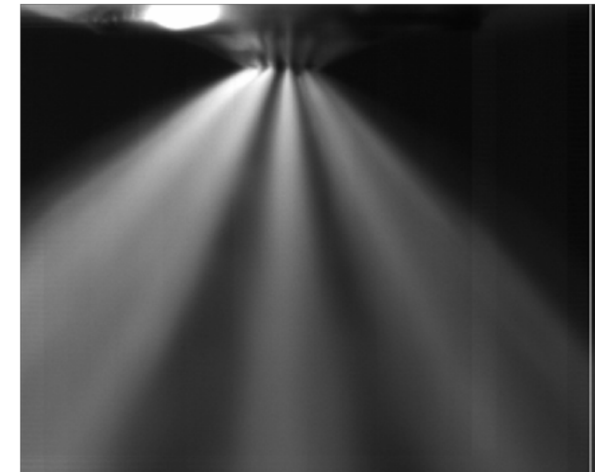
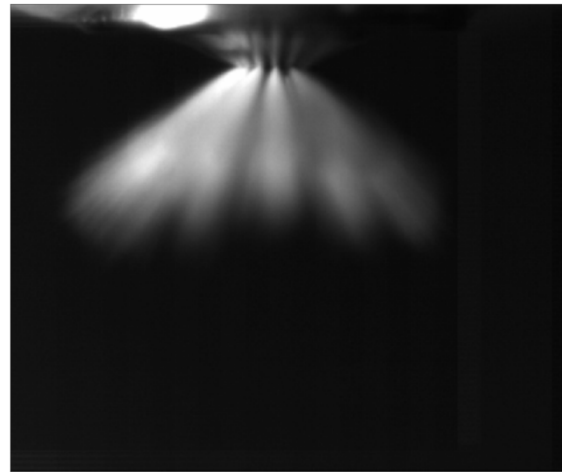


### Lichtschnitt

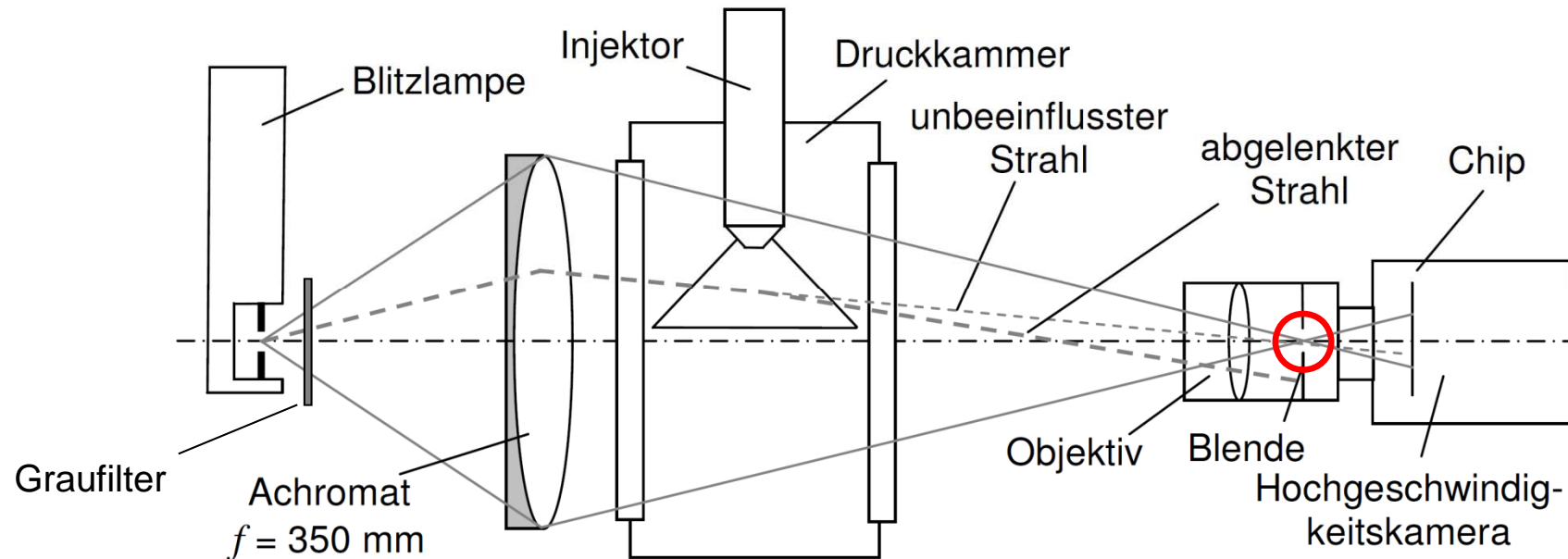


### Auflicht

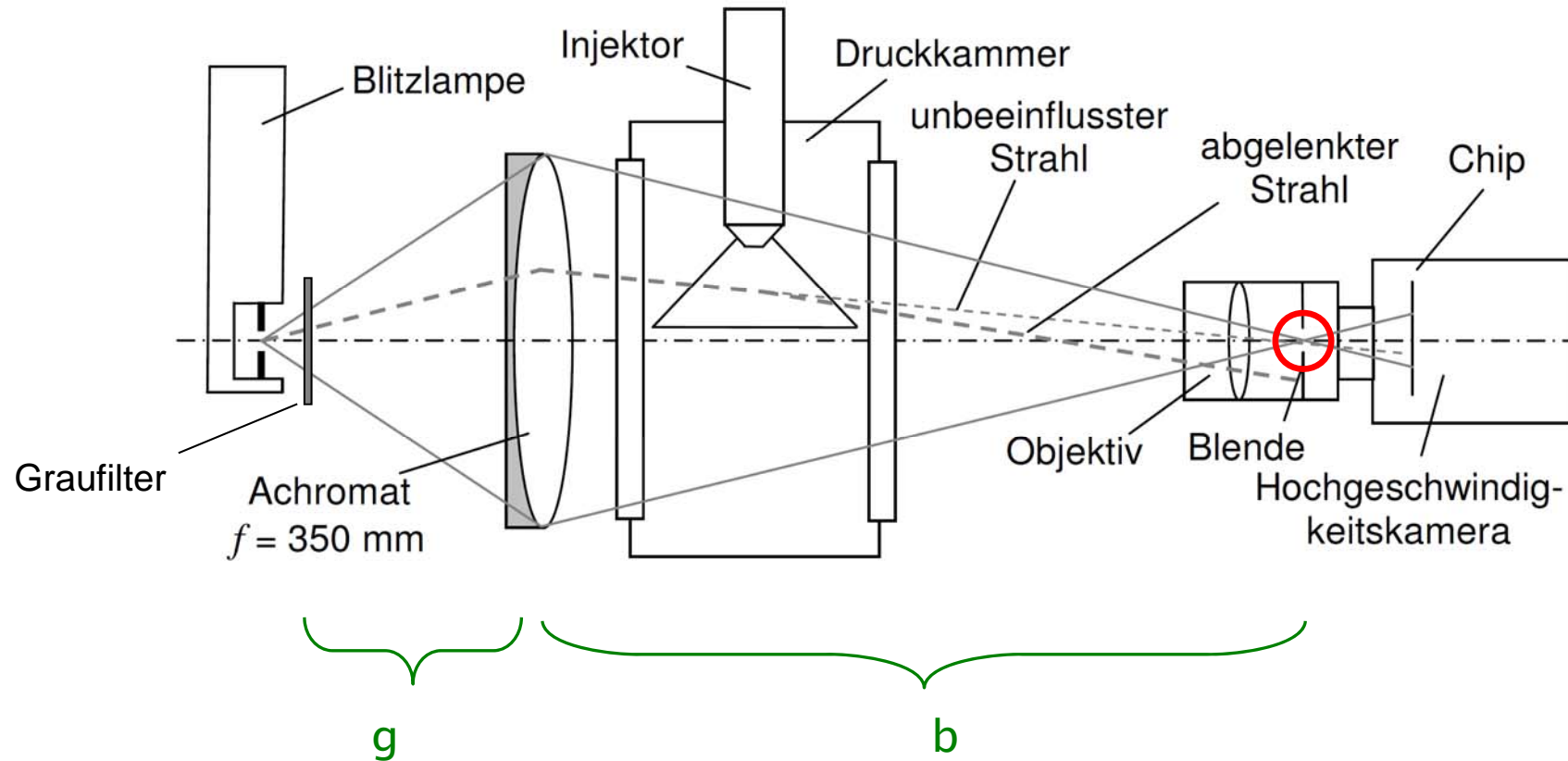
Belichtungszeit wird durch elektronischen Shutter der Kamera bestimmt ( $> 1 \mu\text{s}$ )



*Geike, G.; König, M.; Schmidt, J.:* Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Spraycharakteristik von Injektoren bei der Benzindirekteinspritzung, Diesel- und Benzindirekteinspritzung V, expert verlag, 2009



- Einfacher Schlierenaufbau: Ein-Linsen-System  
Gerichtetes Licht innerhalb der Messstrecke
- Punktlichtquelle wird mittels Achromat auf Objektivblende abgebildet  
Für homogene Ausleuchtung exakt ausgerichtet werden
- Durch Tropfen und Dampf gestreutes Licht kann die Blende nicht passieren und wird als Kontrast dargestellt.
- Lichtmenge (Helligkeit) wird durch Graufilter eingestellt.



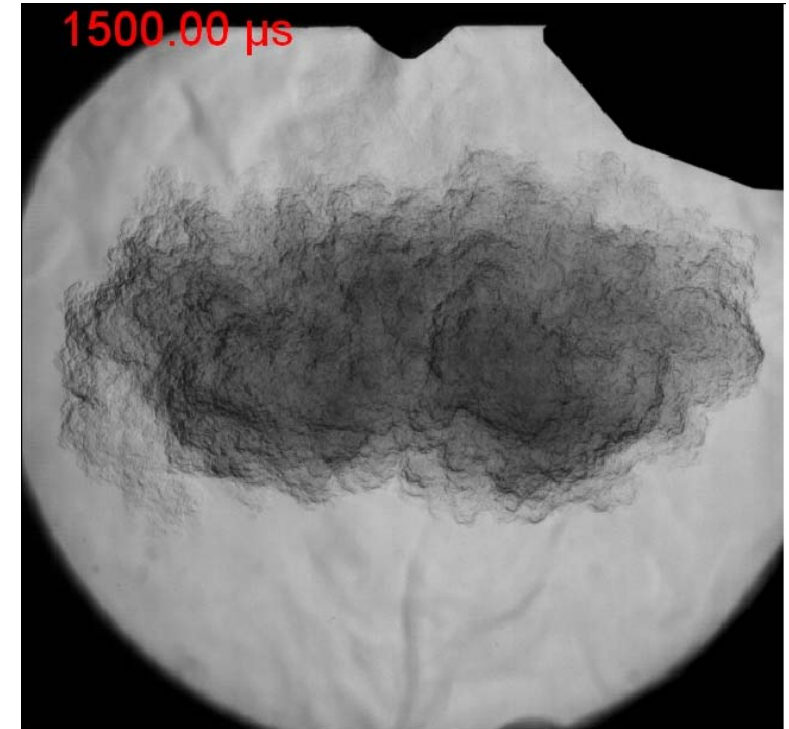
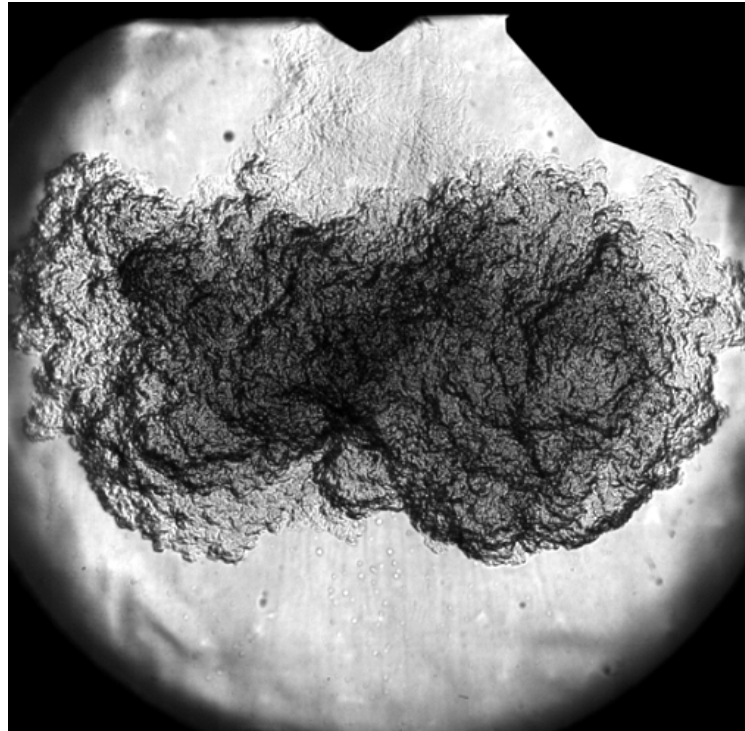
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$

$$g = 425 \text{ mm}$$
$$b = 1983 \text{ mm}$$

- Großer Arbeitsabstand der Kamera, daher Teleobjektiv nötig

Beispielaufnahmen:

unterschiedliche  
Graufilter verwendet

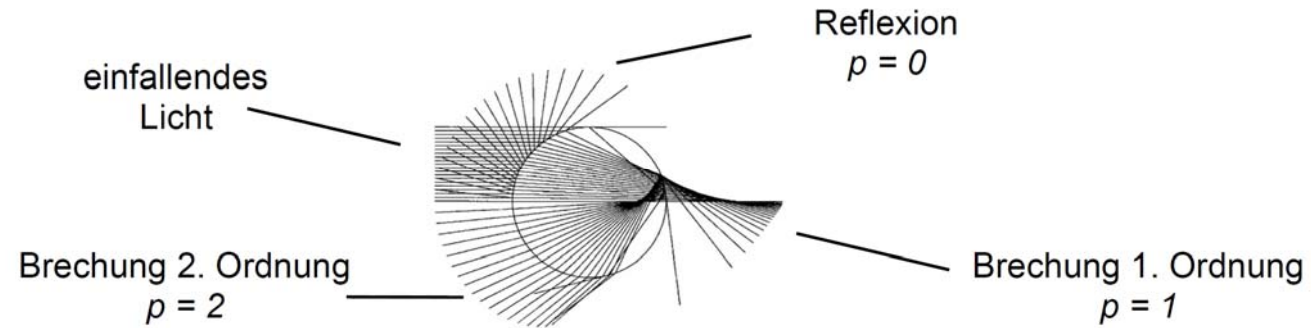


Literatur: Settles, G.S.: *Schlieren and Shadowgraph Techniques*, Springer, 2001.

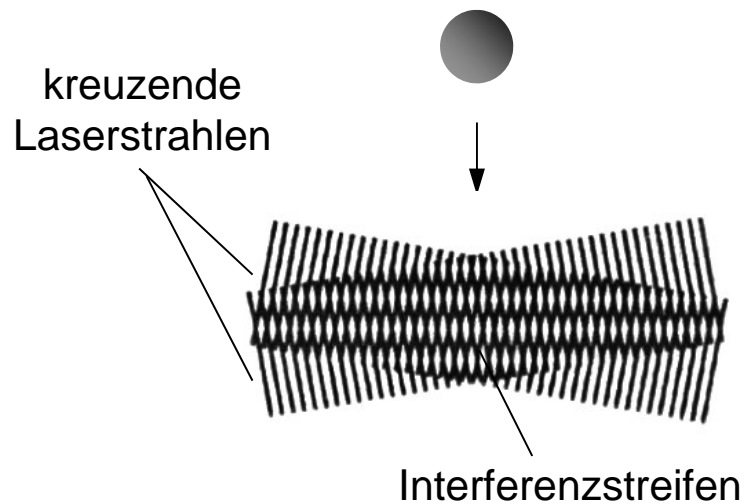
darin auch weitere Schlierenverfahren:

- Zwei-Linsen-System
- System mit Hohlspiegel in Z-Anordnung für große Bildbereiche

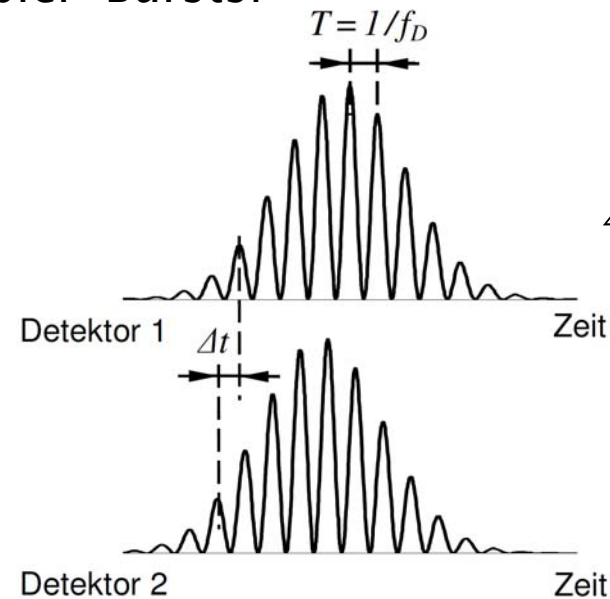
Streumoden:



Messvolumen mit Interferenzstreifen:



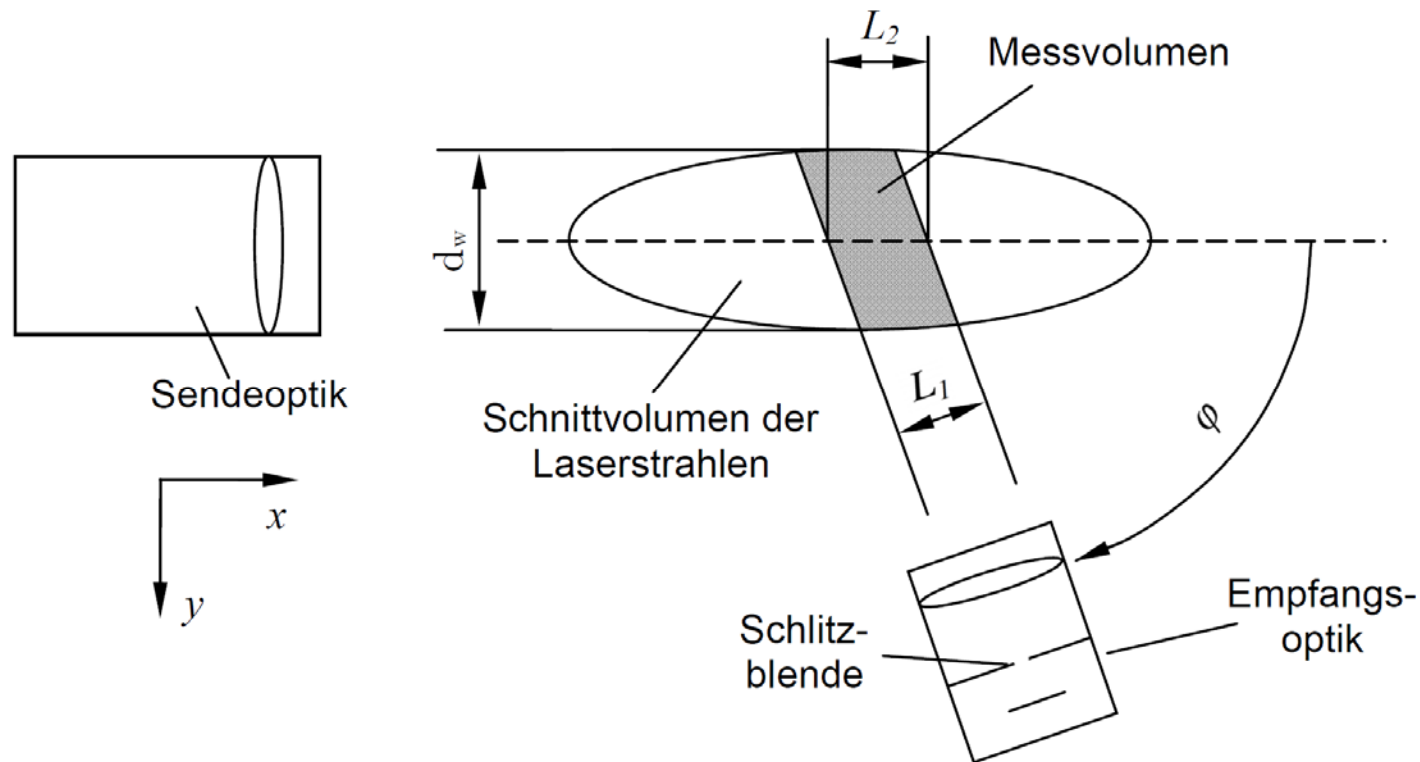
Doppler-Bursts:



$$\Delta\Phi_{ij} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta t}{T}$$

$$d = \frac{\Delta\Phi_{ij}}{P_{ij}}$$

Schlitzblende:



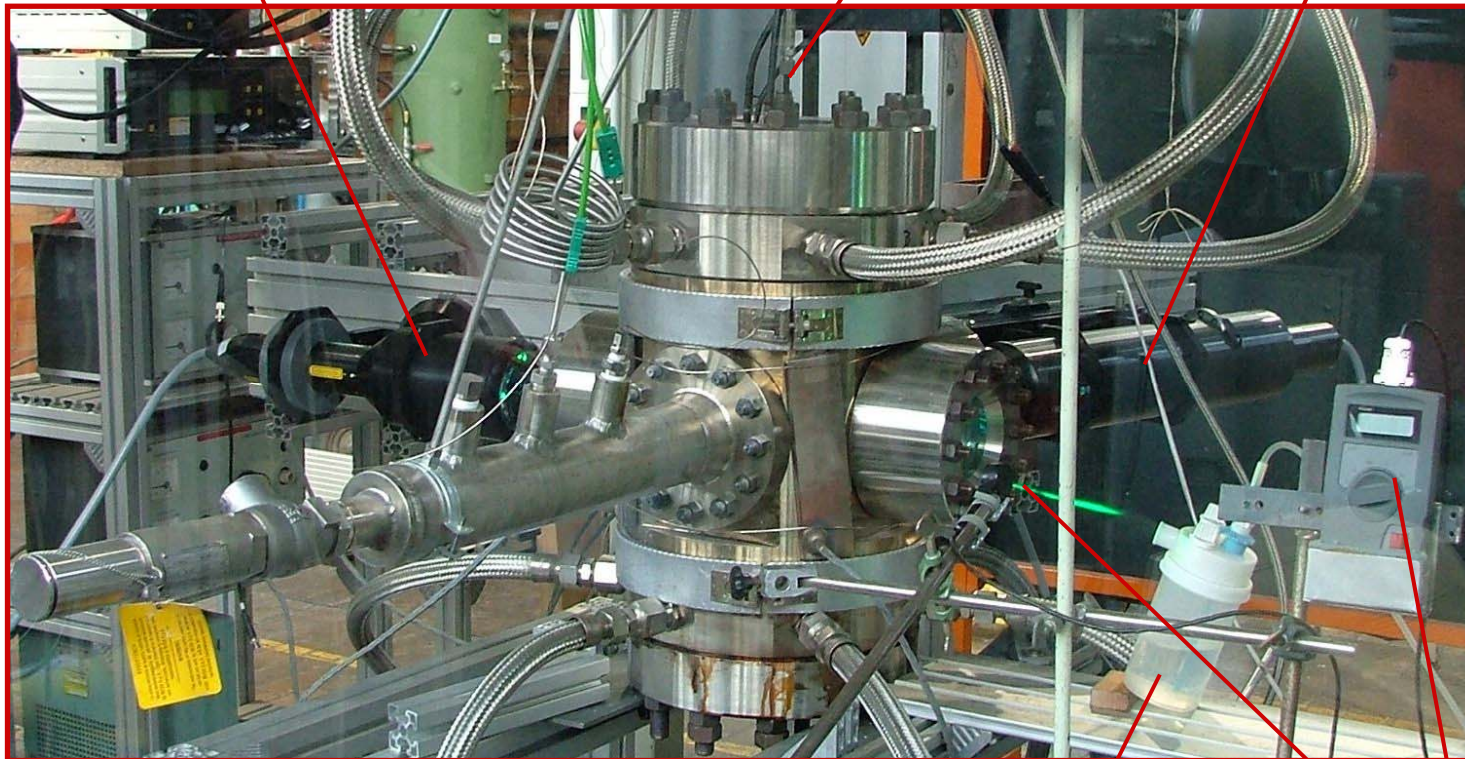
-> Die Schlitzblende verkleinert  
das effektive Messvolumen

# Phasen-Doppler Anemometrie (PDA) Versuchsaufbau

Sendeoptik

Injektor

Empfangsoptik

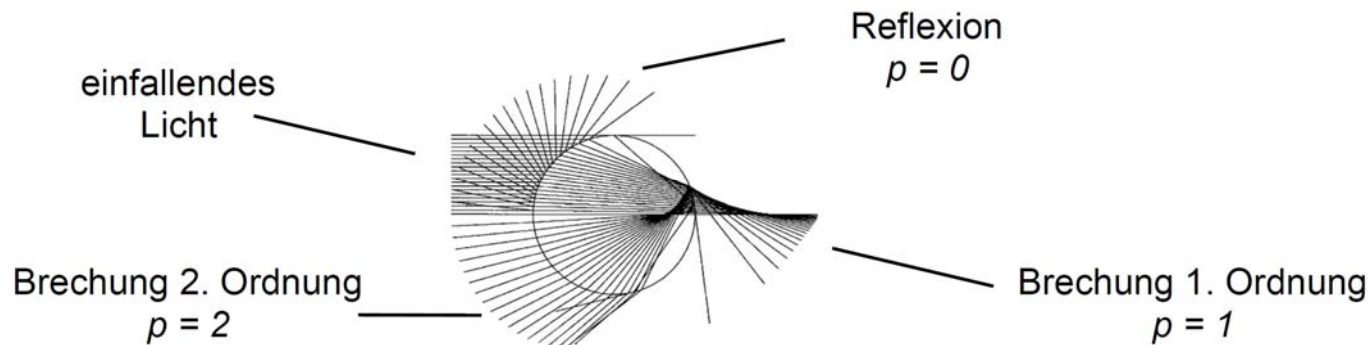
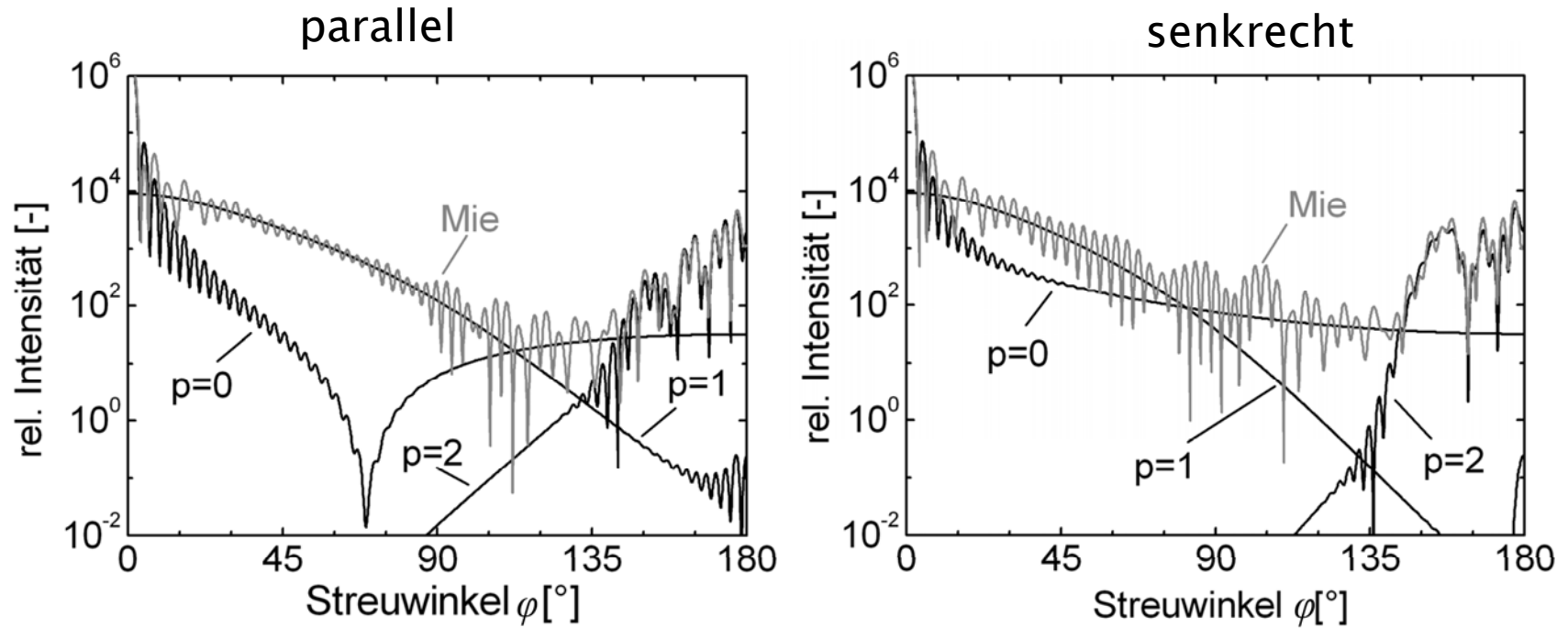


System HiDense  
(Dantec)

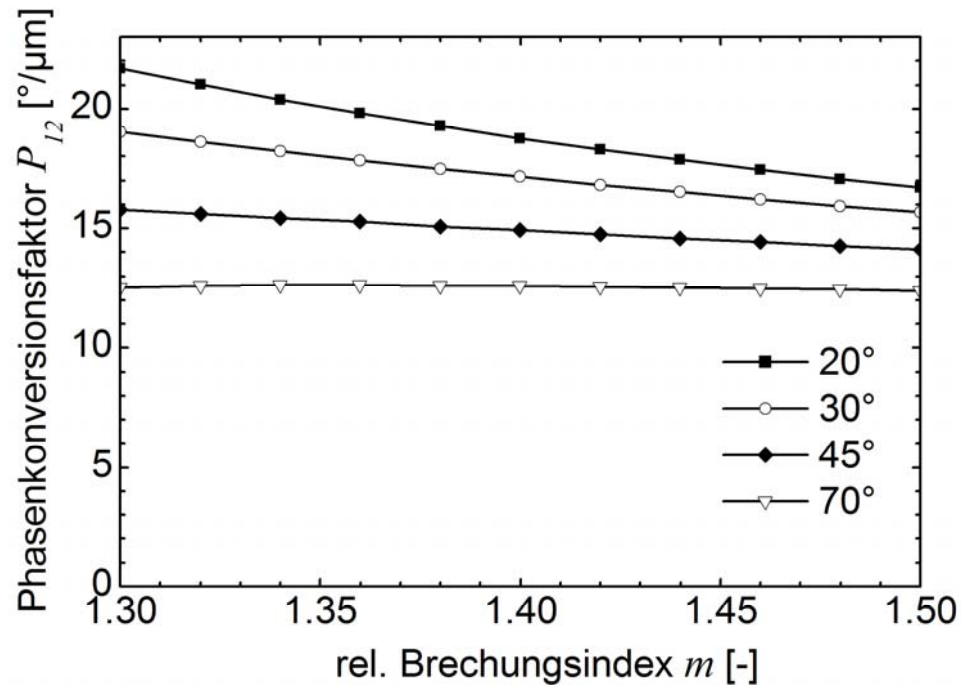
Aerosolgenerator

Powermeter

Streulichtintensität (Bsp: Benzintropfen in Luft,  $d = 10 \mu\text{m}$ )







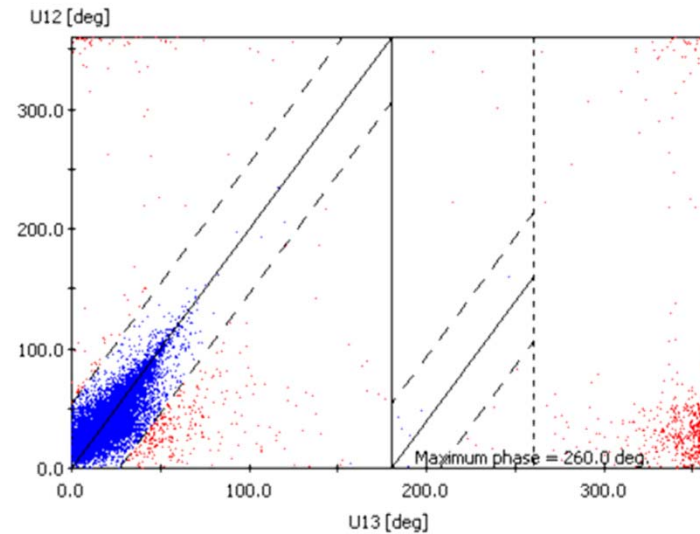
Sensitivität des rel. Brechungsindex nimmt mit zunehmendem Streuwinkel  $\phi$  ab

-> bei Unsicherheiten bzgl. des rel. Brechungsindex ist großer Streuwinkel  $\phi$  zu wählen

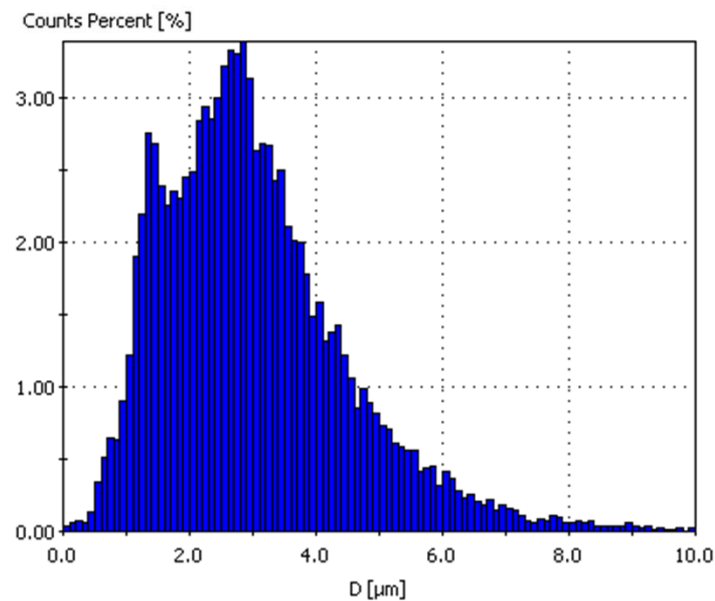
# Phasen-Doppler Anemometrie (PDA)

## Referenzmessung mit Inhalator

Phase Plot:



Durchmesser-Histogramm:

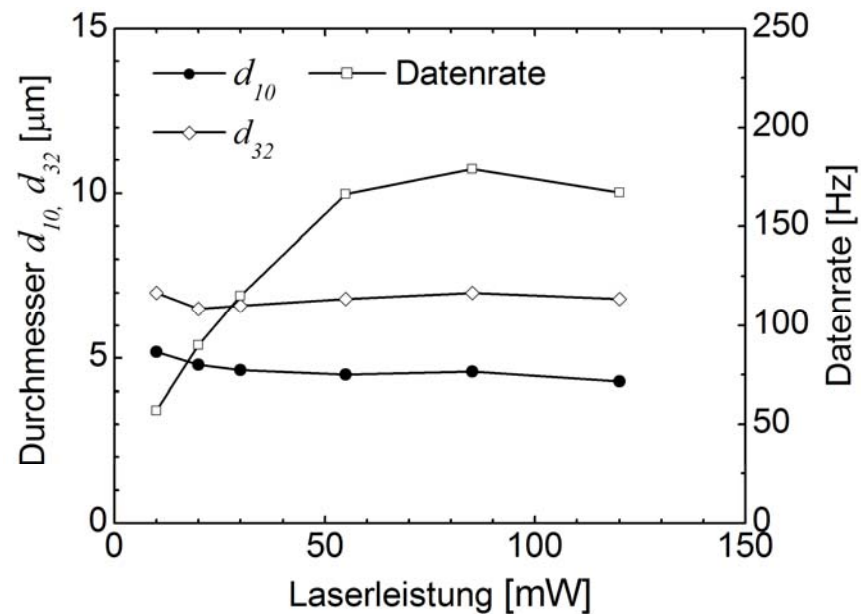
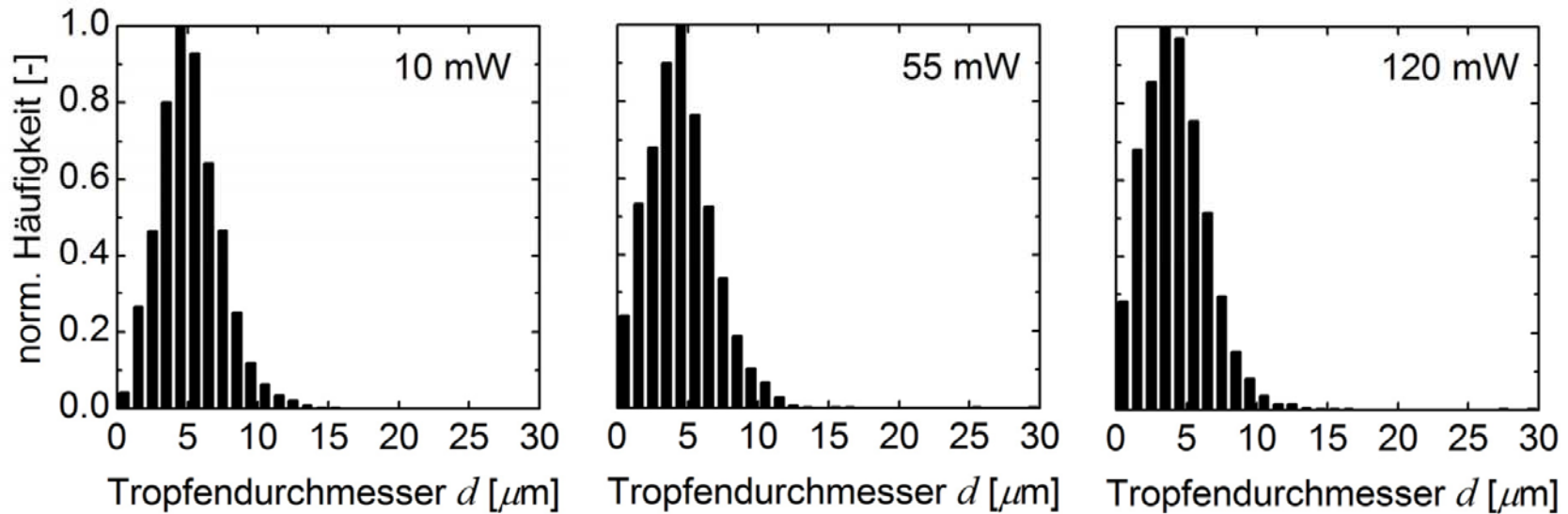


Inhalator



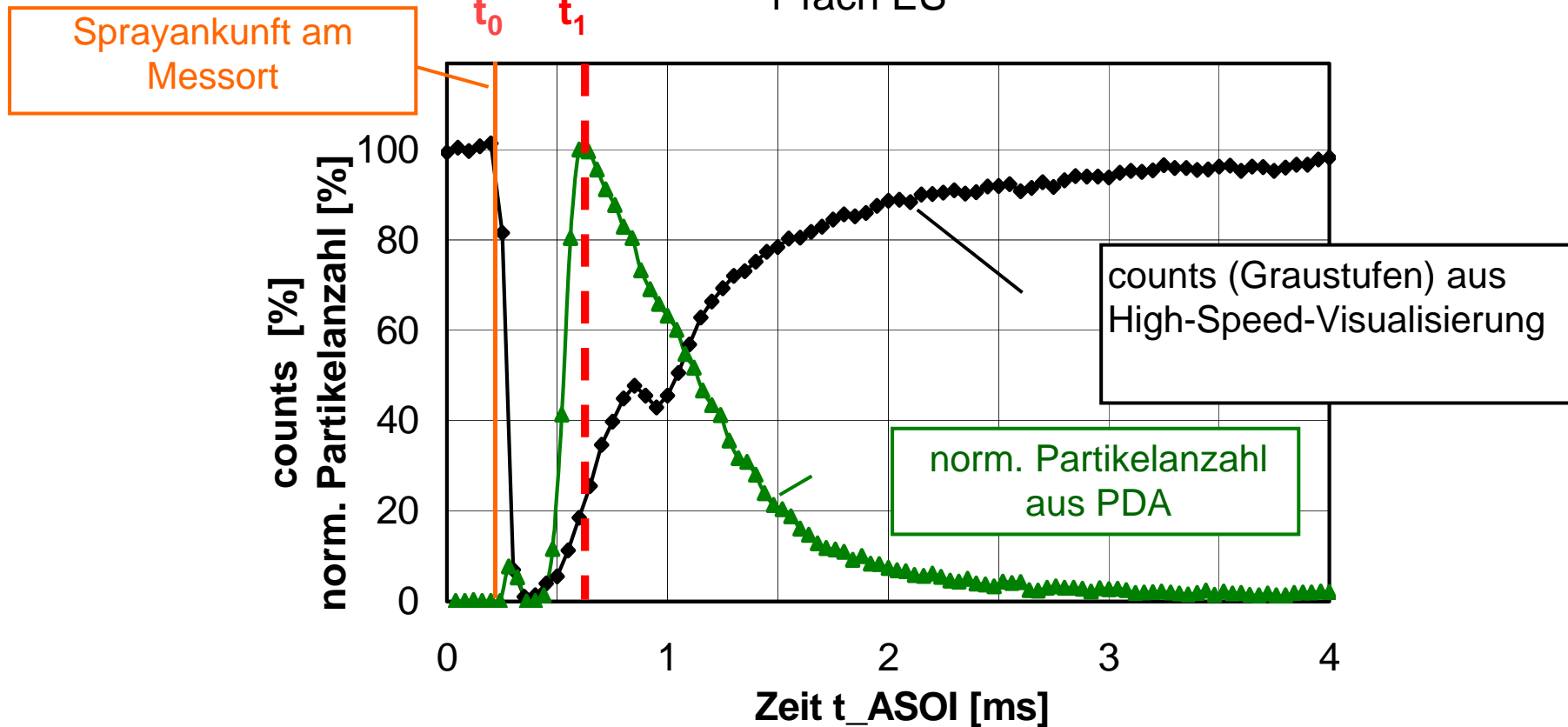
# Phasen-Doppler Anemometrie (PDA)

## Einfluss der Laserleistung

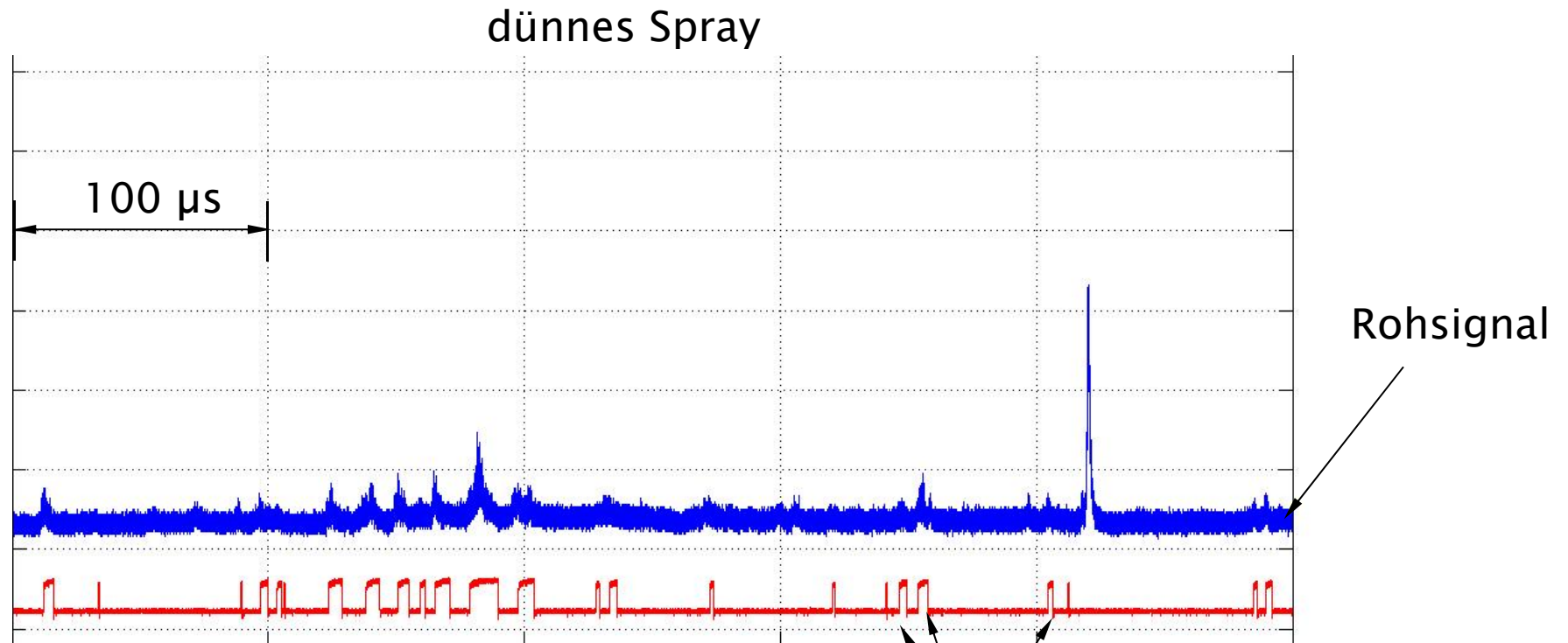


# Phasen-Doppler Anemometrie (PDA) Messung im dichten Spray

Validierung mittels High-Speed-Visualisierung  
1-fach ES

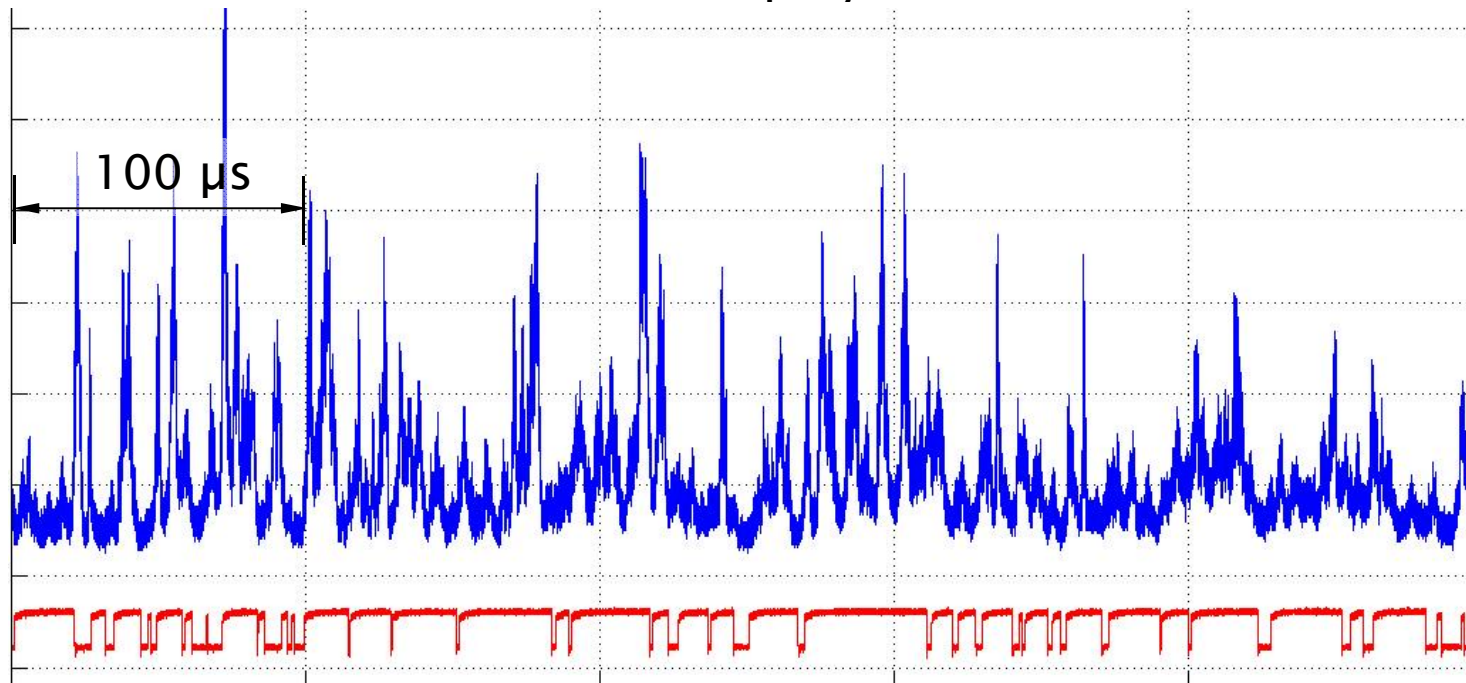


Zwischen  $t_0$  und  $t_1$  ist das Spray sehr dicht (geringe counts), von PDA werden aber nur wenige Partikel detektiert  $\rightarrow$  Spray zu dicht für PDA-Messung



die Partikel können einzeln  
detektiert werden

dichtes Spray



Spray zu dicht: Partikel können nicht mehr einzeln aufgelöst werden

- Passender optischer Aufbau für die Messaufgabe finden (Frontlinsen, Slit, Strahlwinkel, Maske, Geschwindigkeitsbereich): Einflüsse in *BSA Flow Software* durchspielen
- Sende- und Empfangsoptik präzise positionieren: Überprüfung mittels Phase-Plot möglich
- Hitzeschutz von Sende- und Empfangsoptik an beheizter Druckkammer verwenden: Schutzglas (Empfangssonde), Lochblech (Sendesonde)
- Laserleistung regelmäßig überprüfen, Sonneneinstrahlung verhindern
- Koinzidente Messung: reduziert die Datenrate
- Durchmesserabhängiges Messvolumen: PVC (Probe Volume Correction) im dichten Spray nicht anwendbar (Transition Time zu kurz bzw. schlecht ermittelbar durch verrauschtes Rohsignal)
- Justierblende innerhalb der Druckkammer hilfreich