



Laserbasierte dreidimensionale Messung des Strömungs- und Temperaturfeldes in der Mikrofluidik

**13. Workshop “Kleine Volumenströme in der Medizintechnik”
16.09.2020**

C. Cierpka, J. König, Z. Deng

Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Technische Universität Ilmenau

1

The **SPiRiT**
of science

tu
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Gliederung

- **Kurzvorstellung TU Ilmenau und Mikrofluidikgruppe**
- Motivation
- Messprinzip (Strömung, Temperatur)
- Zusammenfassung und Ausblick

2



Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien



Institut für Mikro- und Nanotechnologien
MacroNano®



Ihre Position: [Institut für Mikro- und Nanotechnologien MacroNano®](#) / [Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien](#) / [Reinraum Feynmanbau](#)

Labore des Feynmanbaus

→ Labor Polymerelektronik	→ Labor Schichtmesstechnik	→ Labor optische und E-Beam Lithografie
→ Labor nasschemisches Ätzen	→ PVD/RIE Labor	→ Labor für Hochtemperaturprozesse
→ Labor für Aufbau und Verbindungstechnik I	→ Labor für elektrische Charakterisierung	→ MBE und Oberflächenanalytik
→ Labor für Festkörperanalytik	→ Backend Technologien	→ Ultrapräzisionsbearbeitung

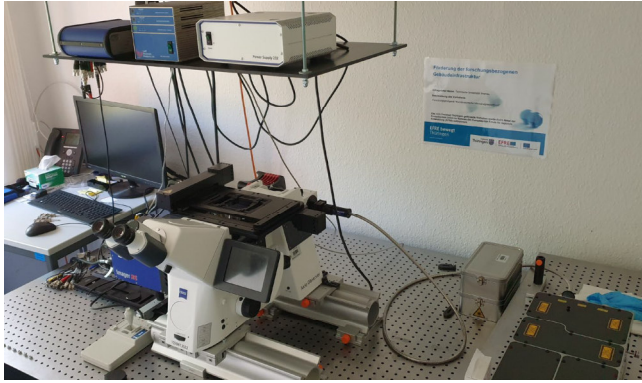
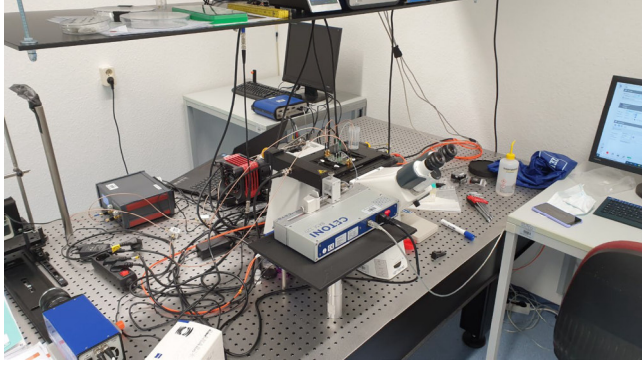
Short Course on „Practical Microfluidics“ (13.-17. September 2021)

<https://www.tu-ilmenau.de/ttd/spm/>

Institut
Forschung
› Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien
› Reinraum Feynmanbau
Labore Feynmanbau
Prozesstechnologien
Kooperationsangebot
News & Veranstaltungen
Kontakt
Master Mikro- und Nanotechnologien
Förderverein MNI e.V.
Internes Graduiertenkolleg

<https://www.tu-ilmenau.de/imn/zentrum-fuer-mikro-und-nanotechnologien/reinraum-feynmanbau/>

Mikrofluidik am FG Technische Thermodynamik



- Laborleiter: Dr. Jörg König
- Elektrochemiearbeitsplatz
- 2 invertierte Zeiss Mikroskope mit Messtechnik
- Projekte (meist DFG):
 - mikrofluidische Brennstoffzellen
 - Wasserstoffproduktion
 - elektrochemische Reaktionen
 - Magneto hydrodynamik
 - Feinstpartikelfraktionierung mittels akustischer Oberflächenwellen - SAW (SPP 2045)
 - 2D SAW Zellanalyseanordnung (Projektpartner IFW Dresden)
- Messtechnikentwicklung
- Auftragsmessungen

5

The **SPiRiT**
of science

th
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Gliederung

- Kurzvorstellung TU Ilmenau und Mikrofluidikgruppe
- **Motivation**
- Messprinzip (Strömung, Temperatur)
- Zusammenfassung und Ausblick

6

www.tu-ilmenau.de/ITFD

The **SPiRiT**
of science

th
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

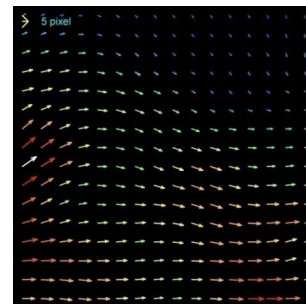
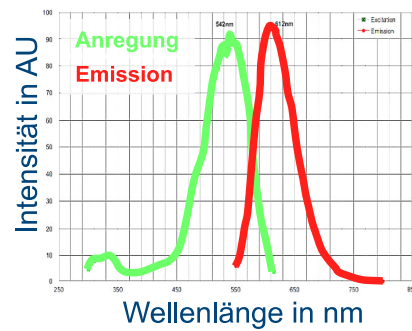
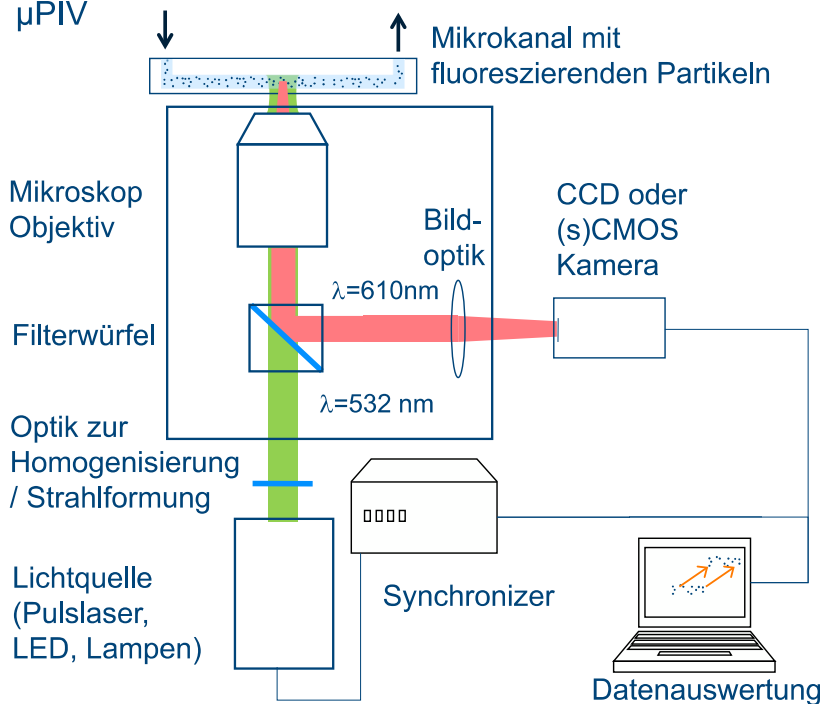
Motivation

- Kühlung in der Mikroelektronik: kleine Komponenten, hohe Wärmestromsdichten
- Mikrofluidische Brennstoffzellen: optimale Betriebstemperatur Direkt Methanol Brennstoffzelle 60 - 100 °C
- Marangoniströmungen in der Wasserstoffelektrolyse: Thermokapillarität
- Akustische Oberflächenkräfte zur Partikel-/Zell- und Strömungsmanipulation

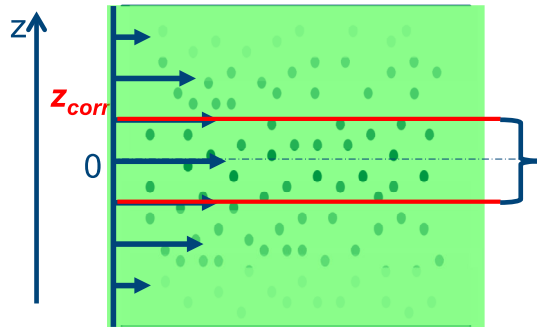
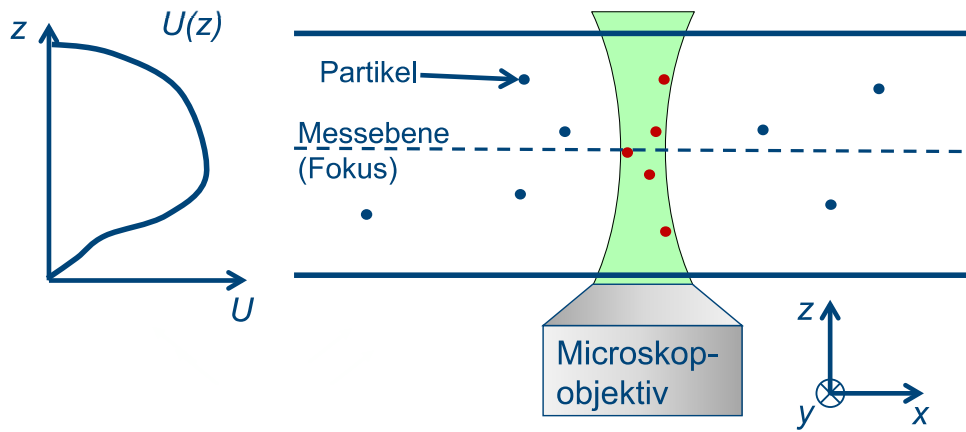
- kleine Skalen, hohe Auflösung → optische nicht-invasive Verfahren
- State of the art: PIV/PTV, LIF, MTV&T, TLCs

Optische Messtechnik in der Mikrofluidik

- Particle Image Velocimetry (PIV) gut etabliert
- μ PIV



Limitierungen μ PIV



Korrelations-
tiefe
(DOC)

M/NA	DOC _{theo}	DOC _{exp}
10/0.3	32 μm	49 μm
20/0.4	18 μm	32 μm
40/0.6	7 μm	30 μm
63/0.75	4 μm	37 μm

$d_p=1\mu\text{m}$, Rossi etal. ExiF 2011

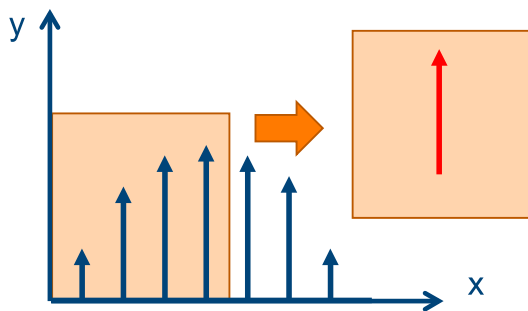
9

www.tu-illmenau.de/ITFD

The **SPiRiT**
of science

th
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Limitierungen μ PIV



Zusätzliche
Mittelung in der
Messebene durch
Abfragefenster

Anforderungen an die Messtechnik:

1. volumetrische Messungen mit einem optischen Zugang
2. simultane Messungen aller drei Geschwindigkeitskomponenten
3. Auswertung einzelner Partikel
4. großer Geschwindigkeits- und Temperaturbereich

10

www.tu-illmenau.de/ITFD

The **SPiRiT**
of science

th
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Abbildung kleiner Partikel

- Model für Abbildung von kleinen Teilchen (Olsen und Adrian, 2000 ExiF)
- der Partikelbilddurchmesser kann zur Bestimmung des Abstandes von der Fokusebene verwendet werden

$$a^2(z) = \underbrace{M^2 d_p^2}_{\text{geometrischer Anteil}} + \underbrace{5.95 (M+1)^2 \lambda^2 f^{\#2}}_{\text{Beugung}} + \underbrace{\frac{M^2 z^2 D^2}{(s_o + z)^2}}_{\text{Defokussierung}}$$

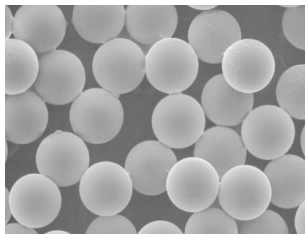
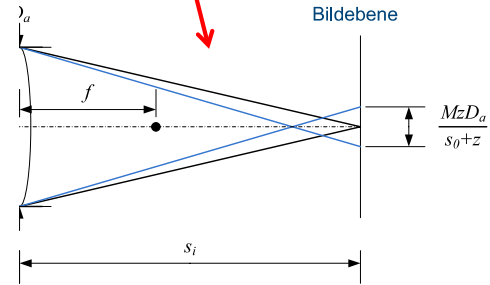
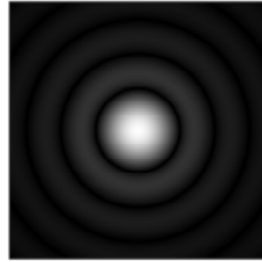


Bild: www.microparticles.de



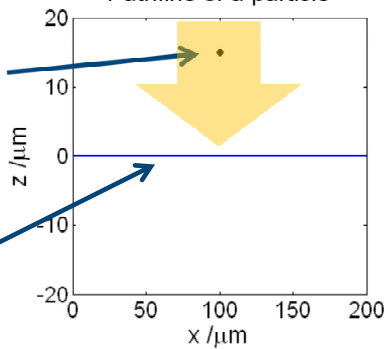
Partikelabbildung mit Volumenbeleuchtung

Beleuchtung und Beobachtung

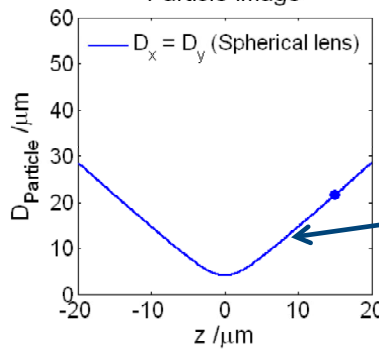
Pathline of a particle

Partikel im Messvolumen

Fokusebene

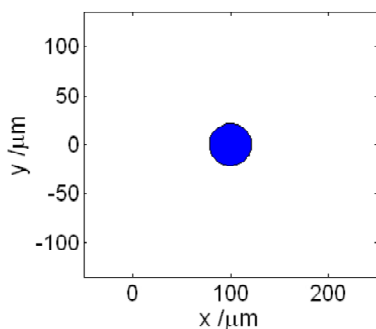


Particle image



Partikelbild-durchmesser

Particle image on the CCD (spherical lens)

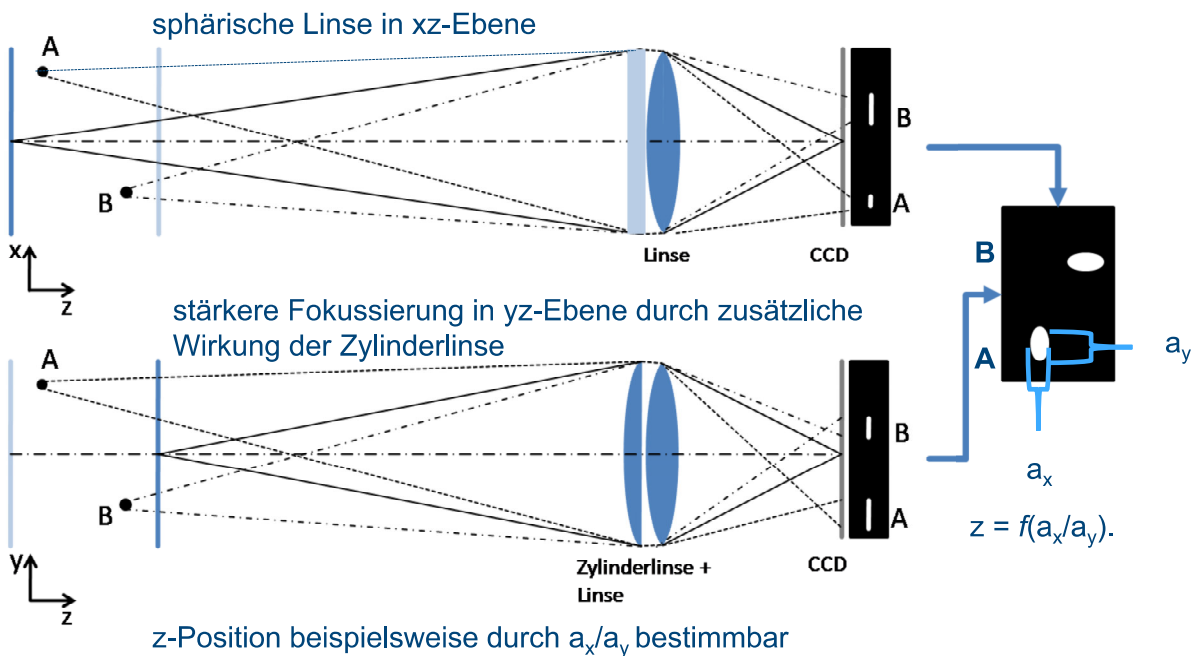


$$a^2(z) = \underbrace{M^2 d_p^2}_{\text{geometrischer Anteil}} + \underbrace{5.95 (M+1)^2 \lambda^2 f^{\#2}}_{\text{Beugung}} + \underbrace{\frac{M^2 z^2 D^2}{(s_o + z)^2}}_{\text{Defokussierung}}$$

Gliederung

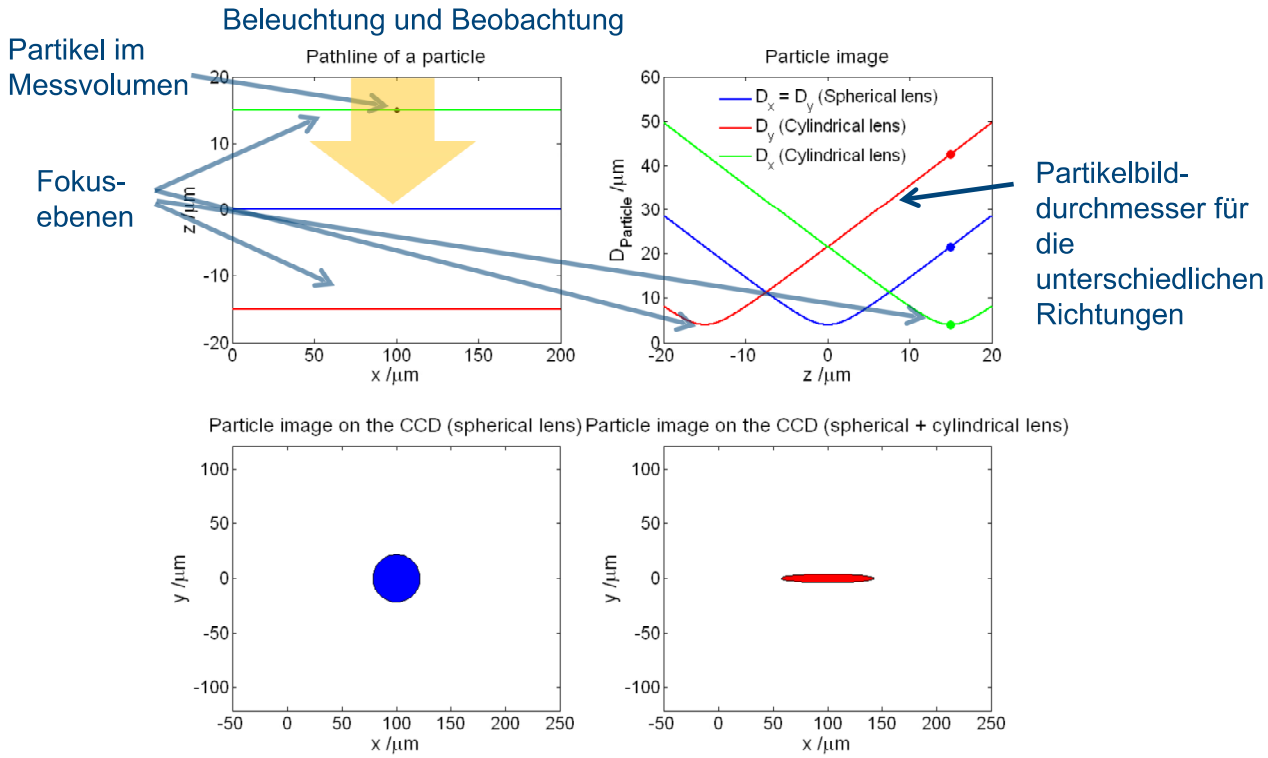
- Kurzvorstellung TU Ilmenau und Mikrofluidikgruppe
- Motivation
- **Messprinzip (Strömung, Temperatur)**
- Zusammenfassung und Ausblick

Messprinzip Astigmatismus PTV



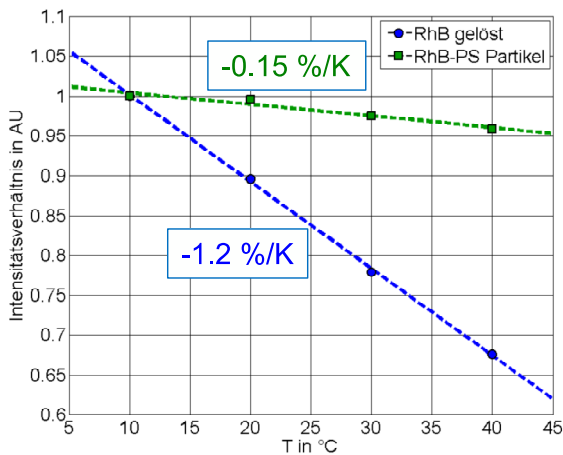
- nur ein (axialer) optischer Zugang nötig (vgl. stereo-, tomo-PIV)
- kein Intensitätsverlust durch Blenden (vgl. Pinholemethode)
- Einfach und preiswert zu implementieren → ideal für Mikrofluidik

Partikelabbildung mit Volumenbeleuchtung APTV



Temperaturmessungen mit Partikeln

- Idee: Kombination APTV und temperatursensitive Partikel
- **Thermochromic liquid crystals** (*Dabiri, 2009, ExiF; Segura et al., 2015, Lab Chip*)
- **Thermographic phosphors** (*Alden et al., 2011, Prog Energ Combust; Abram et al., 2015, Opt Express*)
- **Mikrokapseln mit Farbstoffen** (*Vogt und Stephan, 2012, MST*)
- **Fluoreszente Polymerpartikel**

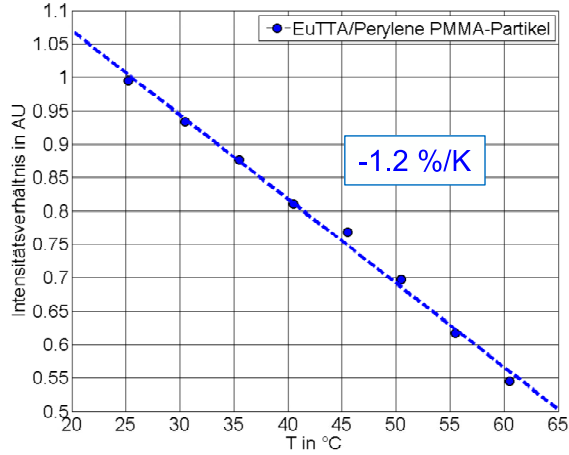
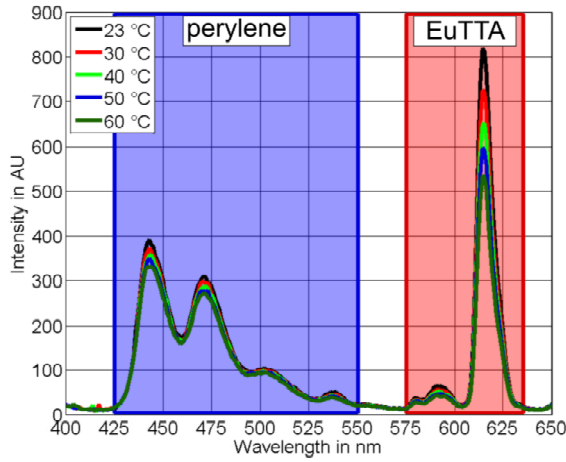


“[...] the polymer may significantly affect the photophysical behavior of the paint [...]. Since how the polymer affects the photophysical processes in the paint is not well understood, **it is basically a trial and error process to find an optimal combination of a luminophore and a polymer.**”

(T Liu and JP Sullivan, 2005: “Pressure and Temperature Sensitive Paints”, Springer, p. 58)

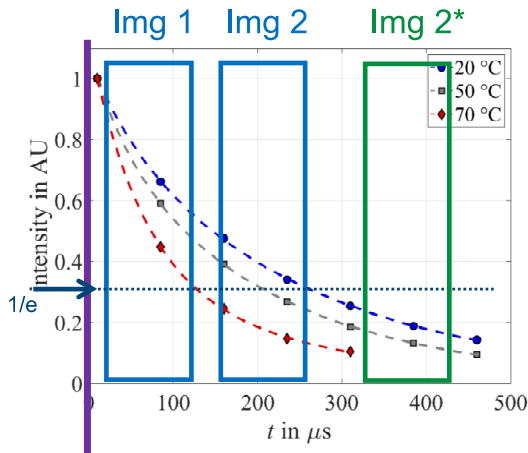
Temperaturmessung mit Partikeln

- PMMA Partikel mit Perylen und Europiumkomplex (Surflay Nanotec GmbH, $d_p = 7 \mu\text{m}$)
- Anregung 355 nm, Lumineszenz 620 nm, Antwortzeit $\tau_T = \frac{\rho_P c_P D_P^2}{12k_F} \approx 28 \mu\text{s}$
- LIF: Intensitätsmessung, *Massing et al. MST (2016), TM (2017)*
- FLIM: Lebensdauermessung ($\sim 500 \mu\text{s}$), *Massing et al. Elec. Acta (2019)*

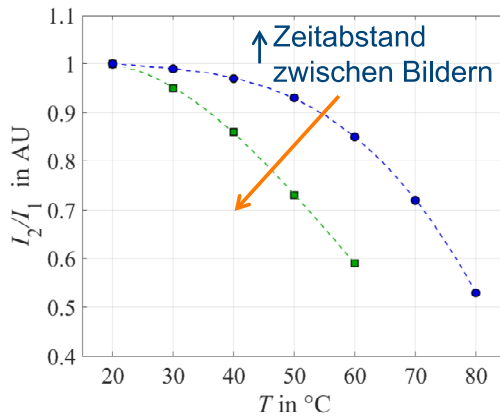


J. Massing „Development and validation of novel volumetric temperature and velocity measurement techniques for sub-millimeter scales“, Dissertation, UniBW, 2019

Luminescence lifetime imaging



355 nm Laserpuls

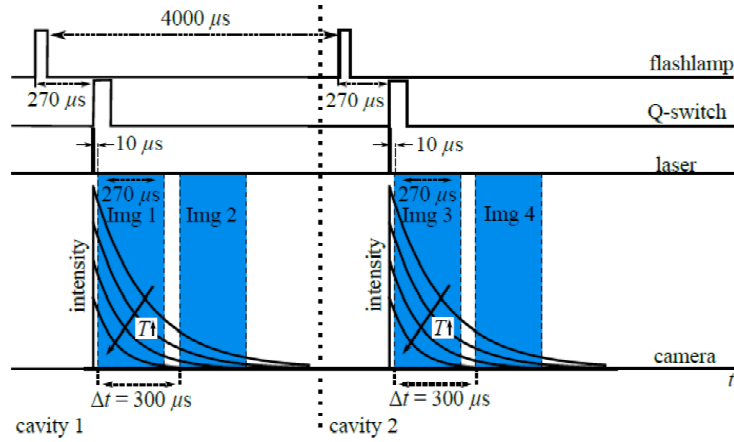
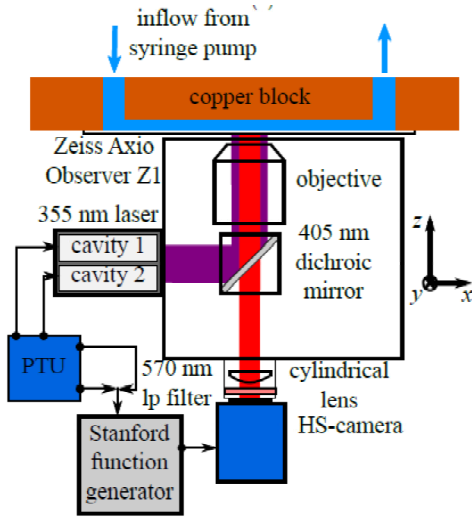
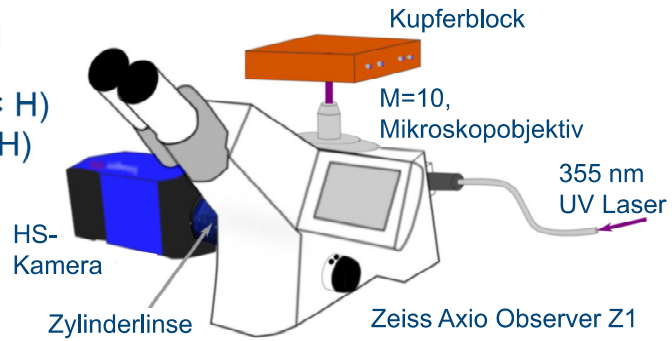


- Lumineszenzlebensdauer EuTTa ist temperaturabhängig
- Synchronisation kann für einen bestimmten Temperaturbereich optimiert werden
- unabhängig von Geschwindigkeitsmessung
- minimaler Einfluss von photo bleaching, Intensitätsschwankungen, etc.

J. Massing „Development and validation of novel volumetric temperature and velocity measurement techniques for sub-millimeter scales“, Dissertation, UniBW, 2019

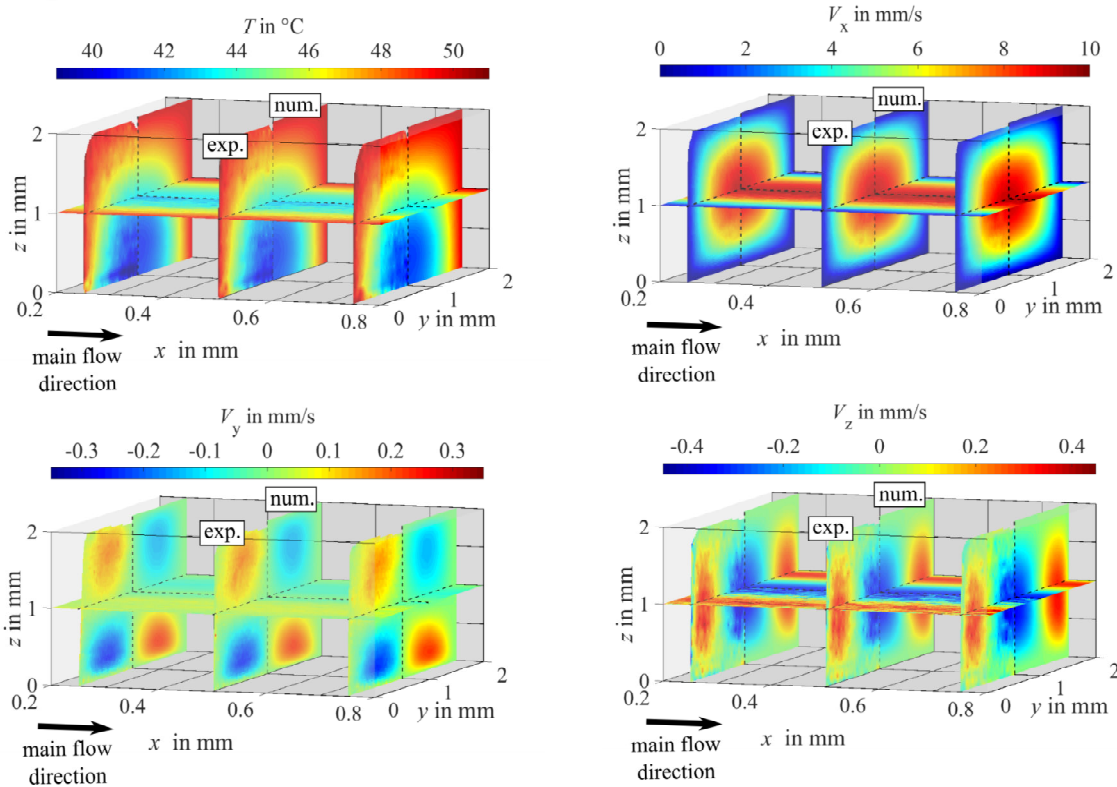
Experimentelle Validierung

- beheizter Kanal: $30 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ ($L \times B \times H$)
- Messvolumen: $1 \times 1 \times 0.1 \text{ mm}^3$ ($L \times B \times H$)
- $T_W = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\dot{V} = 1.1 \text{ ml/min}$
- $Re_D = 8$, $Ri = 7$
- numerische Simulation zum Vergleich



J. Massing „Development and validation of novel volumetric temperature and velocity measurement techniques for sub-millimeter scales“, Dissertation, UniBW, 2019

Ergebnisse



J. Massing „Development and validation of novel volumetric temperature and velocity measurement techniques for sub-millimeter scales“, Dissertation, UniBW, 2019

Zusammenfassung Messsystem

- Astigmatismus PTV und Lumineszenzlebensdauermessung kann kombiniert werden
- räumliche Auflösung $\leq 1\%$ des Messvolumens
- Temperaturunsicherheit:
 - individuelles Partikel: $2\sigma \sim 3\text{ °C}$
 - Ensemble Mittelwerte: $2\sigma \sim 0.4\text{ °C}$
- Unsicherheit für z-Position $\leq 6\%$ der Messtiefe

1. volumetrische Messungen mit einem optischen Zugang ✓
2. simultane Messungen aller drei Geschwindigkeitskomponenten ✓
3. Auswertung einzelner Partikel ✓
4. großer Geschwindigkeits- und Temperaturbereich ✓

Gliederung

- Kurzvorstellung TU Ilmenau und Mikrofluidikgruppe
- Motivation
- Messprinzip (Strömung, Temperatur)
- **Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- 3D3C Geschwindigkeits- und Temperaturmessungen mit Partikeln verfügbar
- SAW Mikrofluidik 'acoustic streaming' und 'acoustic radiation force'
- Entstehung sehr komplexer Strömungen
- lokal starke Temperaturerhöhung möglich

Ausblick

- weitere Verbesserung der Messtechnik (neuronale Netze, Open Source)
- Aufbau einer 2D Zellanalyseanordnung und deren Charakterisierung

Literatur

- C. Cierpka, R. Segura, R. Hain, C.J. Kähler (2010) A simple single camera 3C3D velocity measurement technique without errors due to depth of correlation and spatial averaging for microfluidics, **Measurement Science and Technology** 21, 045401
- C. Cierpka, C. J. Kähler (2012) Particle imaging techniques for volumetric three-component (3D3C) velocity measurements in microfluidics. **Journal of Visualization** 15, 1-31, open access
- F. Kiebert, J. König, J. Massing, C. Cierpka, H. Schmidt (2017) 3D measurement and simulation of surface acoustic wave driven fluid motion: a comparison. **Lab on a Chip** 17, 2104-2114
- J. Massing, D. Kaden, C.J. Kähler, C. Cierpka (2016) Luminescent two-color tracer particles for simultaneous velocity and temperature measurements in microfluidics, **Measurement Science and Technology** 27, 1153014
- J. Massing, C.J. Kähler, C. Cierpka (2018) A volumetric temperature and velocity measurement technique for microfluidics based on luminescence lifetime imaging, **Experiments in Fluids** 59, 163

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Christian.Cierpka@tu-ilmenau.de



Short course on Practical Microfluidics



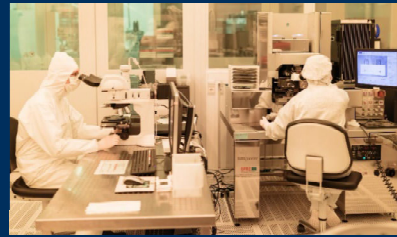
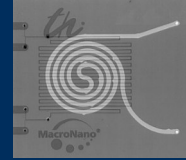
When: 13th-17th September, 2021

Where: TU Ilmenau, Germany



Topics

- fundamentals of microfluidics
- micro systems technologies (MEMS, MOEMS)
- manufacturing techniques for microfluidic devices
- experimental characterization of micro flows using μ PIV, μ PTV and advanced three-dimensional techniques
- microscopy methods and optics
- data handling and statistics
- applications of micro reaction technologies
- applications of single- and multiphase flows, surface acoustic waves etc.



Information can be found at www.tu-ilmenau.de/ttd/spm