

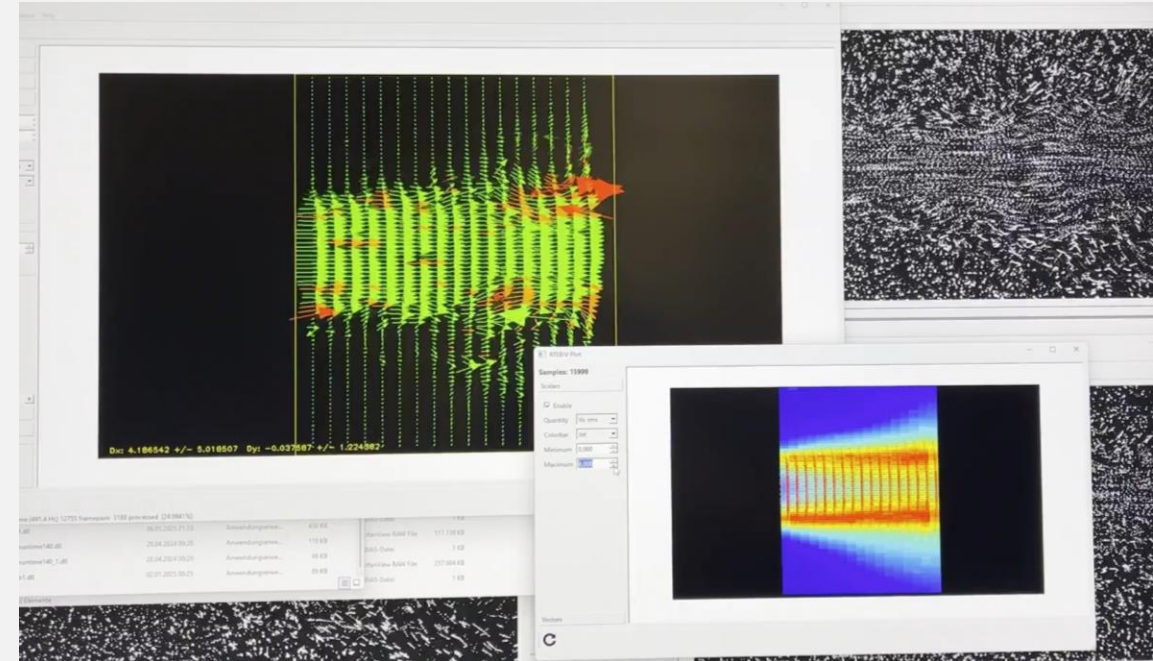
Event-basierteameratechnik für die bildgebende Strömungsmessung und Visualisierung

Christian Willert

Leiter Triebwerksmesstechnik, DLR Institut für Antriebstechnik, 51170 Köln
chris.willert@dlr.de

Agenda

- Merkmale der Event-based Vision (EBV)
- Strömungsvisualisierung mit EBV
- Quantitative Strömungsfeldmessung
- Multi-Kamera-Konfigurationen (3d Tracking)
- Strömungsfeldmessung in Echtzeit (Active Flow Control)
- Zusammenfassung

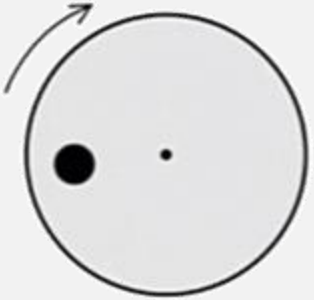


Was ist Event-based Vision (EBV) ?

- Synonyme: “Dynamic Vision Sensing” (DVS) or “Neuromorphic Imaging”
ebenfalls: “silicon retina”, Carver Mead & Misha Mahowald, Caltech, 1990’s
- relativ neue Technologie (sehr aktiv seit ~2010, ETHZ/Uni Zurich)
- Mehrere kommerzielle Anbieter
- **EBV registriert nur Intensitätsveränderungen**
→ Asynchroner Datenstrom aus Koordinaten, Zeitstempel und Polarität
- Paradigmenwechsel gegenüber konventioneller Bildaufzeichnung und -verarbeitung
- Anwendungsfelder, meist mit Echtzeitverarbeitung
 - simultaneous localization and mapping (SLAM)
visual-inertial odometry
 - autonomous navigation
 - vision and control for UAVs
 - 3-D sensing
 - object counting / machine vision / AI
 - Vibrationsmessung
 - Satellitennavigation (Star Tracking)
 - Augentracking
 - **Strömungsvisualisierung und –messung**
 - ...

Event-based Vision vs. Frame-based Imaging

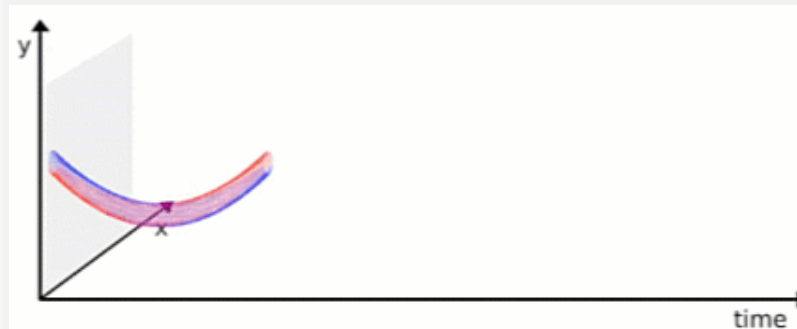
Scene



Frame-based



Event-based



Output

Synchroner Datenstrom
--> Frames mit $N \times M$ Pixel
Intensitäten

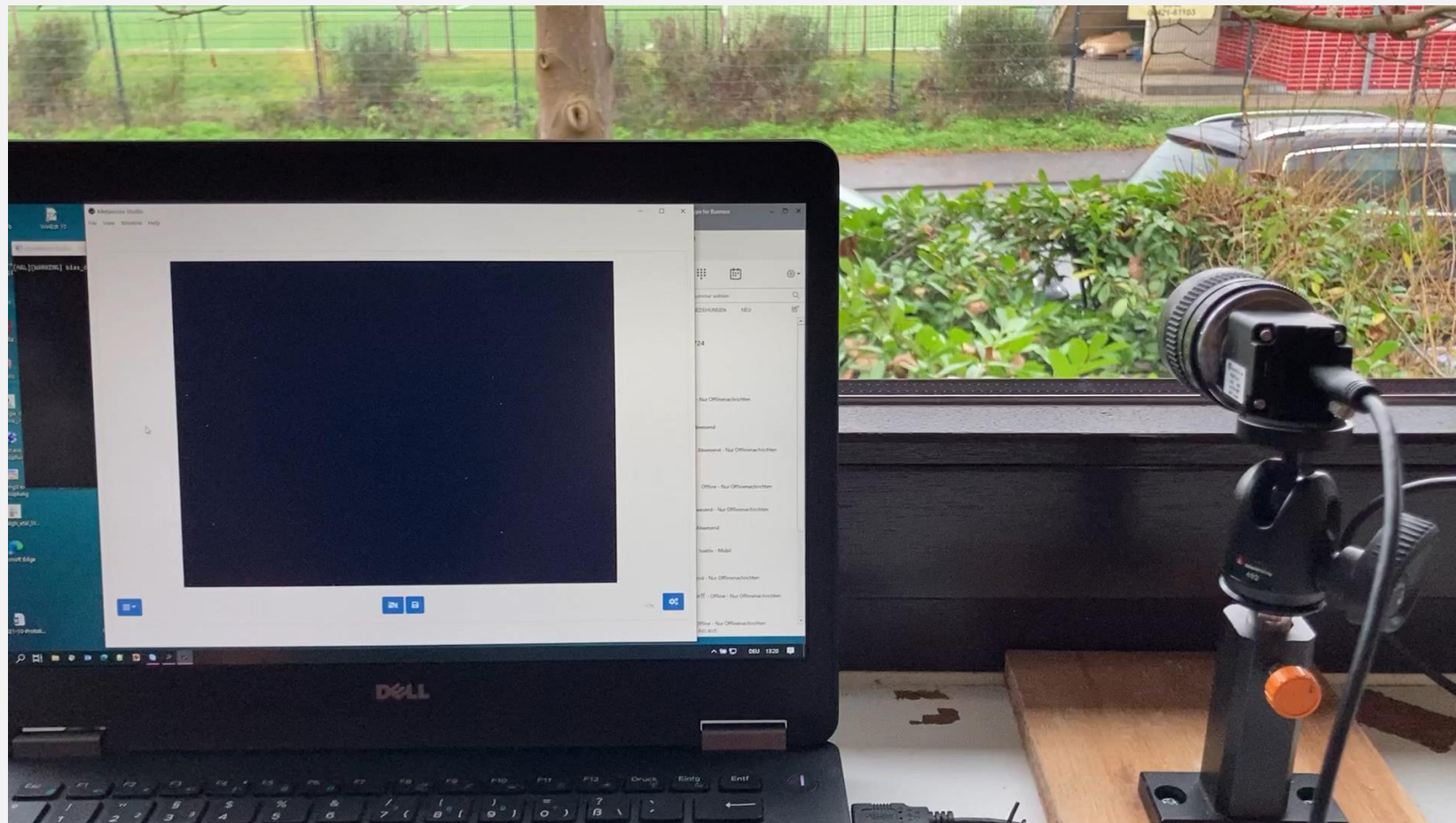
Asynchroner Datenstrom
lokale Intensitäts-
änderungen
(variable Datenrate)

Erstes Kennlernen der EVS

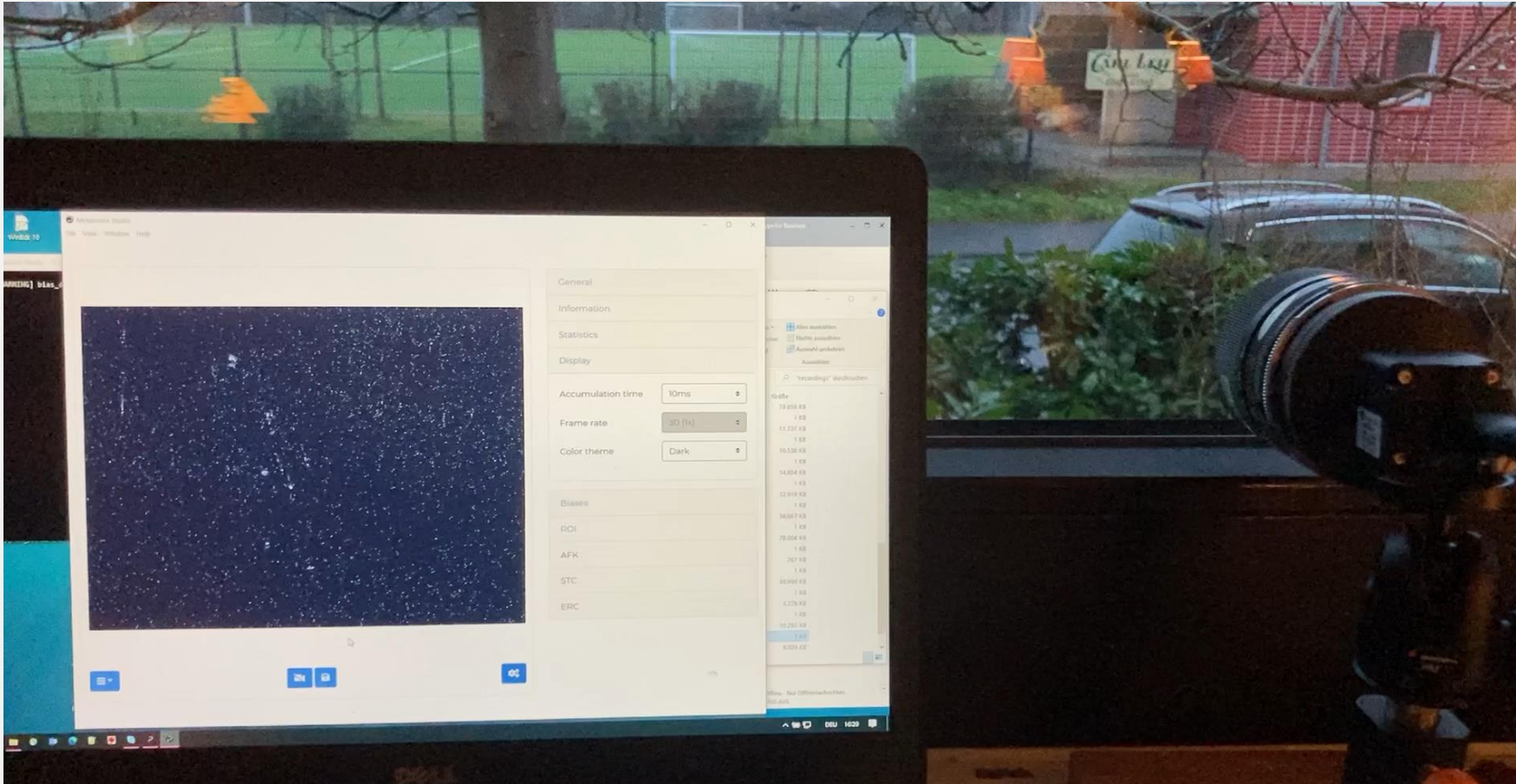
Event-Kamera mit
640 x 480 pixel Sensor



Century Arks (JP)
SilkyEvCam VGA

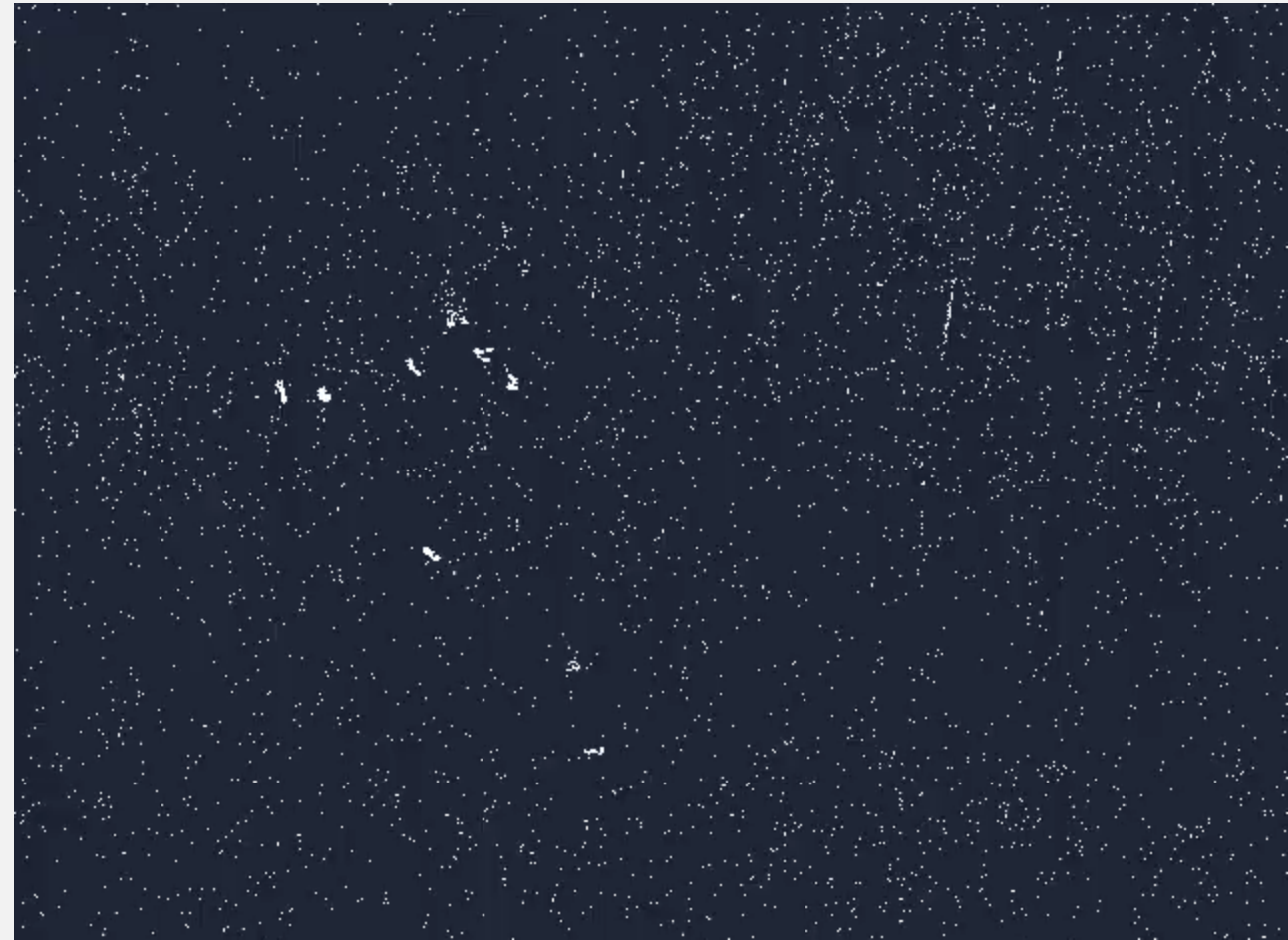
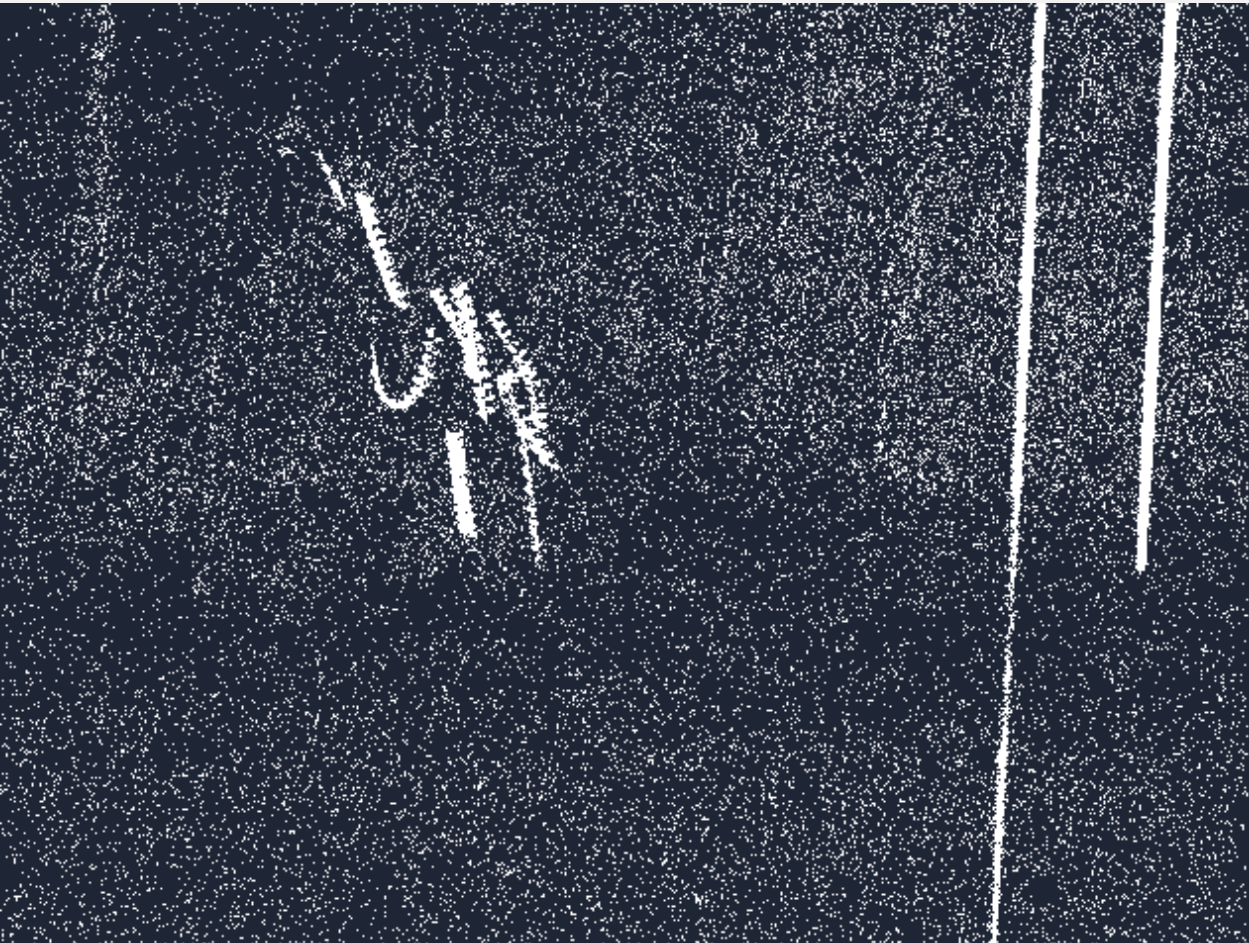


EVS Streaming in der Dämmerung

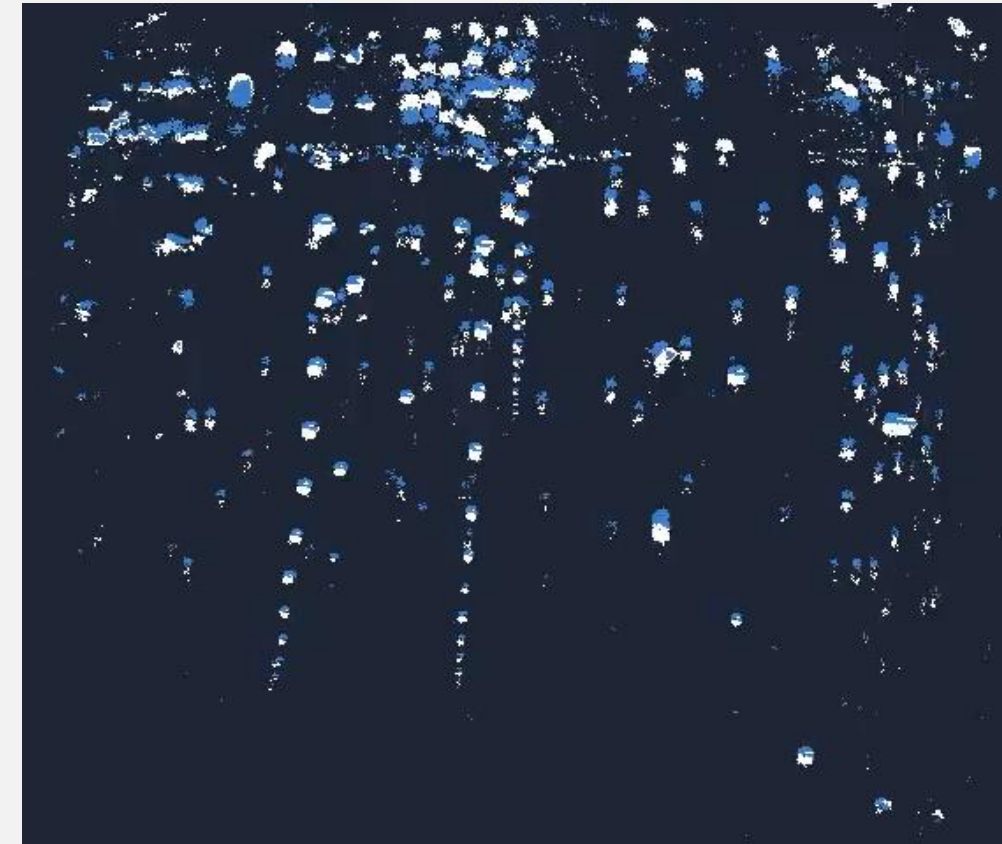
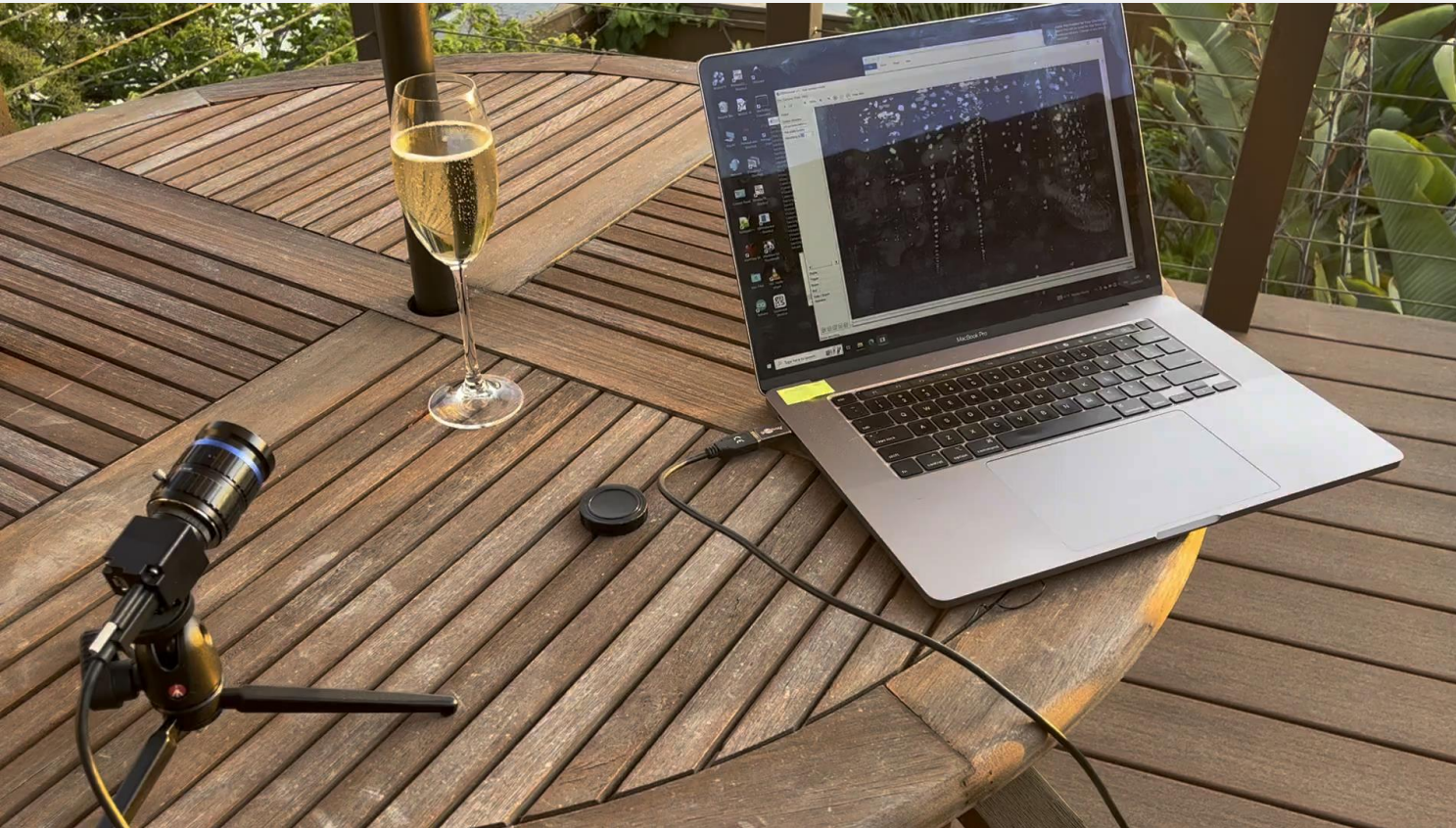


Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber konventionellen Kameras (Dynamic range >120dB)

Regen und Insekten in der Dämmerung

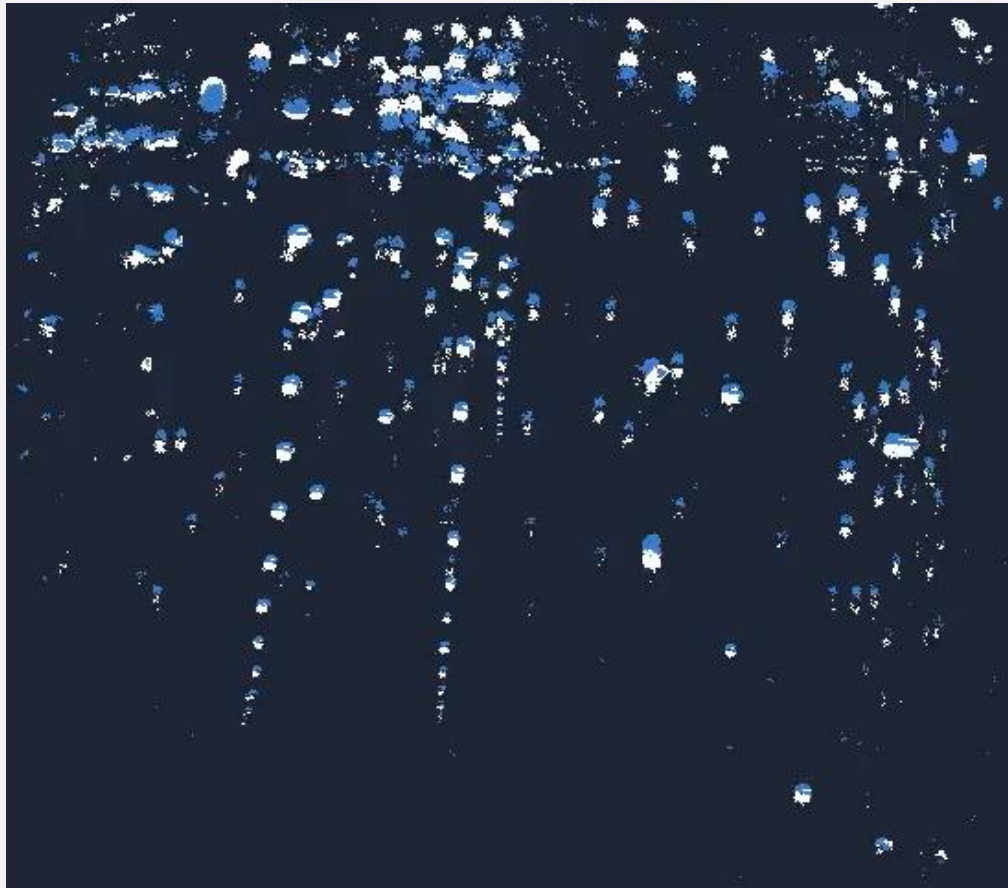


Erste Gehversuche in der Strömungsdiagnostik

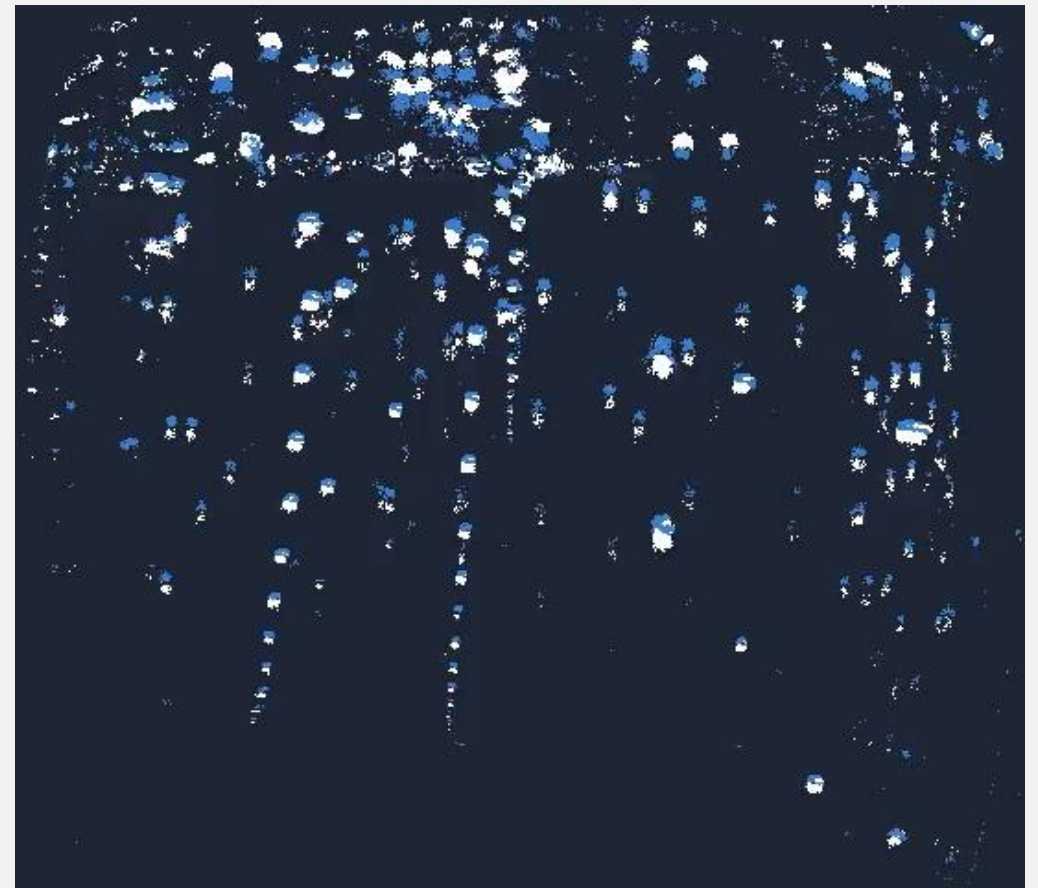


Camera: Century-Arks, SilkyEvCam VGA (640x480), Gen3 Sensor

Champagner Bläschen

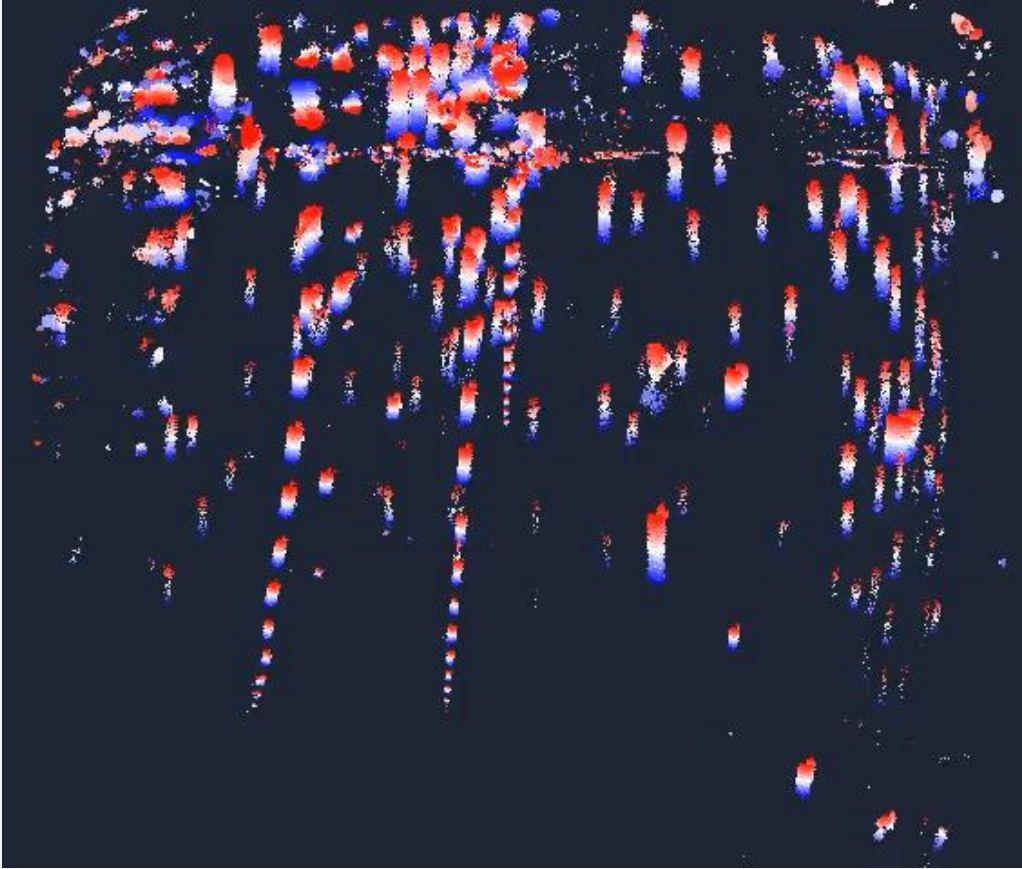


Actual speed (25 fps, Time-slice 10 ms)

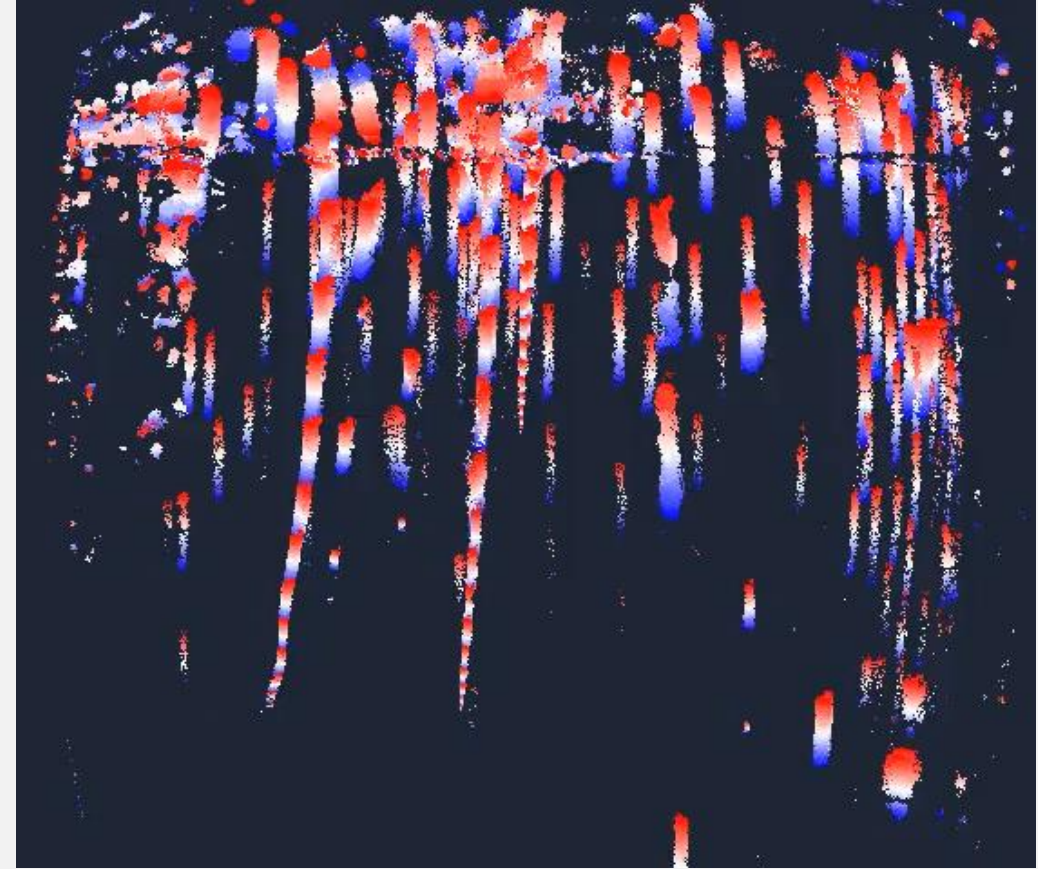


Speed 0.2x (125 fps, Time-slice 10 ms)

Event-Kodierung als “Time Surface”

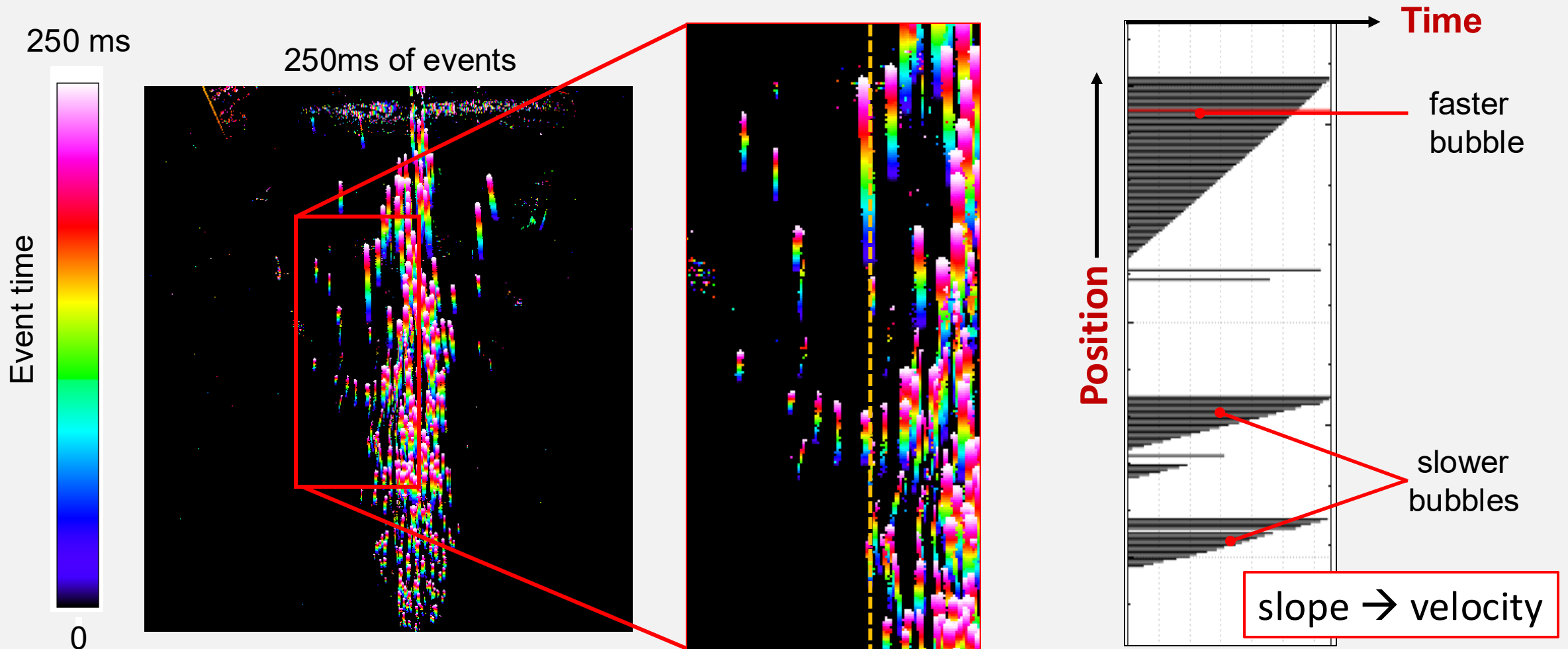


Speed 0.1x (250 fps, **Time slice 50 ms**)

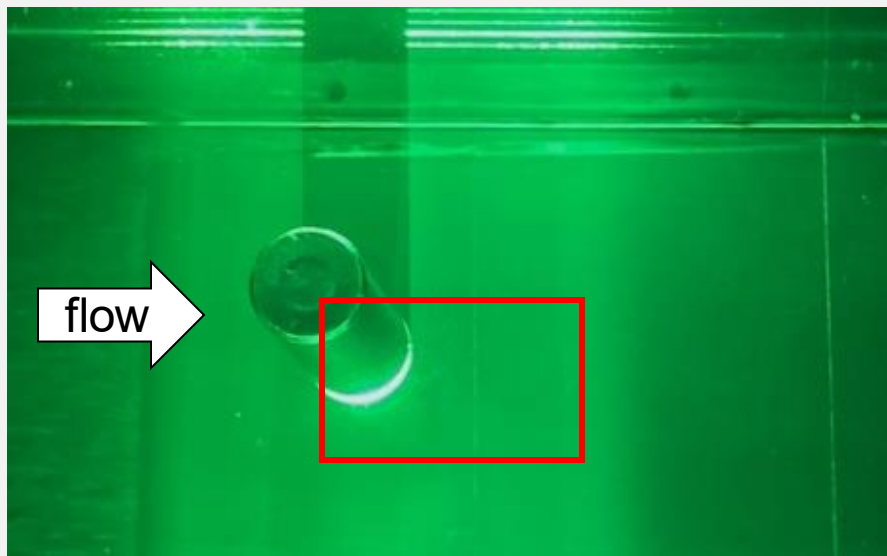


Speed 0.1x (250 fps, **Time slice 100 ms**)

“Time Surface” als Mass der Geschwindigkeit



Zylindernachlauf in Luft

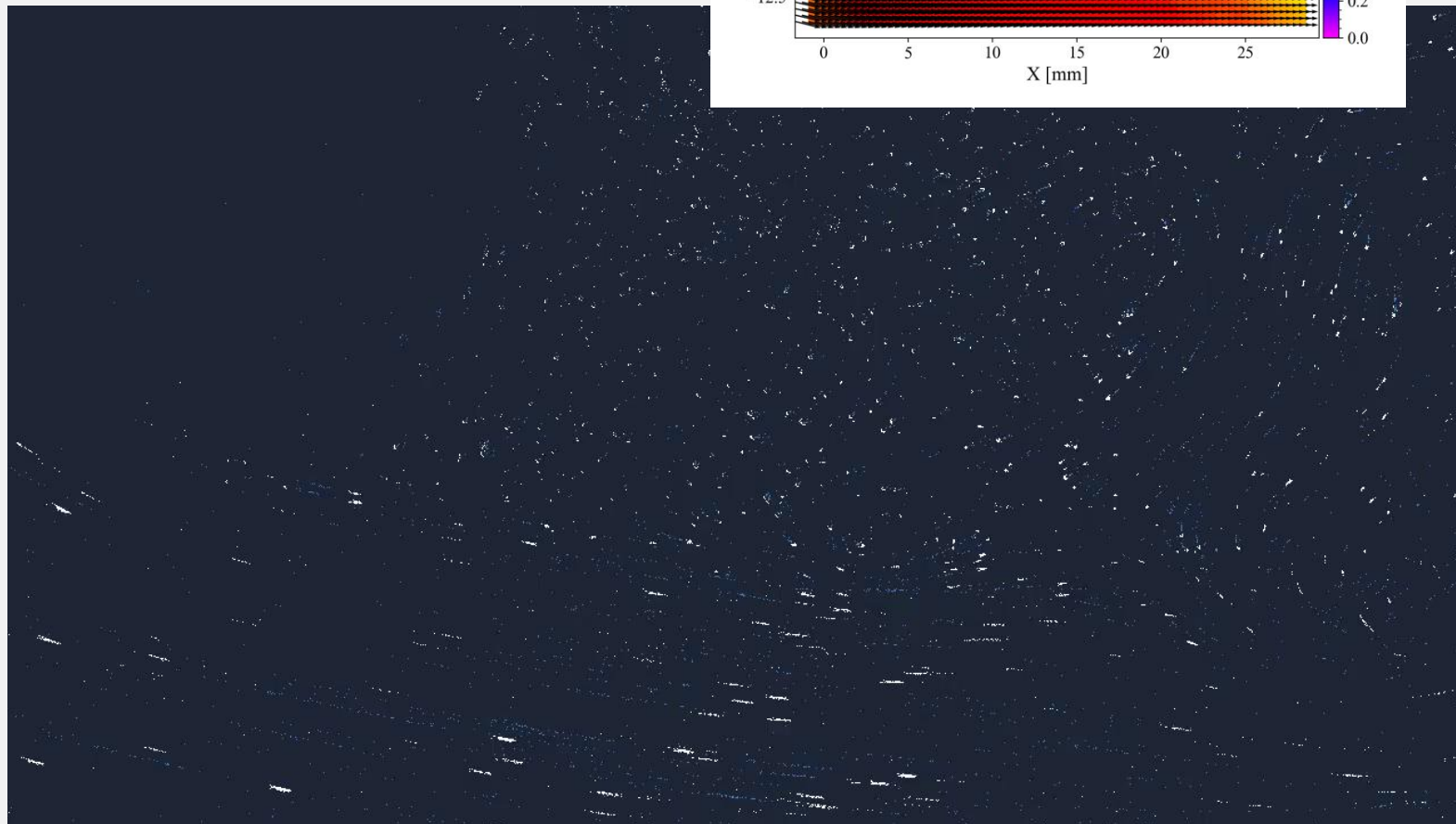
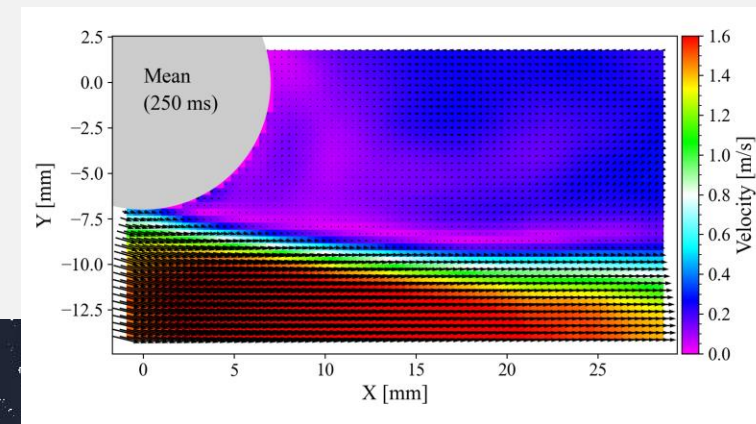


Time-Slice: 250 ms pro Frame

Zeitschritt: 2 ms pro Frame

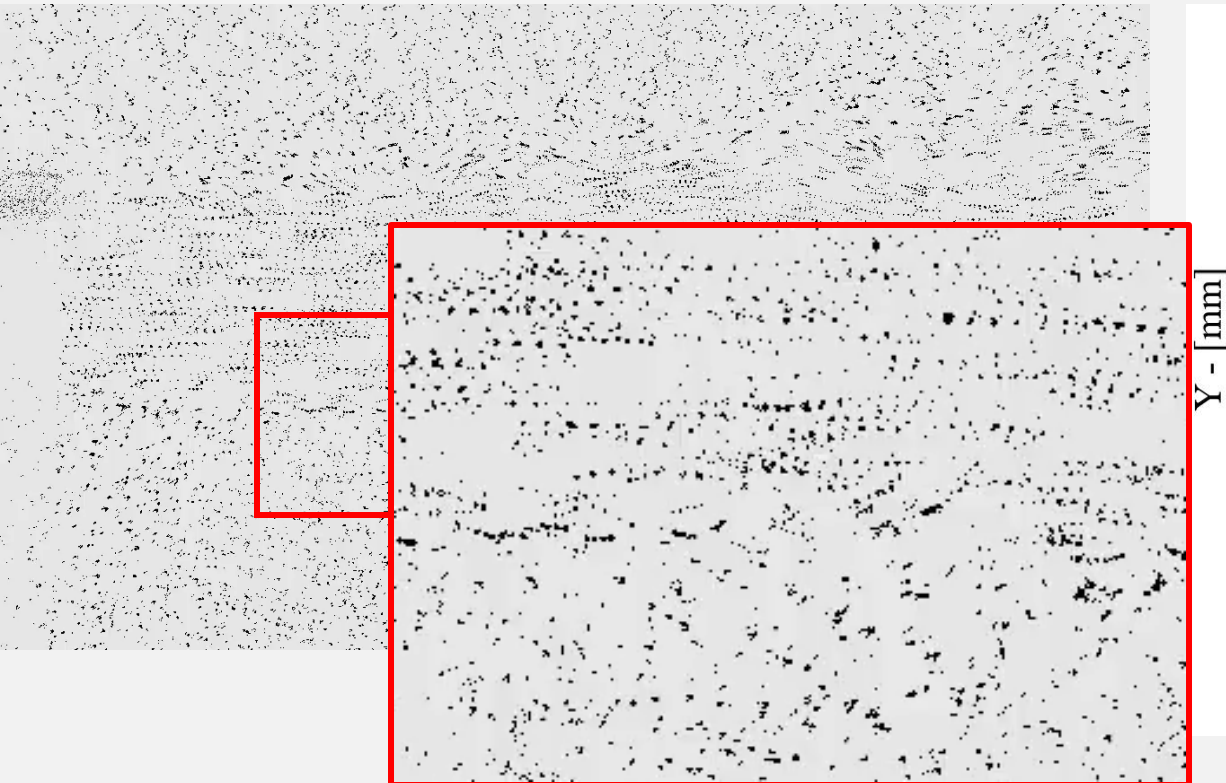
Play-back: 0.0075x

Tracers: 1 μm Aerosol (Paraffin)

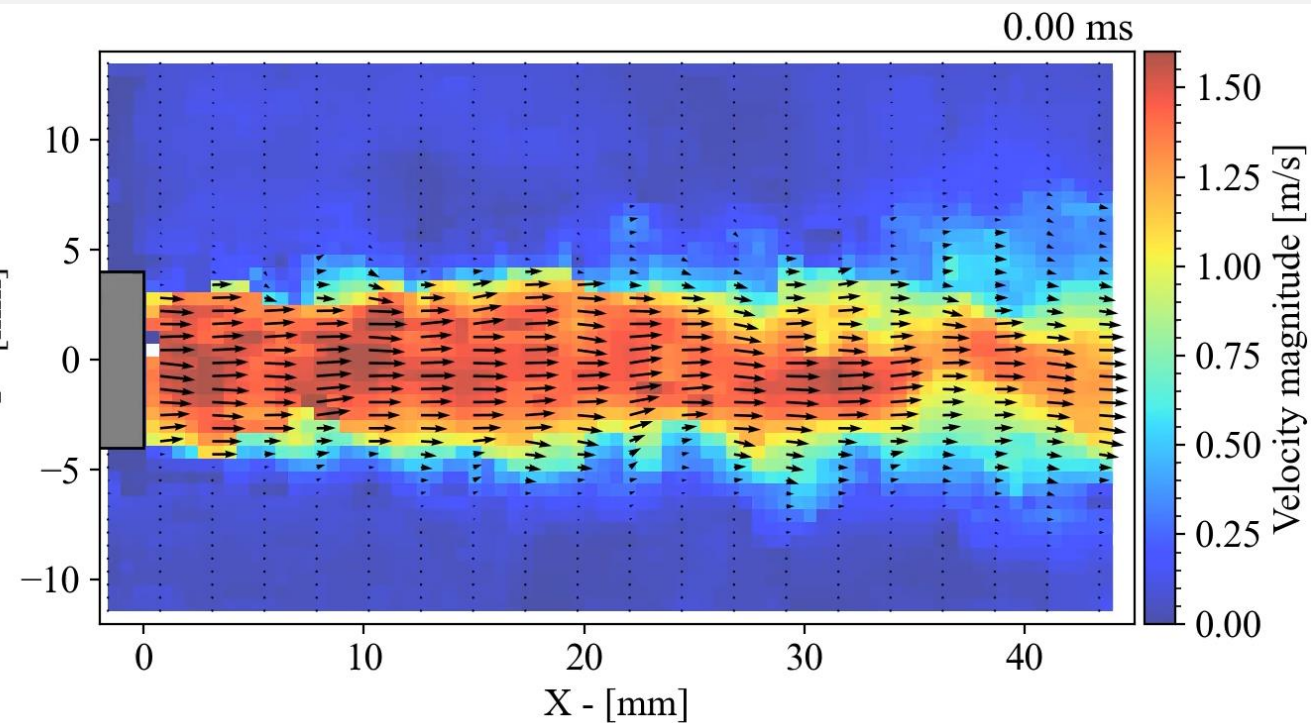


Event-based Imaging Velocimetry (EBIV)

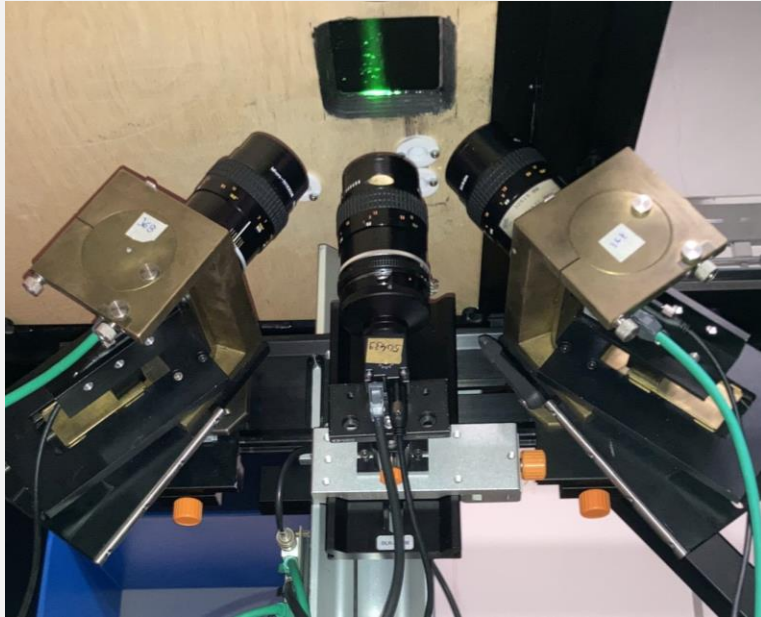
Wasserströmung (Freistrah)



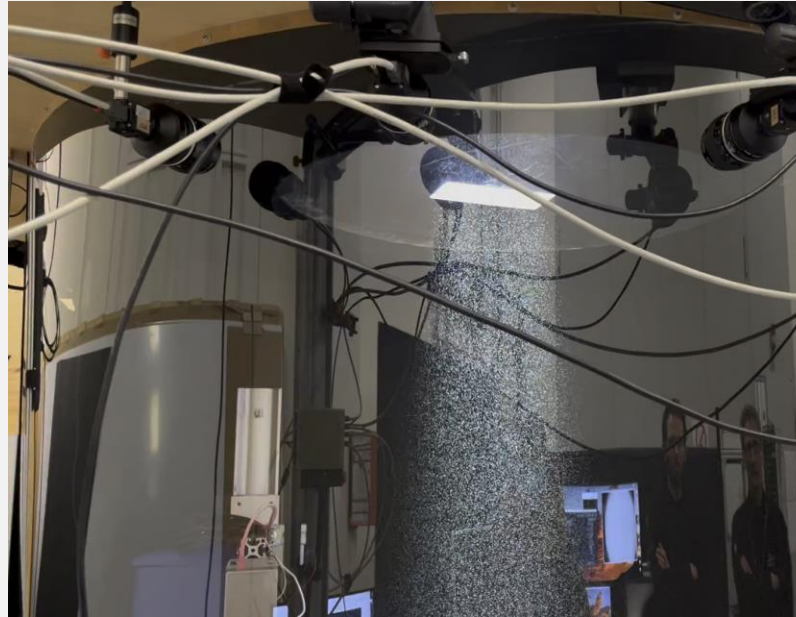
Äquivalente Bildrate von 5 kHz



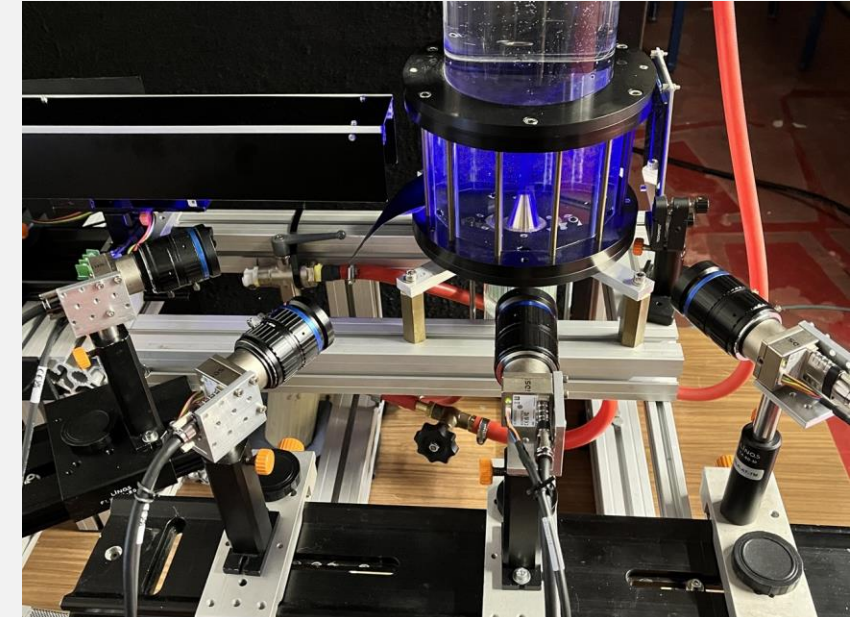
3D-Particle Tracking mit Multi-Eventkamera-Setups



Erfassung der wandnahen
Turbulenz in einen Windkanal



3D-PTV in einer großen
Konvektionszelle



3D-PTV eines Freistrahls in Wasser
(siehe Demo Setup)

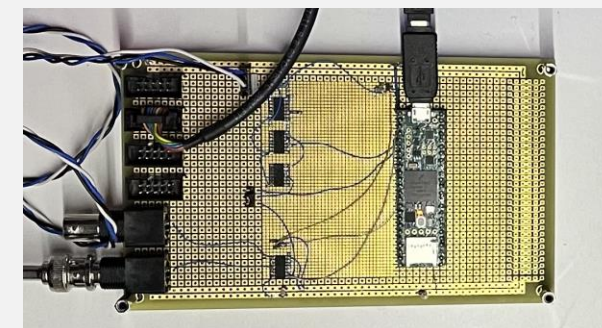
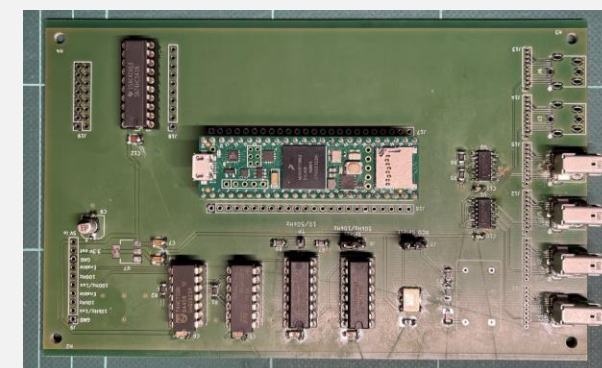
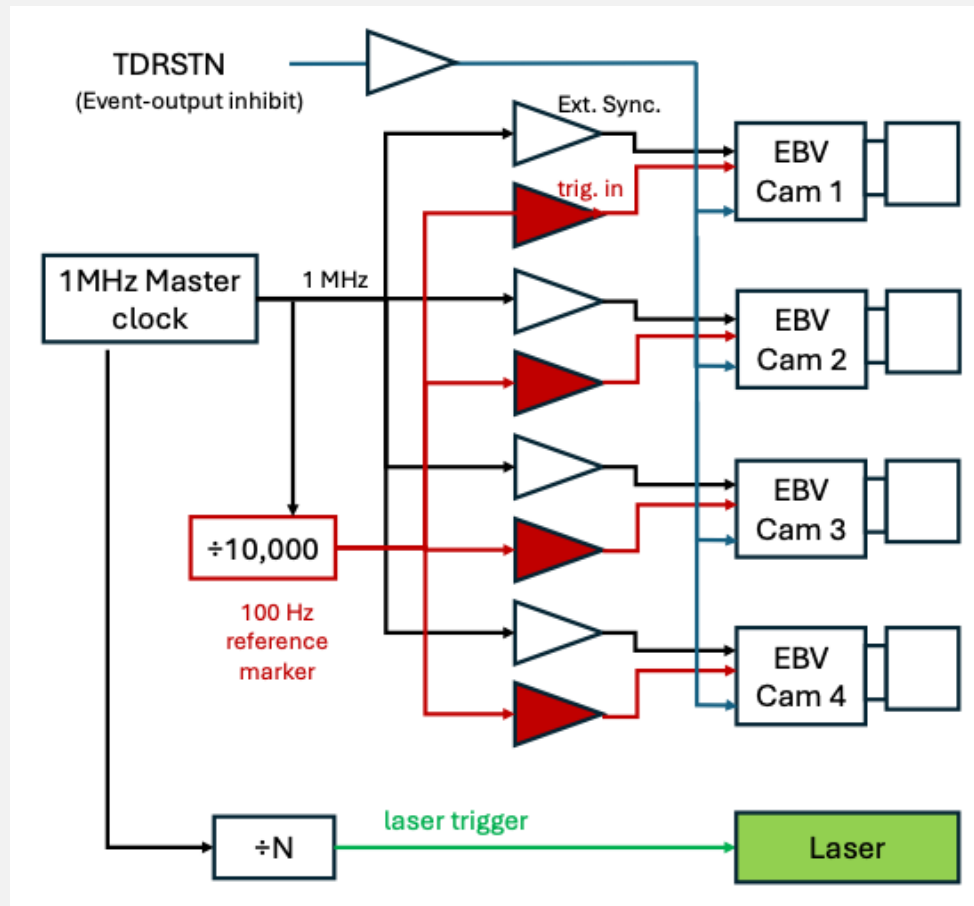
Multi-EBV Camera Controller

Platform: PJRC Teensy 4.1

Synchronisation auf
gemeinsame 1 MHz

Laser Pulsfrequenz und
Pulsbreite

TDRSTN Signal unterbindet
Event-Daten-Strom
(simultaner "Start" aller
Kameras möglich)



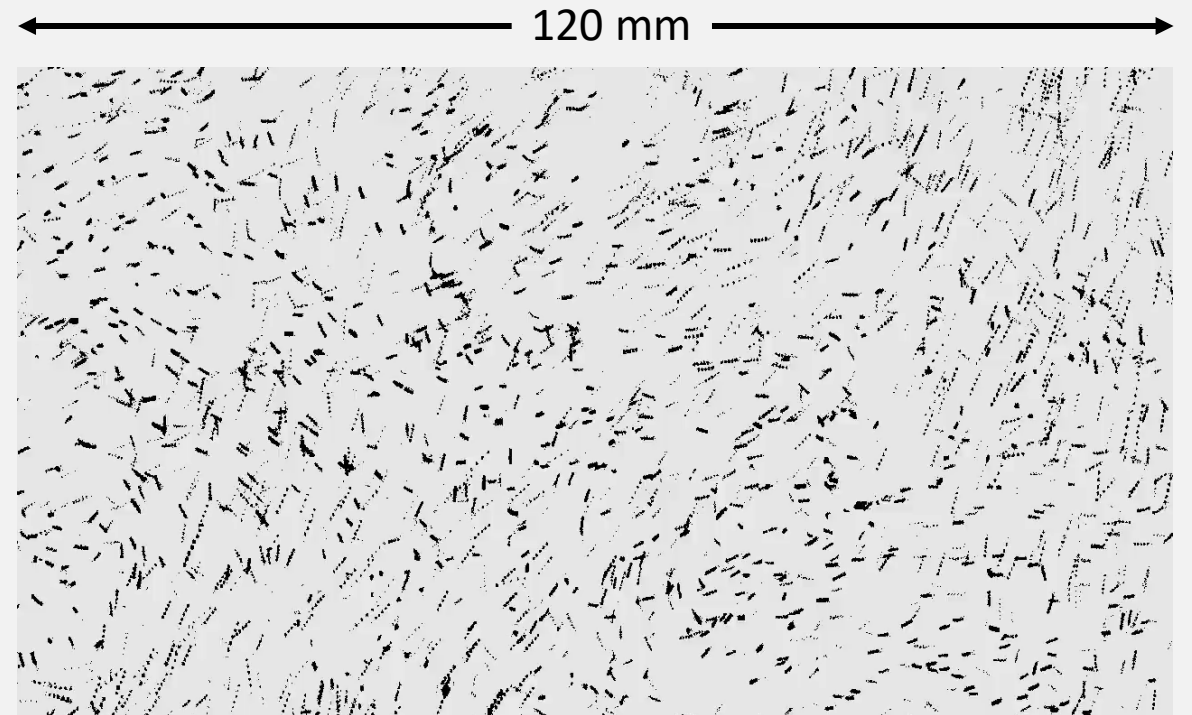
EB-3D-PTV in einer großen Konvektionszelle

Tracer: Helium/Luft gefüllte Seifenbläschen (ca. 500 μm)

1/10th actual speed



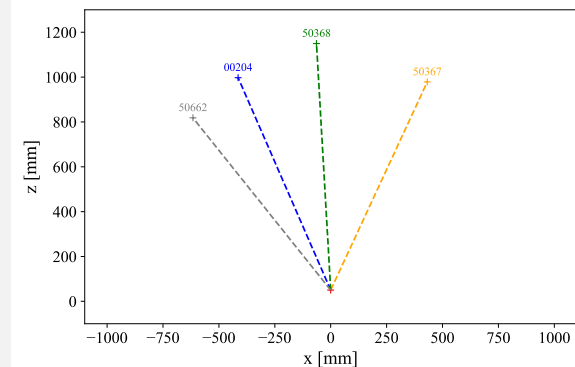
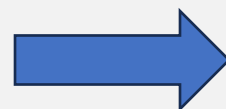
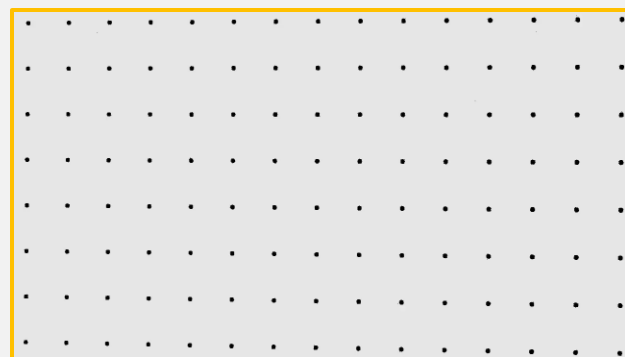
Geringe Tracerdichte (ca. 2 MB/s)



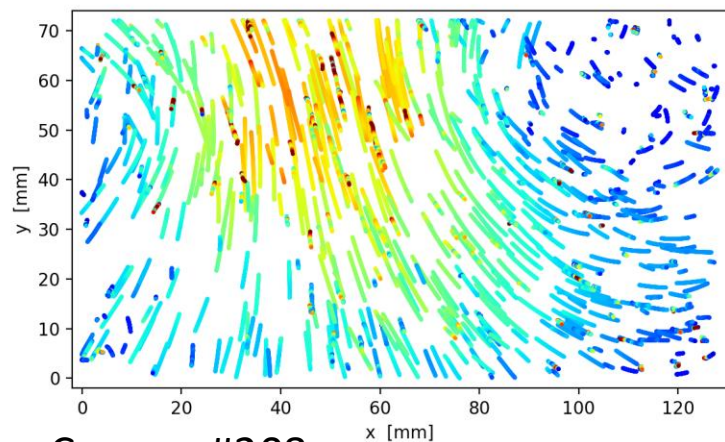
Hohe Tracerdichte (ca. 30 MB/s)

3D-PTV in einer großen Konvektionszelle

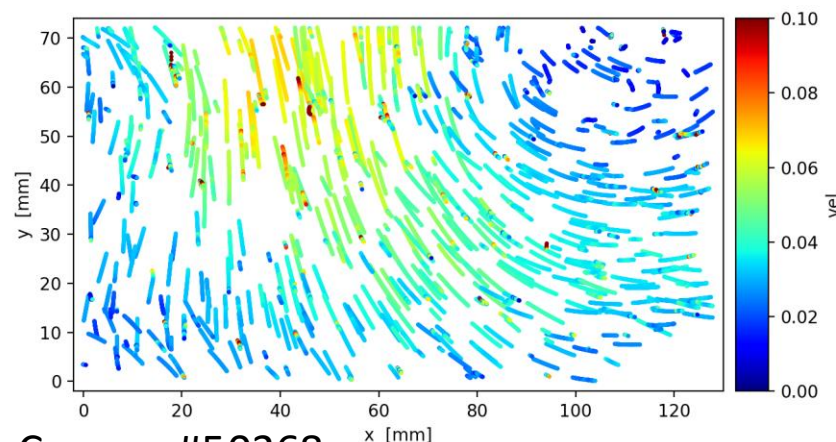
Kamera-Kalibrierung
mit aktivem Target



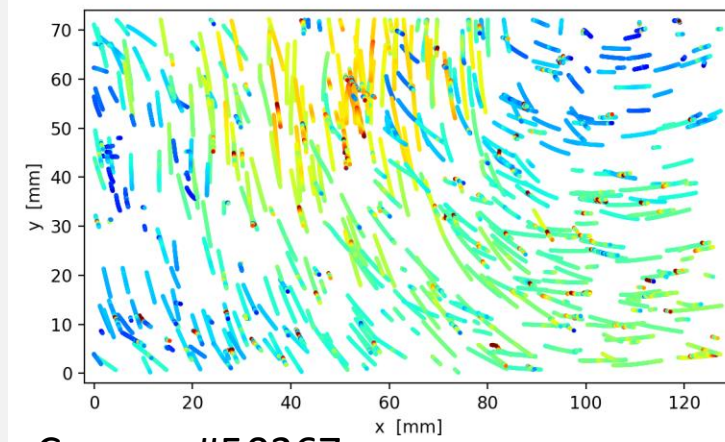
2D Tracking Ergebnisse



Camera #208

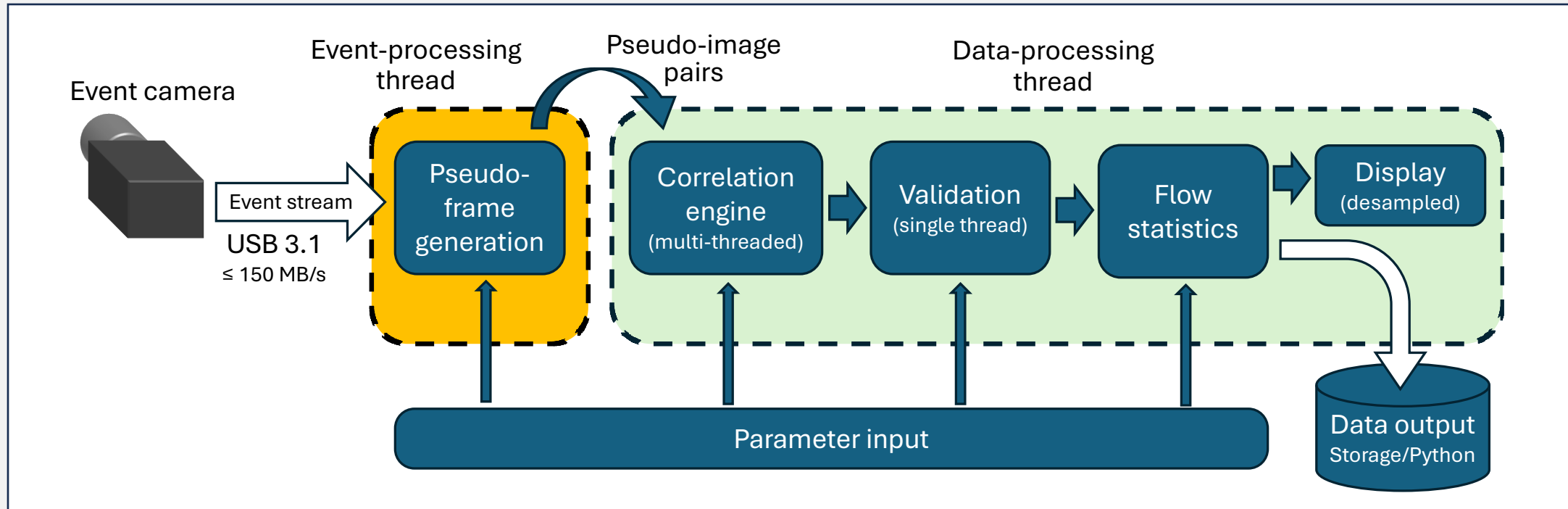


Camera #50368



Camera #50367

Real-Time Event-based Velocimetry (RT-EBIV)

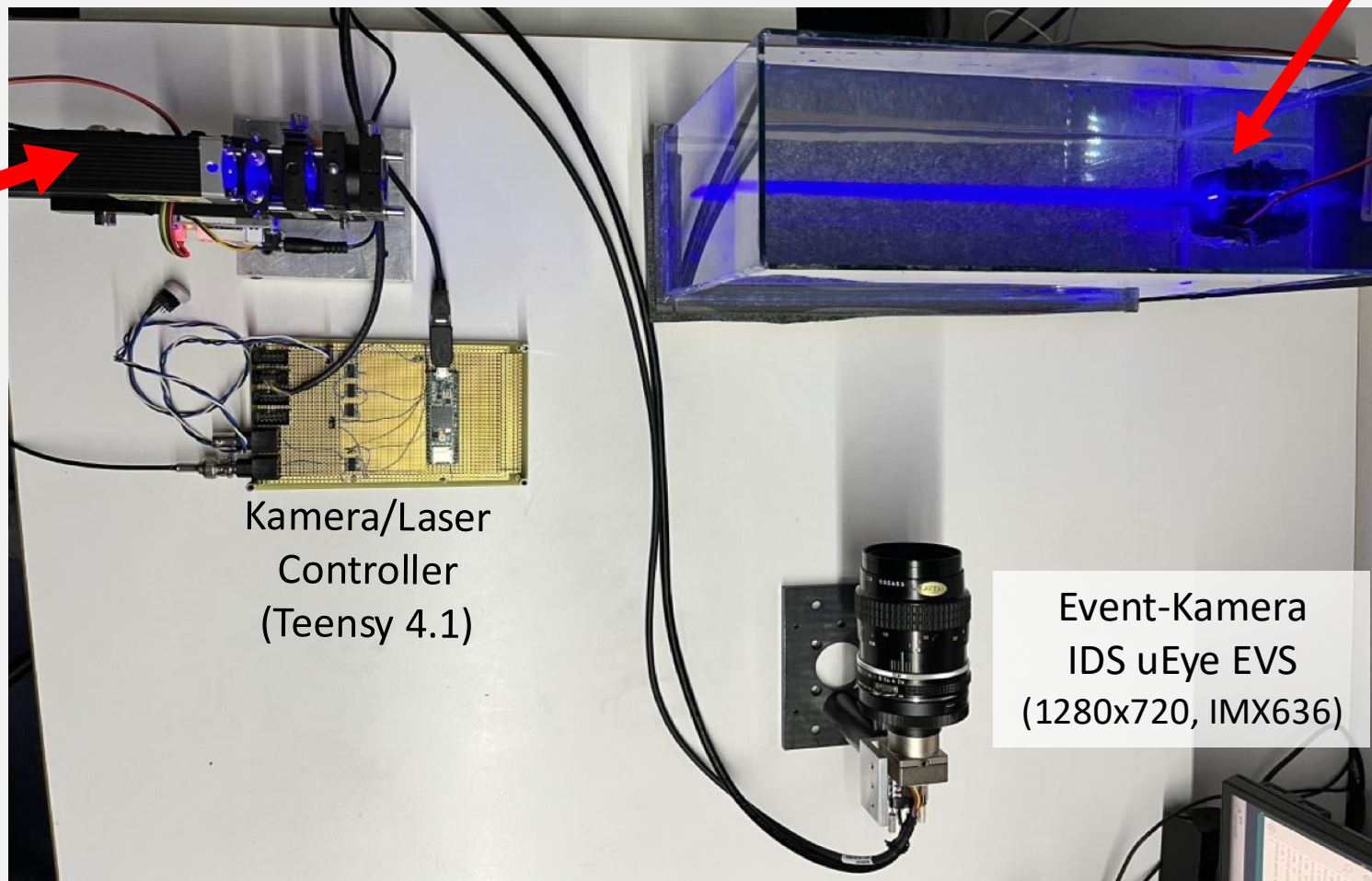


- Kontinuierliche Erzeugung von Pseudo-Bildpaaren aus dem Event-Stream
- Auswertung läuft unabhängig von Bildpaarerzeugung (verhindert Overflow Szenarien)

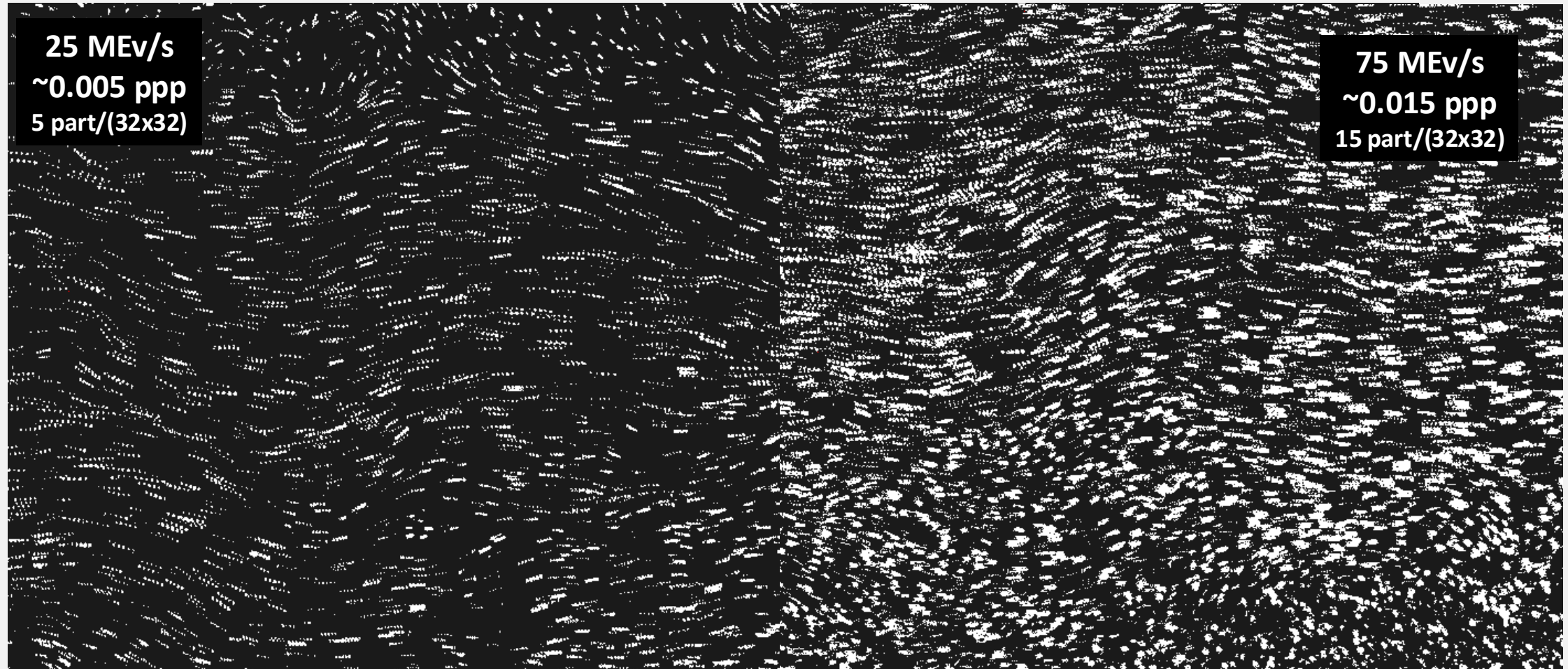
RT-EBIV Testaufbau

100€ CW-Laser
(5W @ 450nm)
with PWM

Messobjekt: Aquarium mit
kleiner Wasserpumpe



Erzielbare Partikelbilddichte



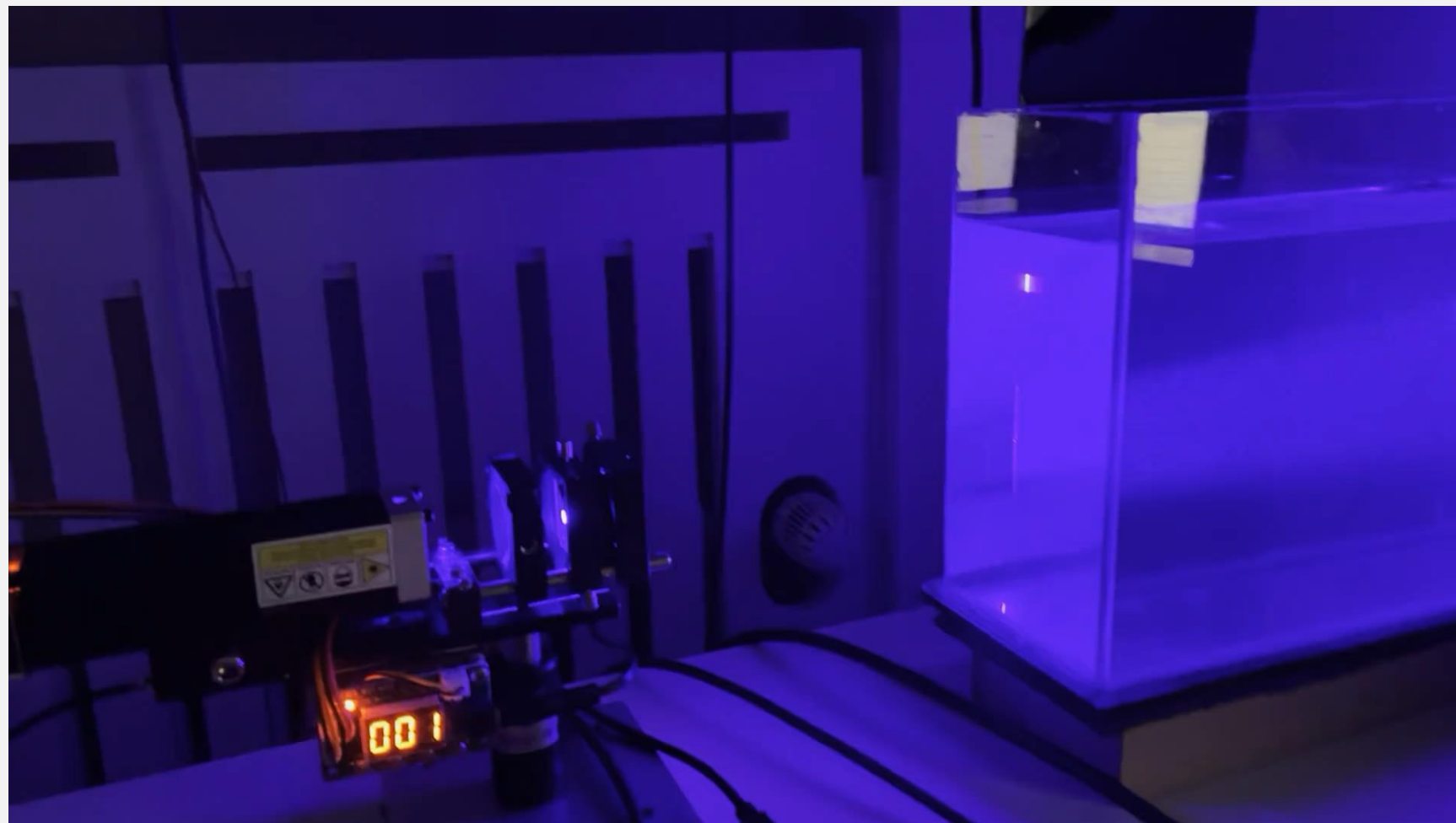
RT-EBIV einer Wasserströmung

Kamera:
IDS uEye EVS
(UE-39B0XCP-E)

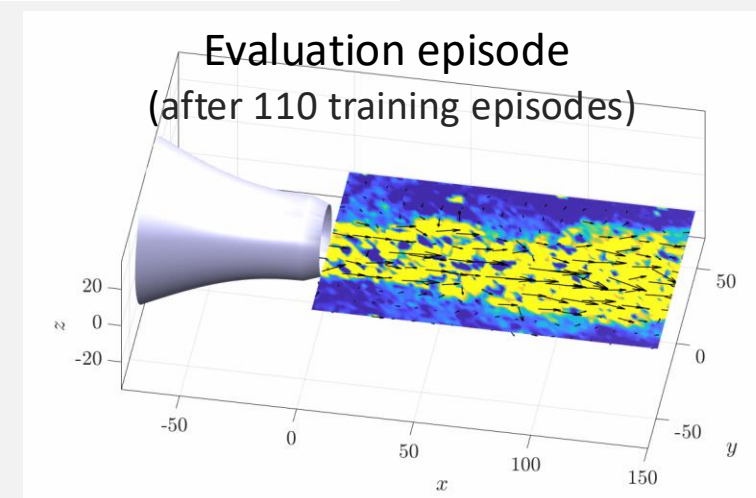
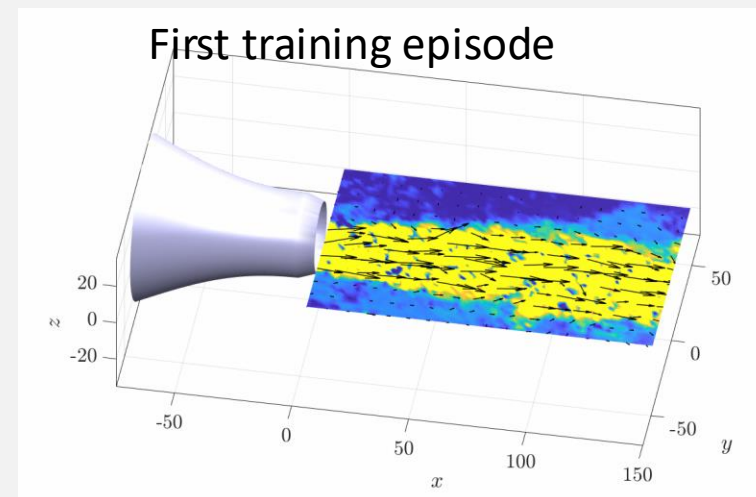
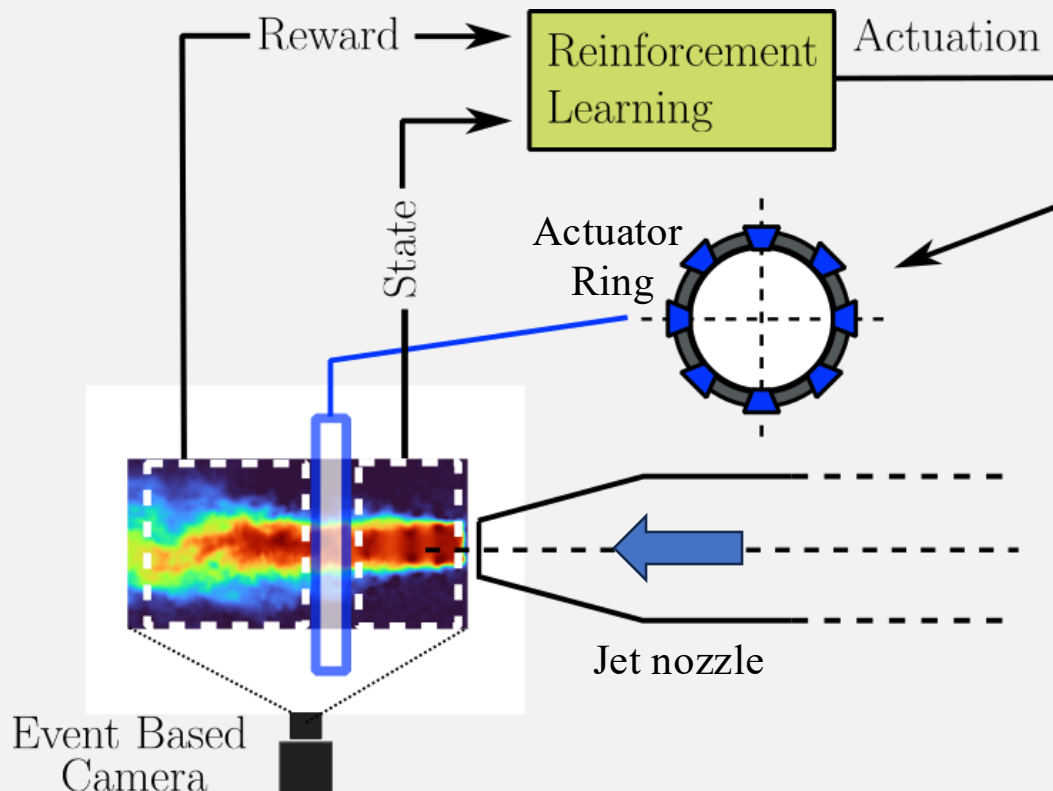
Laser:
50mW intergale Leistung
1 kHz (50μJ/pulse)

Partikel:
20μm Orgasol

Erzielte Datenrate:
bis 600 Strömungsfelder/s



RT-EBIV zur Strömungskontrolle (work in progress)



Optimization Goal:
maximize jet deflection

Zusammenfassung

- Aktuelle EBV Technologie bietet $>10\text{kHz}$ zeitliche Auflösung (Latenz $<100\text{ }\mu\text{s}$) bei gleichzeitig hohem Dynamikbereich ($>120\text{dB}$) bzw. Empfindlichkeit
→ Kostengünstige Alternative zu Frame-based High-Speed Kameras
- Vielfältiger Einsatz in der Strömungsdiagnostik / Visualisierung, auch zur Augmentierung etablierter Messverfahren
- Reduzierter Datenstrom ermöglicht Langzeitaufnahmen/-Statistiken
- Multi-Event-Kamera-Konfigurationen realisierbar durch einfache Synchronisierung
- Bandbreiteneinschränkungen begrenzt Anzahl der simultan erfassten Partikel (ca. 100 M Events/s)
- Echtzeitfähigkeit ermöglicht Active Feedback Control Szenarien (z.B. Turbulenzkontrolle, aktive Strömungsbeeinflussung)
- Kompakte Bauform / niedriger Energiebedarf eröffnet neue Einsatzbereiche (autonome Systeme, On-board / In-flight Diagnostik)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Weiterführende Literatur zu EBIV

- **Event-based imaging velocimetry: an assessment of event-based cameras for the measurement of fluid flows.** Willert & Klinner (2022) Exp.Fluids **63**:101
<https://doi.org/10.1007/s00348-022-03441-6> (open access)
- **Event-based imaging velocimetry using pulsed illumination.** Willert (2023) Exp.Fluids **64**:98
<https://doi.org/10.1007/s00348-023-03641-8> (open access)
- **Event-based particle image velocimetry for high-speed flows.** Willert (2025) Meas. Sci. Technol. **36** 075302
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/ade27a> (open access)
- **An assessment of event-based imaging velocimetry for efficient estimation of low-dimensional coordinates in turbulent flows.** Franceschelli, Willert, Raiola & Discetti, (2025) Exp. Therm. Fluid Sci. **164**: 111425 <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2025.111425> (open access)
- **Dynamic wall shear stress measurement using event-based 3d particle tracking.** Willert & Klinner (2025) Exp.Fluids **66**:32
<https://doi.org/10.1007/s00348-024-03946-2> (open access)

Impressum

Thema: Event-basierte Kameratechnik für die bildgebende Strömungsmessung und Visualisierung

Anlass: IDS Computer Vision Day, Obersulm

Datum: 2025-10-09

Autor: Christian Willert

Institut: DLR Institut für Antriebstechnik

Bildquellen: Alle Bilder „DLR (CC BY-NC-ND 3.0)“, sofern nicht anders angegeben