



Technische  
Universität  
Braunschweig



## Partikelentstehung im Bremsreibkontakt und resultierende Emissionsdynamik

G. Lehne, S. Brandt, M. Sandgaard, J. Kijanski, F. Schiefer, G.-P. Ostermeyer, C. Schilde

# AG Komplexe Partikuläre Systeme und Emissionen



Leitung: Prof. Schilde

FuE zu (Bremsen)Emissionen seit 2018

Heisenberg-Proffessur Prof. Schilde (2022)  
*Digitale Methoden für komplexe Systeme in der  
Verfahrens- und Fertigungstechnik*

## Arbeitsgruppen

**AG Bremse und Reibung**  
Prof. Ostermeyer, Dr. Schiefer

**AG Geschmierte Reibung**  
apl. Prof. Müller

**AG Dynamik**  
Prof. Ostermeyer, Dr. Schiefer

**AG Uncertainty**  
Prof. Römer

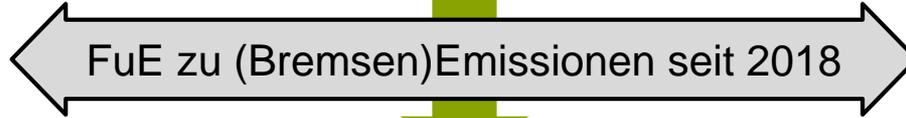
## Forschungsbereiche



# AG Komplexe Partikuläre Systeme und Emissionen



Leitung: Prof. Schilde



## Digitalisierung und komplexe partikuläre Systeme

- AG Komplexe partikuläre Systeme und Emissionen
- AG Multiphysikalische Modellierung von Partikelsystemen
- AG Digitale Methoden der Feststoffverfahrenstechnik

Gf. Leiter: Prof. Ostermeyer  
(bis 03/2022)

## Arbeitsgruppen

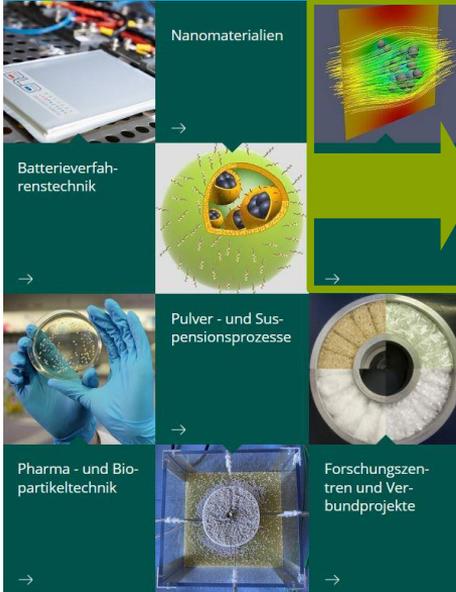
**AG Bremse und Reibung**  
Prof. Ostermeyer, Dr. Schiefer

**AG Geschmierte Reibung**  
apl. Prof. Müller

**AG Dynamik**  
Prof. Ostermeyer, Dr. Schiefer

**AG Uncertainty**  
Prof. Römer

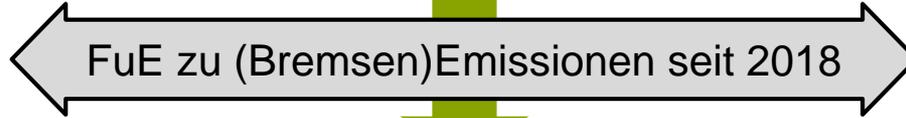
## Forschungsbereiche



# AG Komplexe Partikuläre Systeme und Emissionen

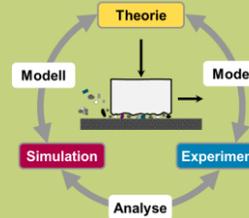


Leitung: Prof. Schilde



## Digitalisierung und komplexe partikuläre Systeme

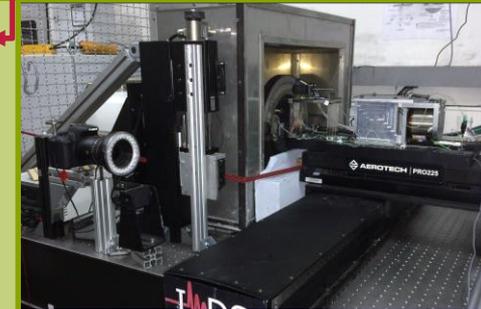
- **AG Komplexe partikuläre Systeme und Emissionen**
  - Analysen zu Reibung, Verschleiß und Emissionen
  - Prüfstand- und Sensorentwicklung
  - Partikelsimulation
  - DEM-CFD-Simulationen
  - Datengetriebene Modellierung
  - Entwicklung von ML-Methoden
  - ...



## Arbeitsgruppen

**AG Bremse und Reibung**  
Prof. Ostermeyer (Berater!)

**AG Geschmierte Reibung**  
apl. Prof. Müller



Tribolabor iPAT@IDS

iPAT Labore

### Forschungsbereiche

	Nanomaterialien	
	Batterieverfahrenstechnik	
	Pulver- und Suspensionsprozesse	
	Pharma- und Biopartikeltechnik	
	Forschungszentren und Verbundprojekte	

# Motivation und Herausforderungen

## Experimentelle/simulative Analyse von Bremsverschleiß und resultierenden Emissionen



Emissionsminimale Reibpaarungen bei optimaler Reibperformance

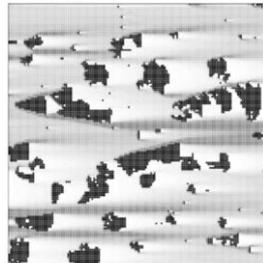
### Bremsverschleiß $\sim$ Bremsenemission!!

abh. von: Lasthistorie, Prozessgrößen, ...

## Grenzschichtdynamik Theorie

und

## Simulation



[2]

1000  $\mu\text{m}$

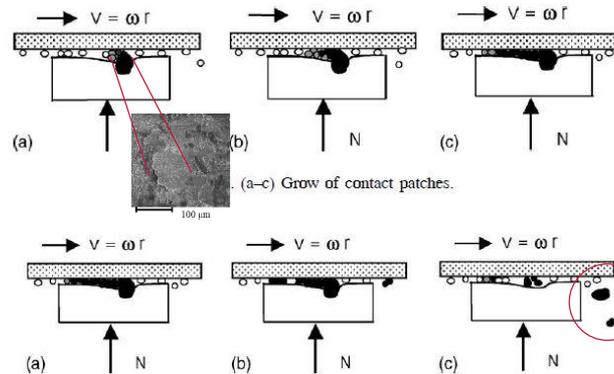
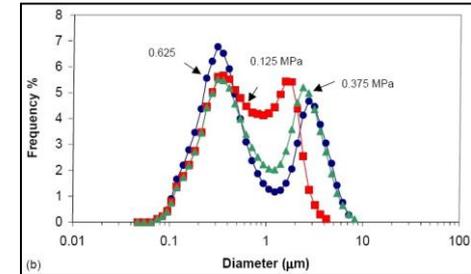


Fig. 6. (a-c) Destruction process of the contact patch.

[1]



Bsp. Verteilung nach [3]

Emittierte Verschleißpartikel

[1] Ostermeyer: On the dynamics of the friction coefficient, Wear 254 (2003) 852-858

[2] Müller, Ostermeyer: A Cellular Automaton model to describe friction and wear mechanism of brake systems Wear 263 (2007) 1175-1188

[3] Mosleh et al., Wear 256 (2004) 1128-1134

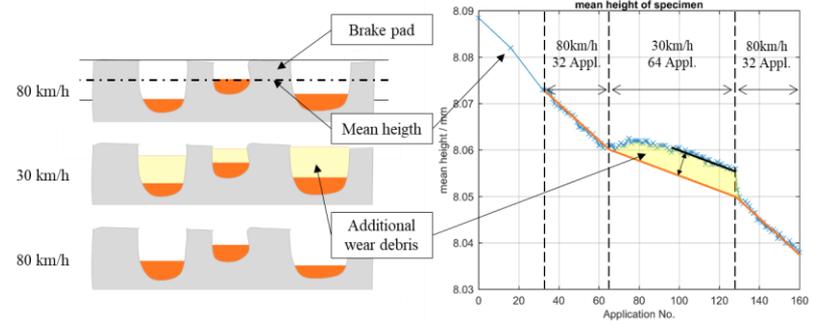
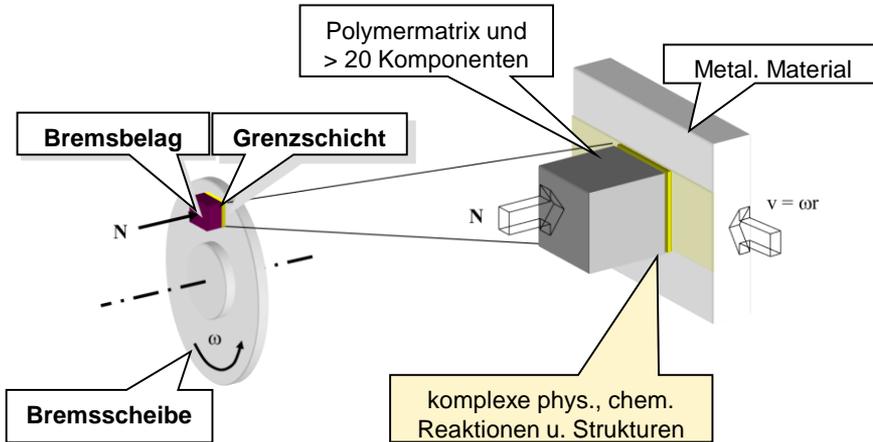
# Motivation und Herausforderungen

## Experimentelle Untersuchungen – Pin-on-disk Tester

➔ Teilbelagprüfstand



**Spezifische Prüfprozeduren zeigen temporär “negativen” Verschleiß**

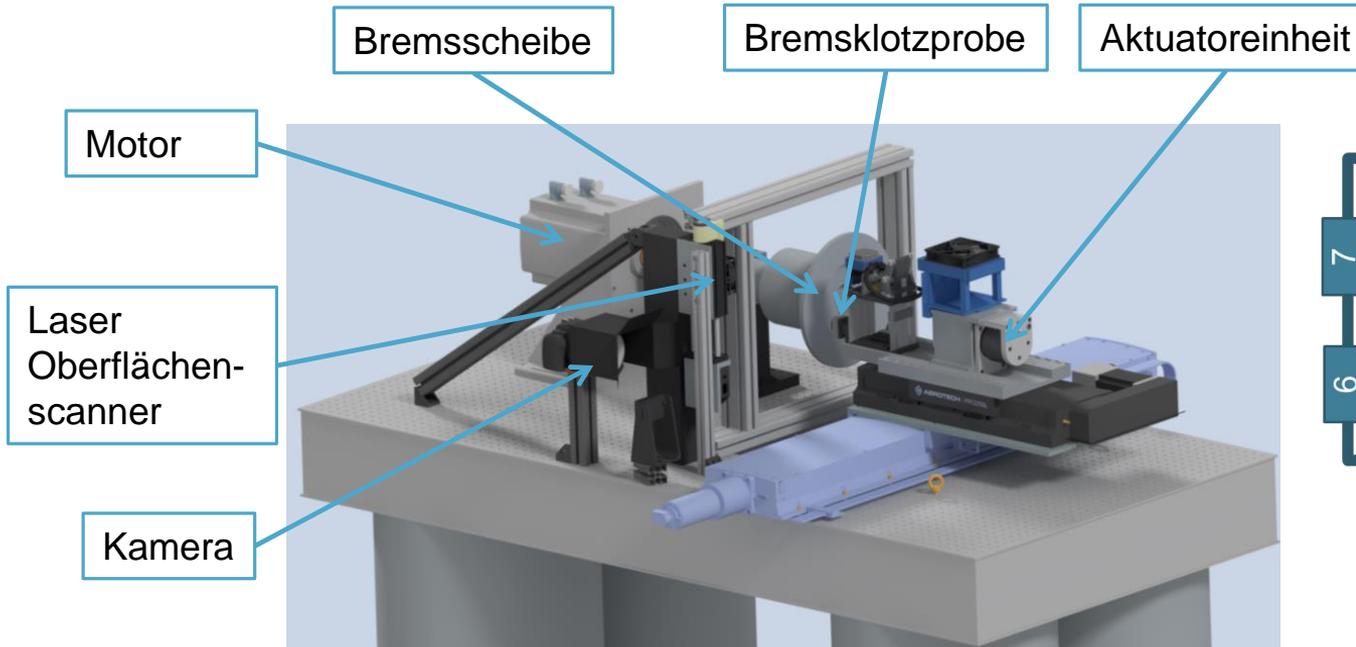


[5]

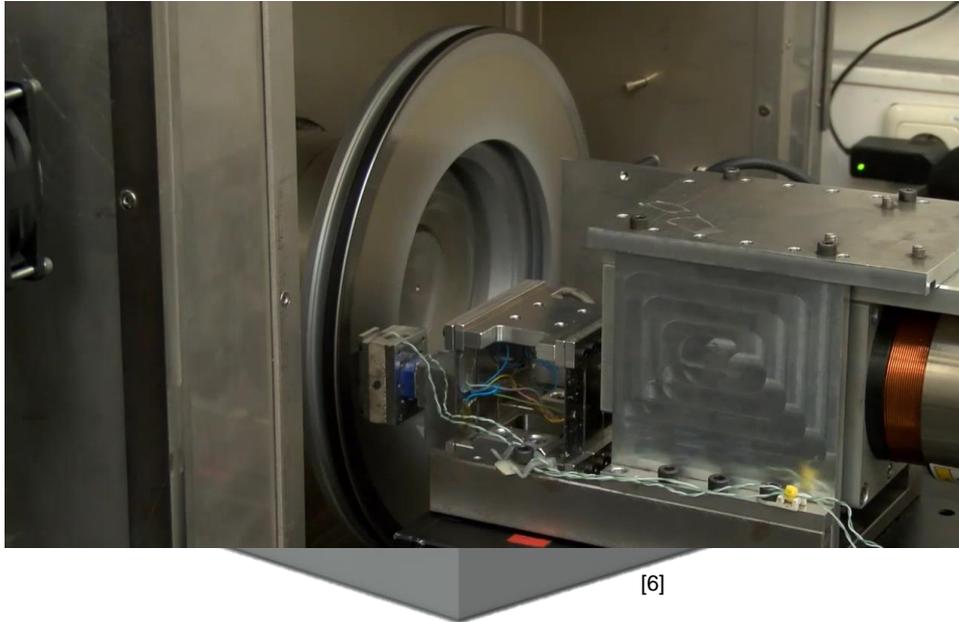
**Beschreibung Grenzschichtdynamik und Emissionsdynamik!!**

[4]

# Experimenteller Messaufbau (AUT)



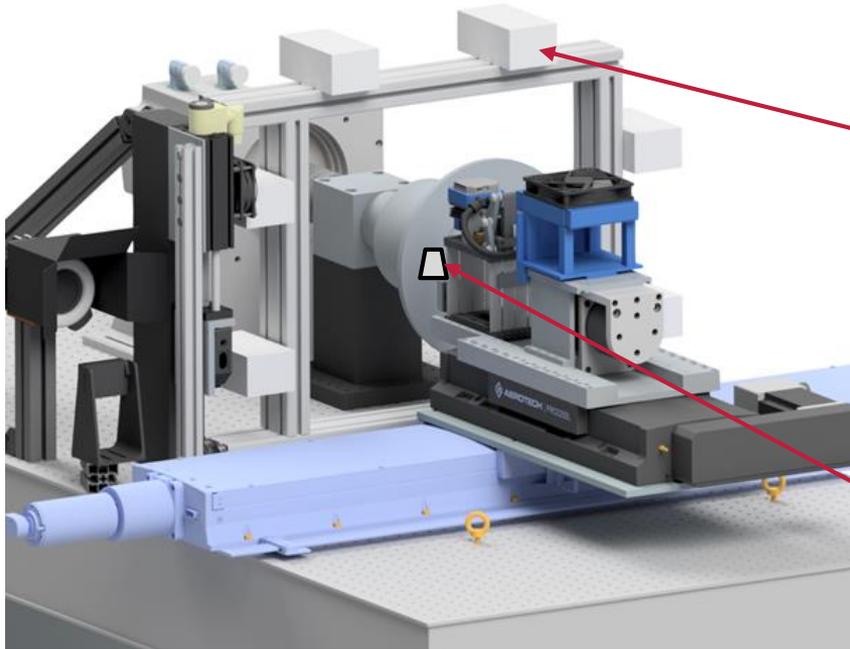
# Automated Universal Tribotester (AUT)



## Erfassung/Festlegung von:

- Belags- und Scheibentemperatur
- Kräfte (Normal, Radial, Tangential)
- Reibzahl
- Flächenpressung
- Drehzahl / Relativgeschwindigkeit
- Gleitdauer
- Topografie (Belag / Scheibe)
- Emissionen (**Partikel**, Schall)
- Luftfeuchte / Lufttemperatur
- ...

## Automated Universal Tribotester

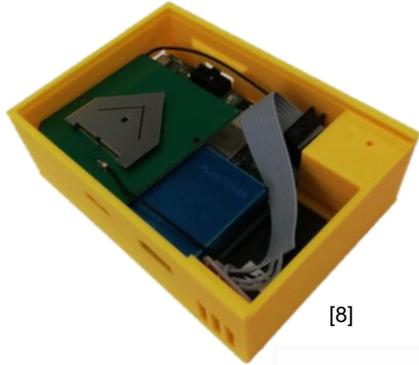


## Schwarmsensoren

- Räumliches Emissionsverhalten
- Zeitliche Betrachtung der Partikelkinetik

## Absaugpunkt Emissionsmessgeräte

- Partikelgrößenverteilung
- Emissionskonzentration
- TSI EEPS (5,6nm – 560nm)
- Palas Promo 1000 (120 nm – 40  $\mu\text{m}$ )

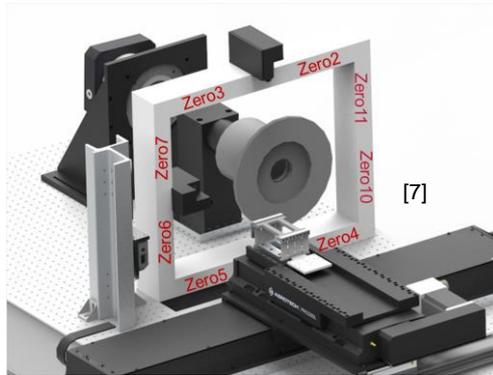


[8]

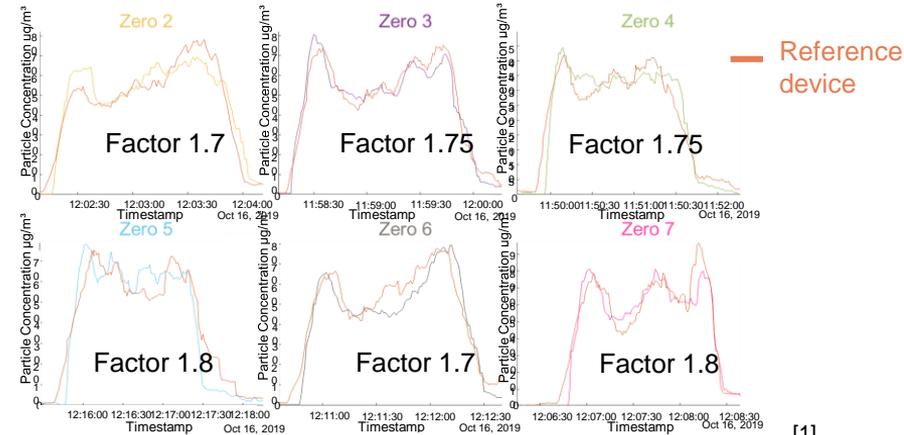
## Schwarmpartikelsensoren PM 1, 2.5, 10, 100

Untersuchung von Ausbreitungscharakteristiken

- Am Prüfstand
- Im Freifeld

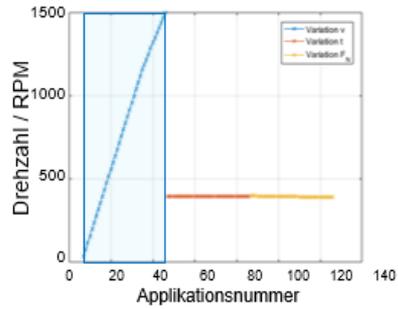


[7]



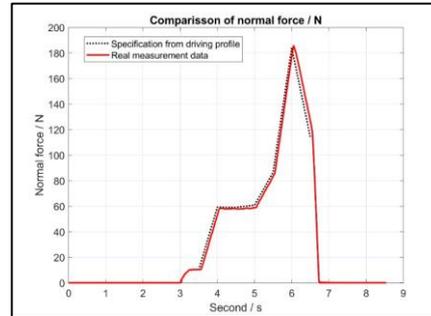
[1]

## Allgemeine Charakterisierung



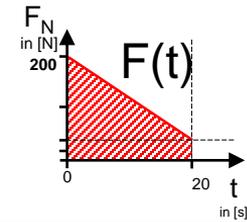
Stationäre Prozedur

## Realitätsnah



Fahrprofile

## Spezielle Fragestellungen

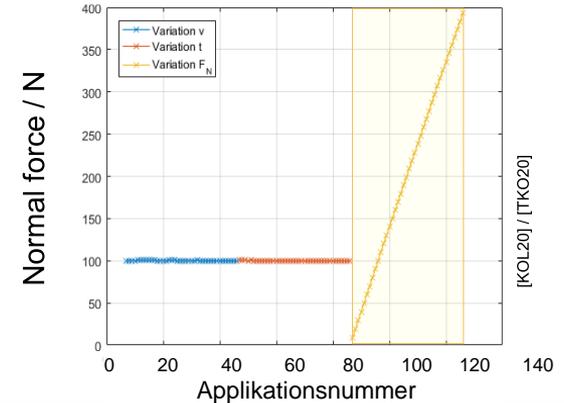
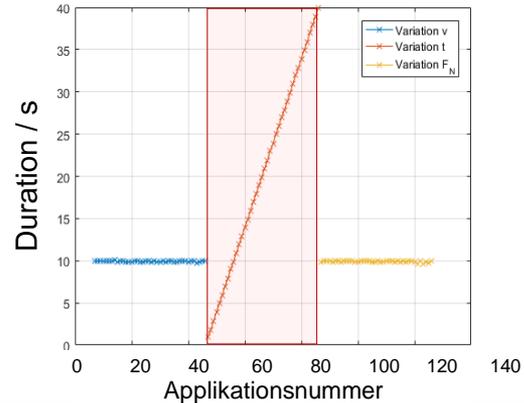
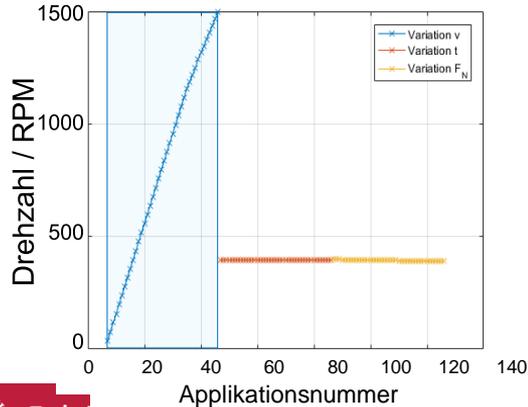


Individuelle  
Prozeduren

# Messprozedur „Stationär“

## Basis

Gleitgeschwindigkeit [m/s]	Applikationsdauer [s]	Flächenpressung [N/mm <sup>2</sup> ]
6.7	10	0.5
<b>1</b> <u>Drehzahlvariation:</u> 0.67-25.24 m/s In Schritten von 0.63 m/s	<b>2</b> <u>Zeitvariation:</u> 1-40 s In Schritten von 1 s	<b>3</b> <u>Druckvariation:</u> 0.05-2.0 N/mm <sup>2</sup> In Schritten von 0.05 N/mm <sup>2</sup>



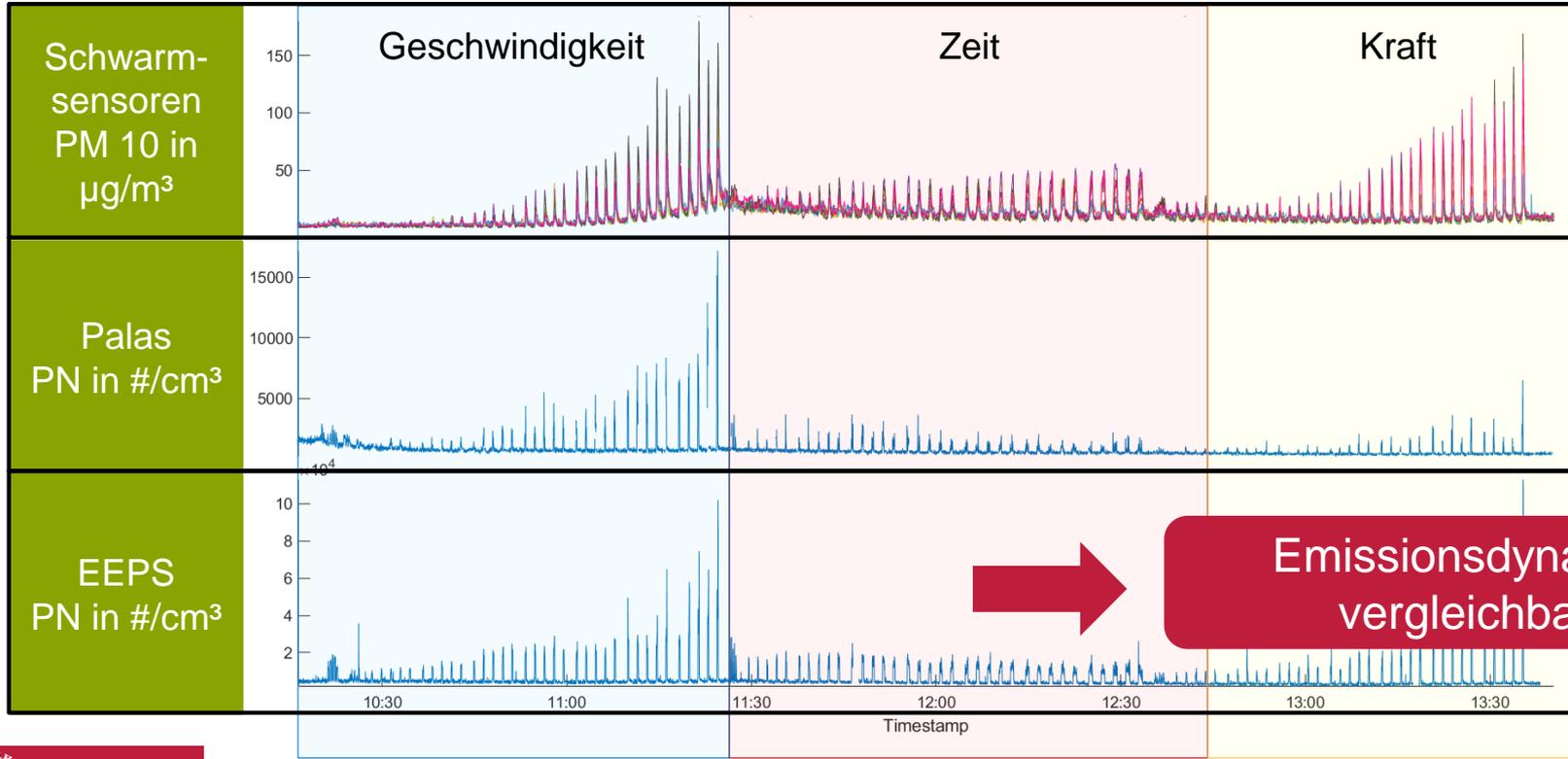
[KOL20] / [TKO20]

Applikationsnummer

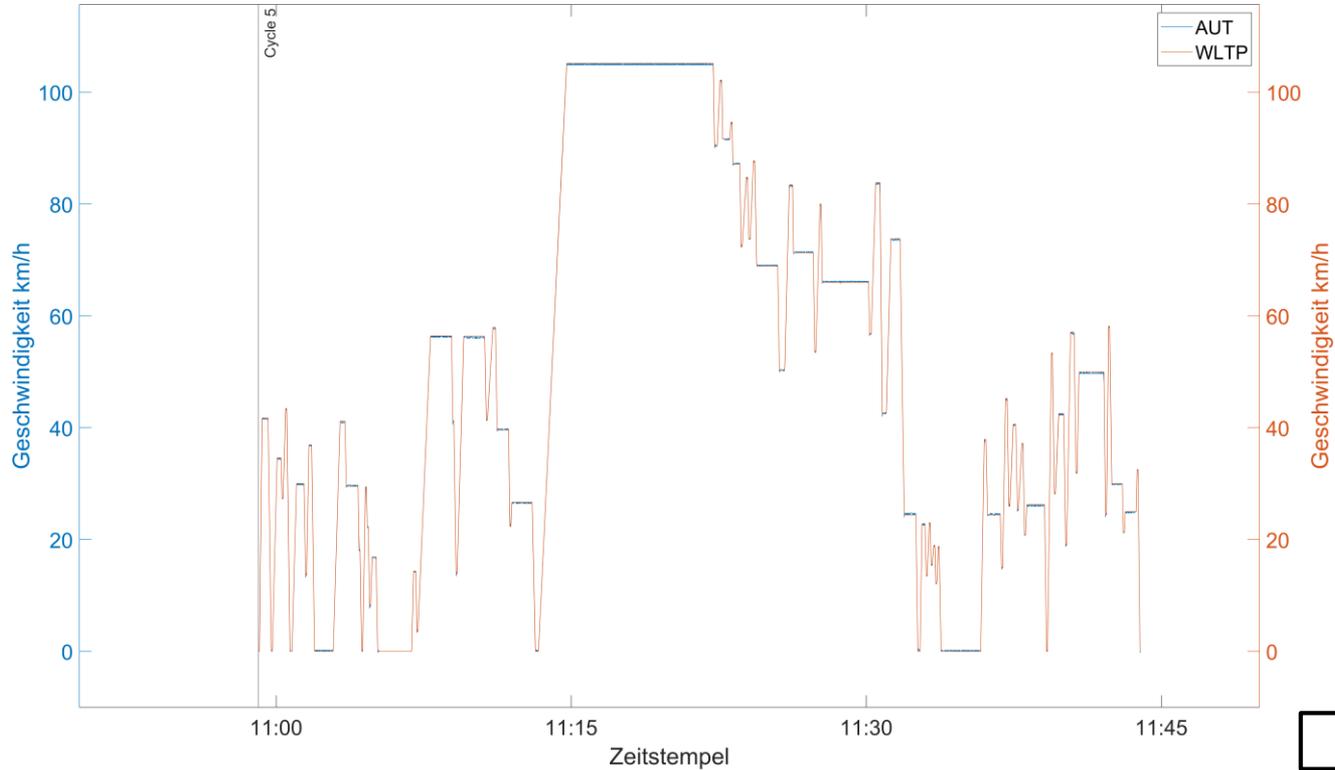
Applikationsnummer

Applikationsnummer

# Exemplarische Ergebnisse: Prozedur „Stationär“



# Soll-Ist Vergleich „WLTP“ am Tribometer



Cycle 5

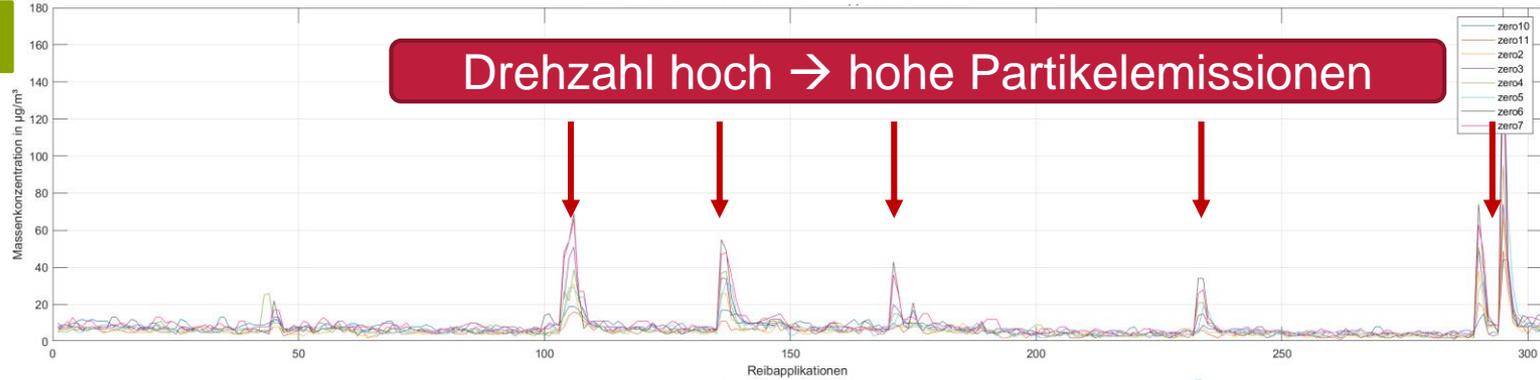
# Reproduzierbarkeit von „WLTP“-Messungen



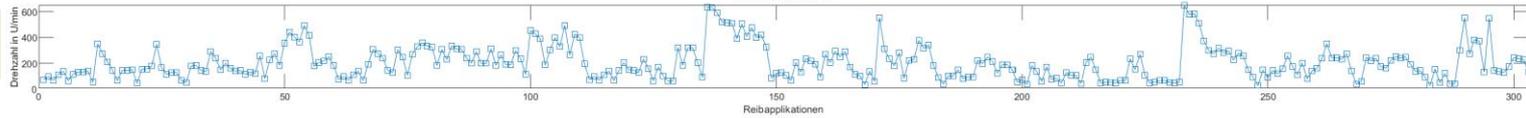
Gute Reproduzierbarkeit !

# „WLTP“ Emissionen über Betriebsbedingungen

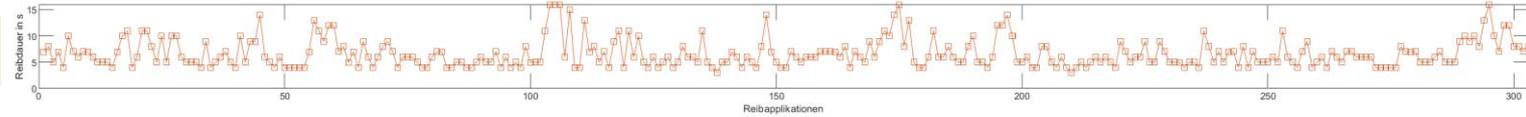
PM 10



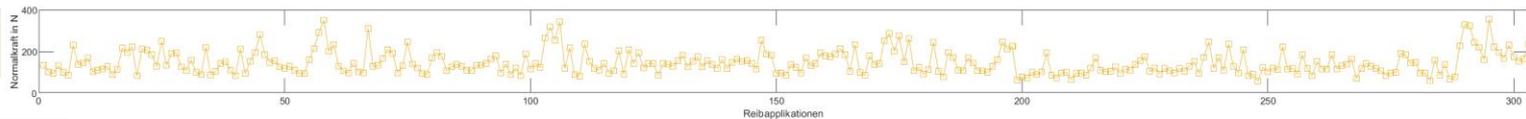
RPM

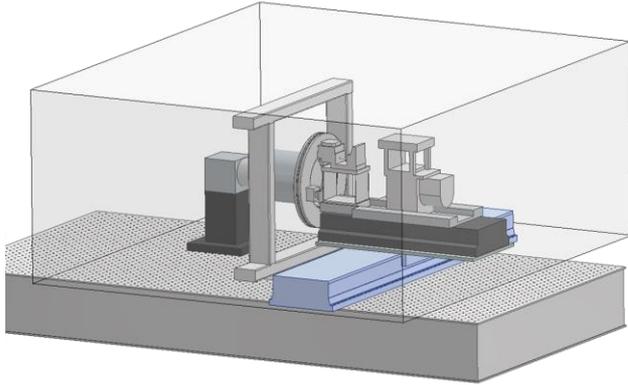


Dauer



Last



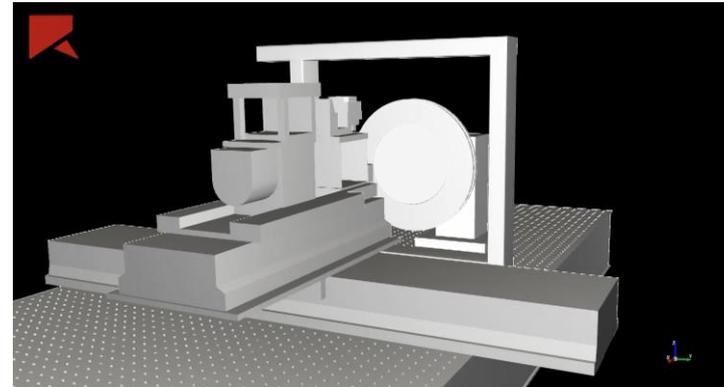


## Aufbau CFD:

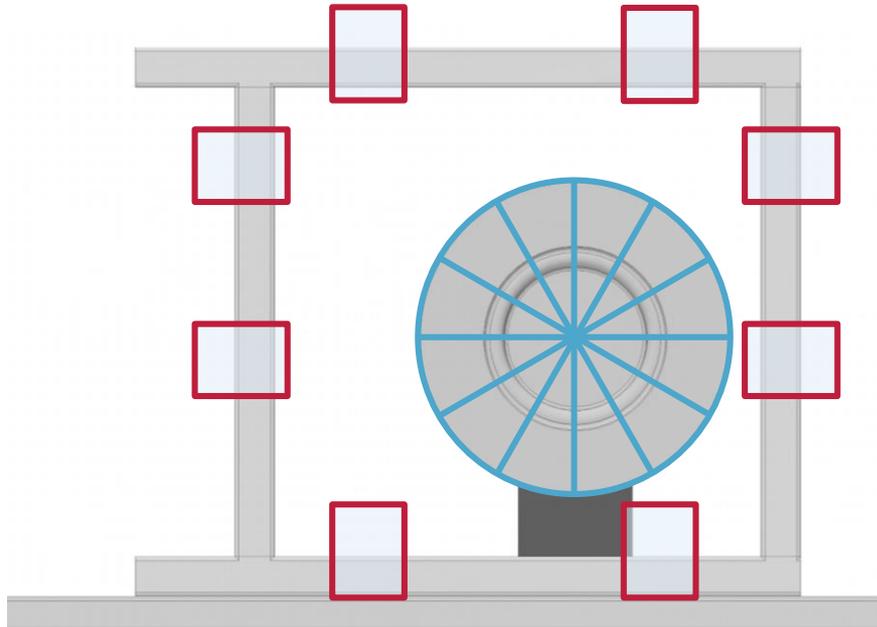
- Vereinfachte Prüfstandgeometrie
- Transiente Simulation
- "Rotating Mesh" Ansatz
- Turbulenzmodell: k-omega SST

## DEM Kopplung:

- Einwegekopplung
- Musterpartikel ( $1,6 \text{ g/cm}^3$ , 500 nm)
- Kontakt linear-elastisch
- Partikelanzahl 12.000 – 30.000



# Analyse der räumlichen Partikelverteilung



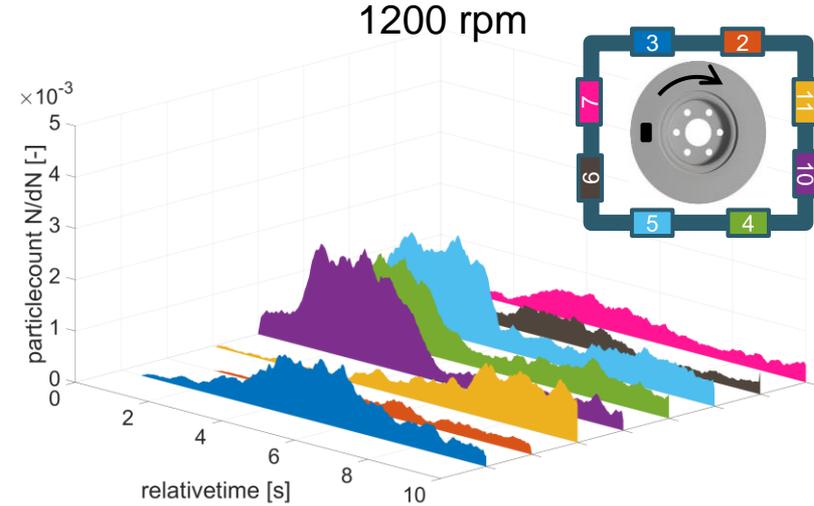
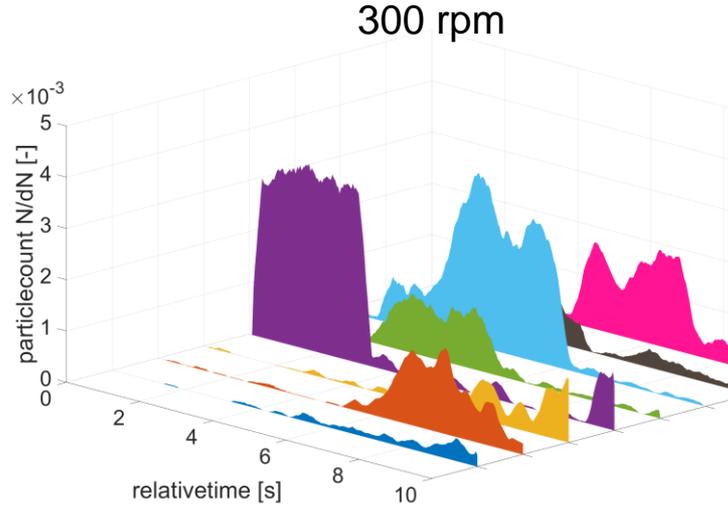
## Abgleich mit dem Schwarmsensormesystem

- Auswertevolumina zur Repräsentation des vom Sensor analysierten Luftstroms
- Positioniert identisch zur Schwarmsensorik

## Analyse des Partikelverhaltens auf der Scheibenoberfläche

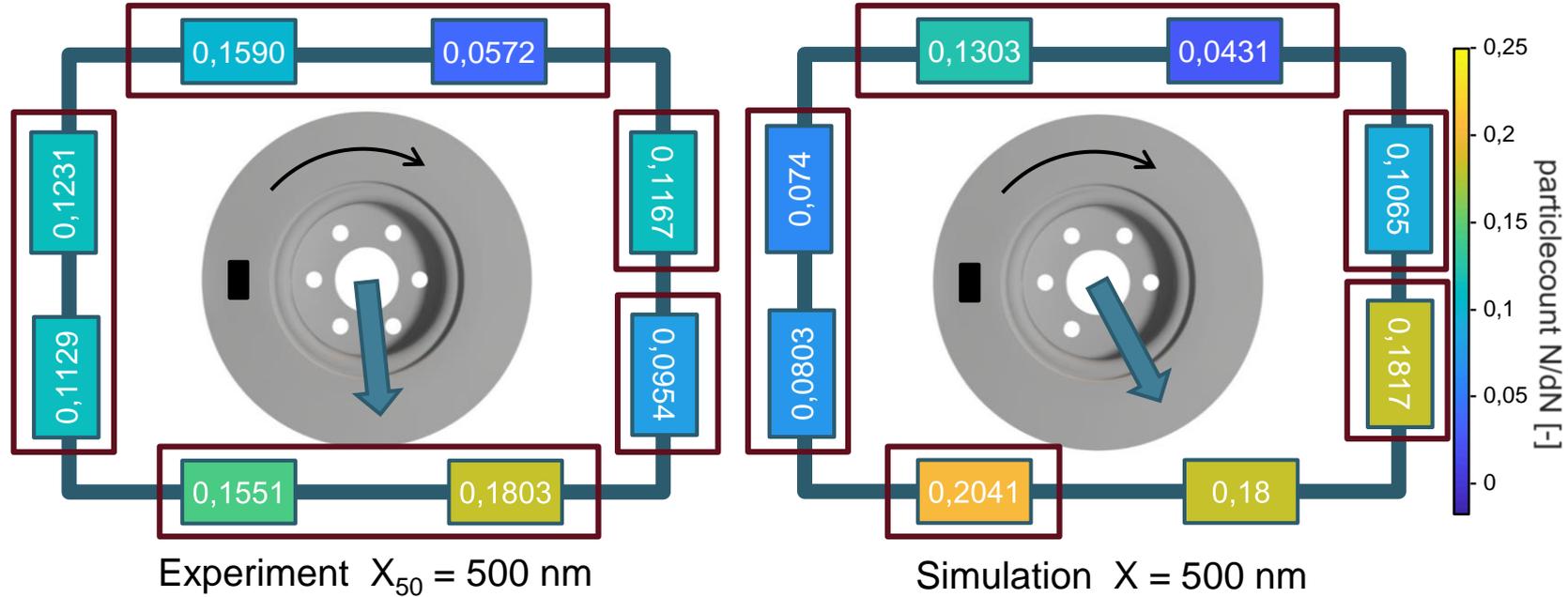
- 12 Sektoren
- Höhe 10 mm
- Analyse des Austrittsbereiches der Partikel aus dem Scheibenströmungsfeld

# Eine erste Parameterstudie



Das Modell bildet die erwarteten Veränderungen bei Erhöhung der Scheibendrehzahl ab

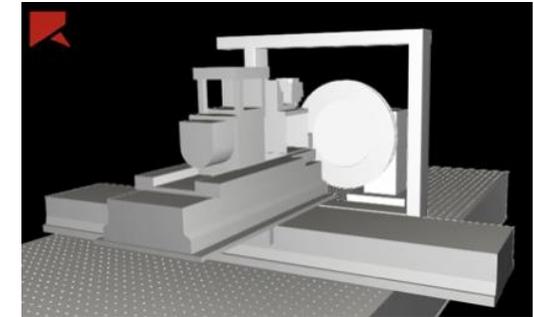
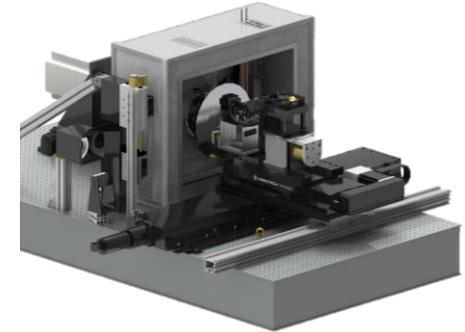
# Vergleich von Simulation und Experiment



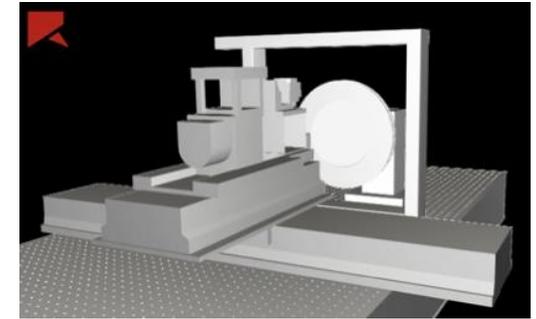
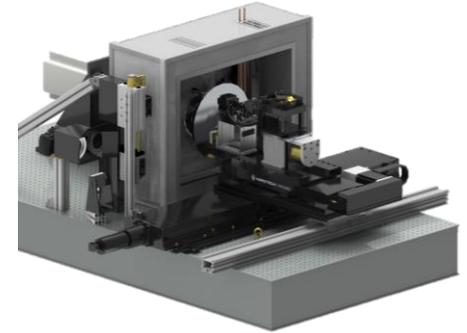
Parallelen in der räumlichen Verteilung erkennbar

# Zusammenfassung

- Mit Tribometer sehr gut reproduzierbare Tribomessungen von Reibpaarungen unter variablen Rand- und Prozessbedingungen möglich
  - Hochpräzise Relativvergleiche unterschiedlicher Reibpaarungen möglich
  - „Rapid-Prototyping/Testing“ durch Teilbelagsprüfstand möglich
- Analyse von Partikelentstehung, Verschleiß und Emission
  - Verständnisgewinn experimentell und simulativ
  - Simulation der Nahfeldpartikeldynamik

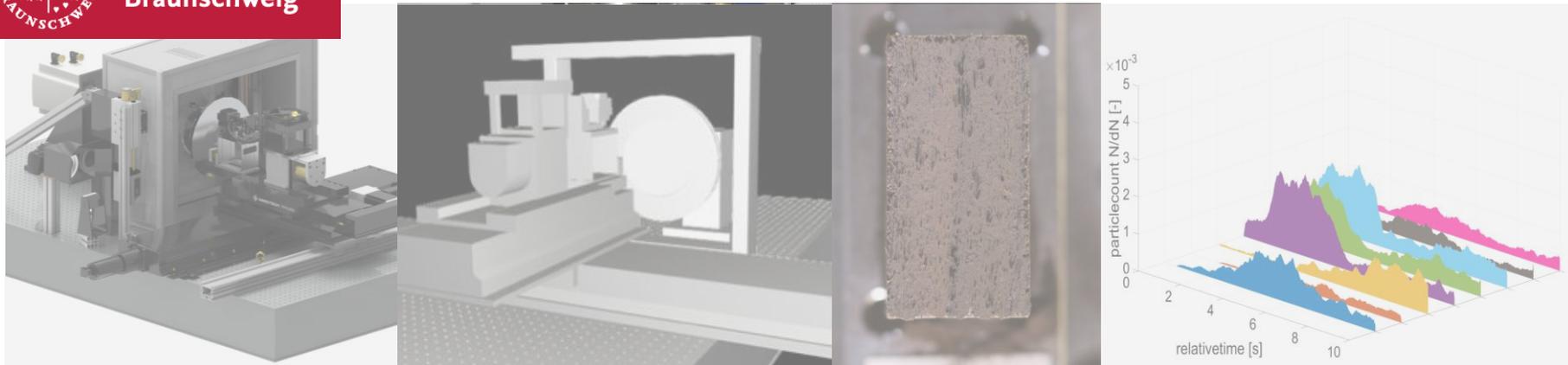


- Messung der Partikelaustrittsgeschwindigkeit
- Einfluss Partikelgröße auf Verteilung
- Bilanzgleichungen zur Beschreibung der Grenzschichtdynamik bis zur Partikelemissionsdynamik
- KI-unterstützte Datenauswertung und datengetriebene Modelle
- Realfahrzeugversuch zu Bremsen- und Reifenemissionen
- Onlineanalytik von luftgetragenen Reifenabriebpartikeln (OLRAP)





Technische  
Universität  
Braunschweig



## Kontakte

Prof. Dr.-Ing. Carsten Schilde

TU Braunschweig – Institut für Partikeltechnik

Tel. +49 (0) 531 391-65551

c.schild@tu-braunschweig.de

Dr.-Ing. Frank Schiefer

TU Braunschweig – Institut für Partikeltechnik

Tel. +49 (0) 531 391-7006

f.schiefer@tu-braunschweig.de