

# ZEDU-1: Zero Emission Drive Unit Phase 1



**Mobilität ohne Feinstaubemissionen aus Brems- und Reifenabrieb  
- (Mess-) Konzepte und erste Ergebnisse -**

**F. Philipps, L. Bondorf, L. Köhler, F. Epple**



## Kurzvorstellung:



**Franz Philipps**  
Teamleiter System und Fahrzeugvalidierung  
DLR – FK / FEK  
Stuttgart  
[franz.philipps@dlr.de](mailto:franz.philipps@dlr.de)

## Werdegang:

- Studium der Physik an der Universität Karlsruhe
- Im DLR seit 1998

## Zuständigkeitsbereich:

- Teamleiter & Personalverantwortung
- Projektleiter
- Großanlagenverantwortlicher



# Agenda

1

## Übersicht

DLR & FK  
Problemstellung  
Motivation

2

## Lösungsansatz

Projekt  
Konzept Bremse  
Konzept Reifen

3

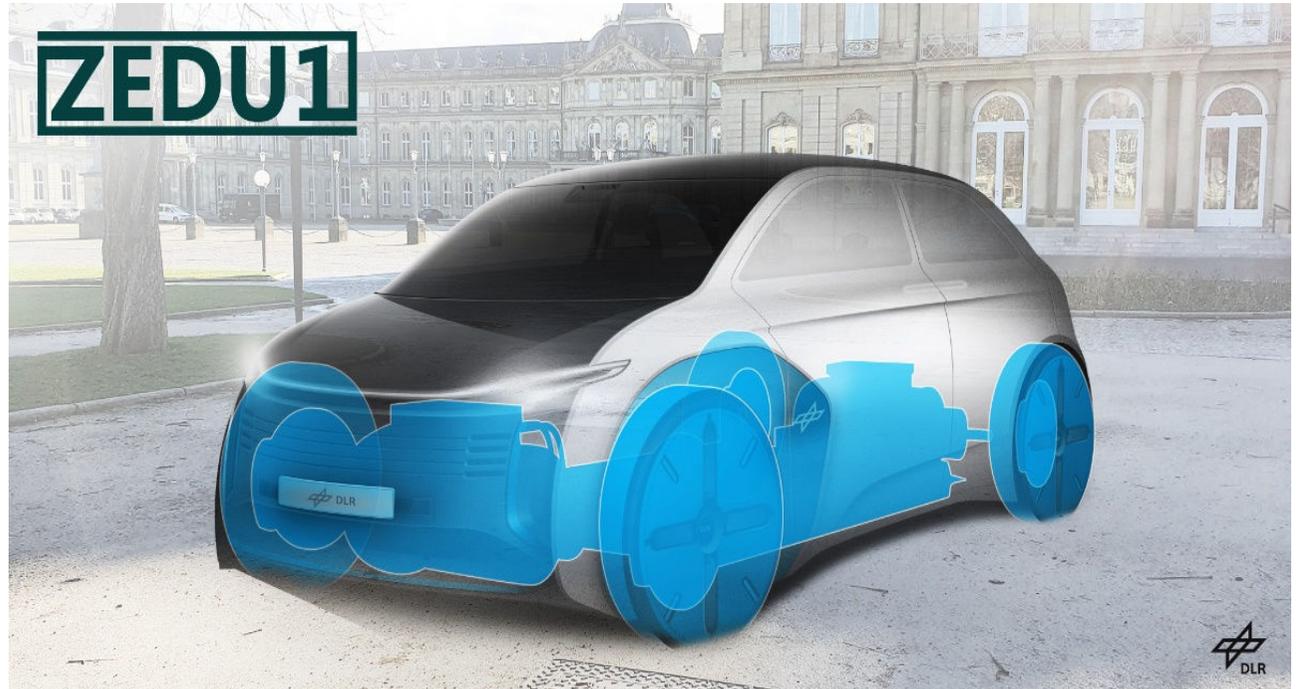
## Referenzmessung

Messkonzept  
Erste Ergebnisse

4

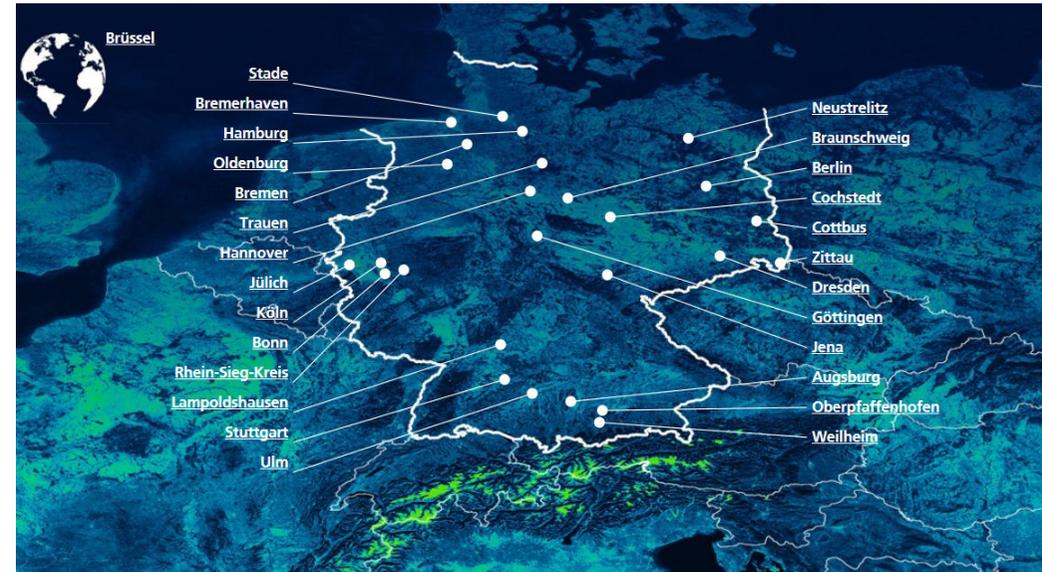
## Ausblick

Weiteres Vorgehen



# Das DLR im Überblick

Das DLR ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Ca. 10.000 Mitarbeiter arbeiten in Forschungsinstituten und Einrichtungen an 30 Standorten (D).



<https://www.dlr.de/DE/organisation-dlr/medien-und-dokumente/fakten/zahlen-und-fakten.html>



- Luftfahrt und Raumfahrt
- **Energie und Verkehr**
- Digitalisierung und Sicherheit
- Planung und Umsetzung der deutsche Raumfahrtaktivitäten
- Projektträger zur Forschungsförderung



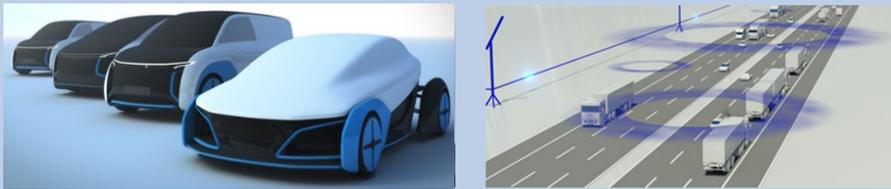
# DLR – Übergeordnete Ziele und Strategien: Verkehr

## DLR Verkehr

PROTECTING CLIMATE | ENSURING MOBILITY | MANAGING TRANSFORMATION

### Straßenverkehr

Fahrzeuge, Verkehrsmanagement, Infrastruktur



### Schienenverkehr

Fahrzeuge, Verkehrsmanagement, Infrastruktur



### Verkehrssystem

Verkehrsentwicklung und -wirkungen  
Urbane Mobilität und Stadtentwicklung  
Intermodale Verkehrsknoten



Technologietrends:

Digitalisierung, Automation, Künstliche Intelligenz, Smart Data, Sektorenkopplung Energie & Verkehr





Institut für Fahrzeugkonzepte

Mobilität für morgen



# Institut für Fahrzeugkonzepte



**...im STEP  
Engineering Park...**



**...in Berlin...**



**...in der  
ARENA2036...**



**...und Weil im  
Schönbuch.**

## Standort Stuttgart



Folgen Sie uns auf...



DLR\_Verkehr



DLR Stuttgart



YouTube DLR Verkehr

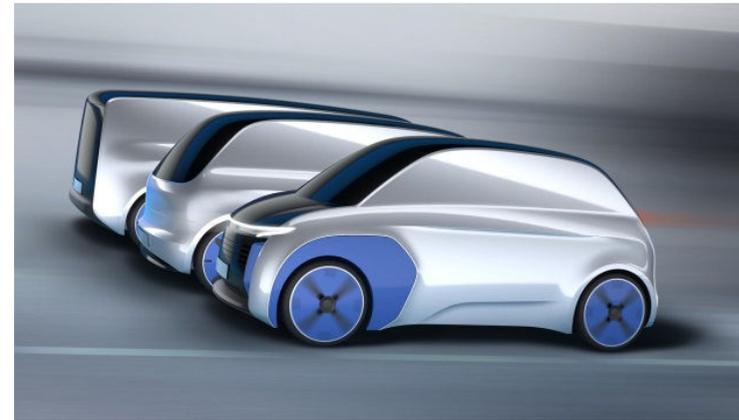


# Institut für Fahrzeugkonzepte –

## Autos, Züge, LKWs für morgen:

Nachhaltige und wirtschaftliche, nutzerorientierte, sichere und vernetzte Mobilität

- Werkstoffe
- Bauweise
- Antrieb
- Energiekonzepte
- Technologiebewertung
- Umweltfreundlichkeit
- Multidisziplinäre und internationale Ausrichtung



Next Generation Car  
Familie  
Urban Module Vehicle  
(UMV)

- Basic
- Peplemover
- Cargomover



Next Generation Train  
CARGO



# Problemstellung/Herausforderung

Adressierte Themen mobilitätsbedingter Umweltbelastung:

- Klimaerwärmung (CO<sub>2</sub>, ...)
- Gesundheit (NO<sub>x</sub>, Feinstaub, Mikroplastik,...)

Emissionsquellen:

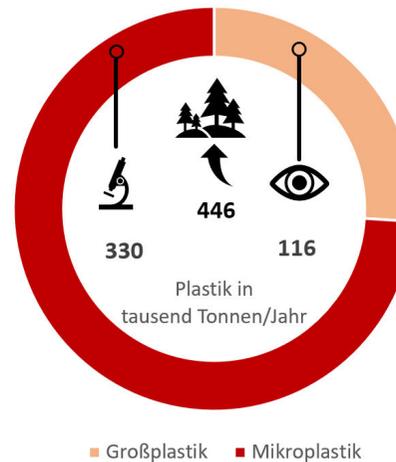
- Verbrennung (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ...)
- Abriebe (Feinstaub, Mikroplastik)

WHO: Luftverschmutzung größte Bedrohung für die menschliche Gesundheit († 7Mil. Menschen/a)  
 - 75% alle EU-Bewohner in Großstädten resp.  
 90% der Weltbevölkerung zur hoher Feinstaubbelastung ausgesetzt.

UBA: - Mikroplastik: 26% aus Reifenabriebe (110 t/a; 1,23 kg/a\*Kopf)  
 - Feinstaub: 32% aus Bremsabriebe, 90 % davon Ultrafeinstaub (5.500-8.000 t/a)

Euro7: - Legislativvorschlag 2022, Einführung 2025 (Plan)

Plastikfreisetzung in Deutschland



Erstellt aus Daten: Fraunhofer 2018

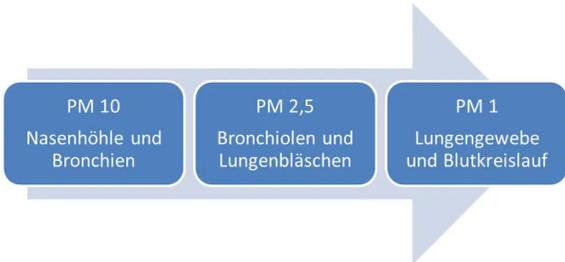
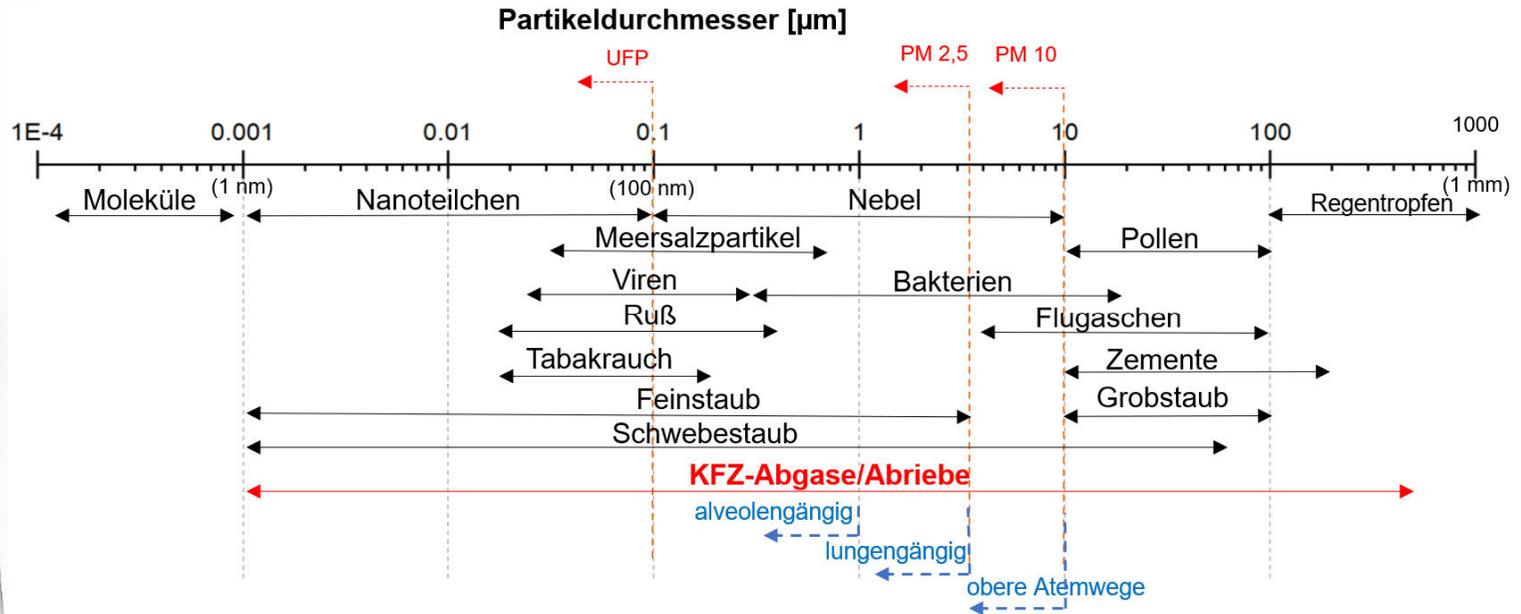
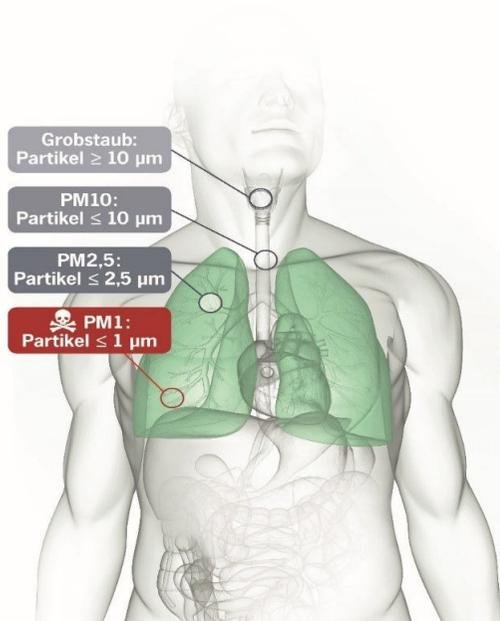
Die größten Mikroplastikquellen in Deutschland



	WHO 2005	WHO 2021	EU	Euro7
NO <sub>2</sub>	40 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>	40 mg/m <sup>3</sup>	10-30 mg/m <sup>3</sup>
Pm <sub>2,5</sub>	10 mg/m <sup>3</sup>	5 mg/m <sup>3</sup>	25 mg/m <sup>3</sup>	Σ PN:10 <sup>11</sup> /km
Pm <sub>10</sub>	20 mg/m <sup>3</sup>	15 mg/m <sup>3</sup>	40 mg/m <sup>3</sup>	



# Feinstaub und ultrafeine Partikel (UFP)

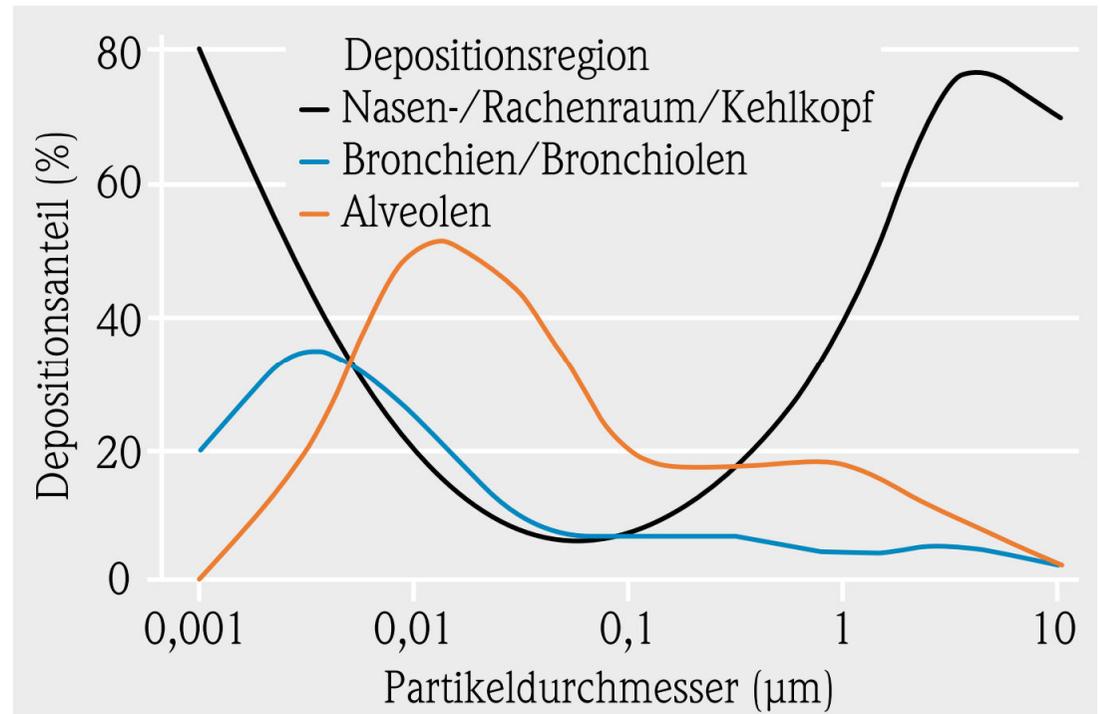
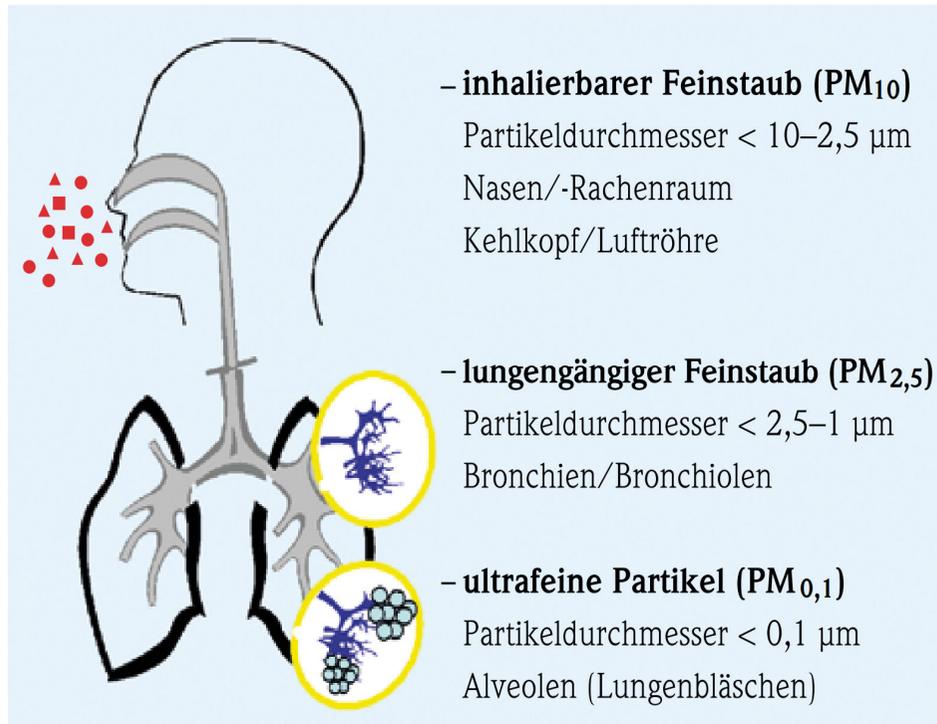


**Ultra- / Feinstaubpartikel**

- dringen tief in die Lunge ein bis in die Alveolen, Lungengewebe und Blutkreislauf
- haben eine große (aktive) Oberfläche
- bleiben lange in der Luft (Aerosole)



# Partikeldeposition als Funktion des Partikeldurchmessers

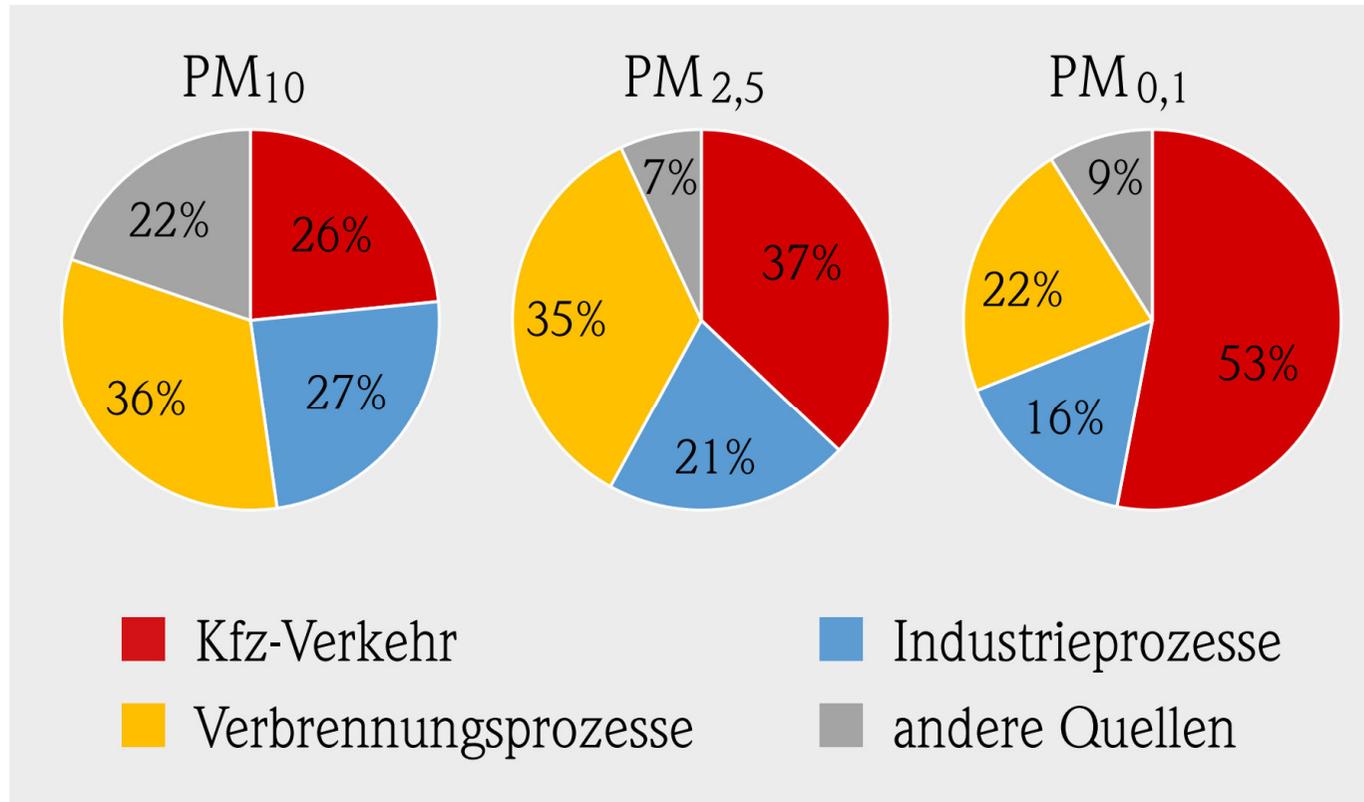


Partikeldepositionsregion des Atemtrakts als Funktion des Partikeldurchmessers bei Nasenatmung des Menschen (Oberdörster 2005)

Wirksamkeit: abhängig von der Größe (Depositionsregion), Konzentration, Masse, Oberfläche, Struktur, physikalischen und chemischen Eigenschaft sowie der gesundheitlichen Konstitution des Betroffenen



## Aufschlüsselung der Quellenanteile



Aufschlüsselung der Quellenanteile an den Gesamtemissionen von PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>0,1</sub> in Großbritannien (nach AQEG 2005)



# Motivation

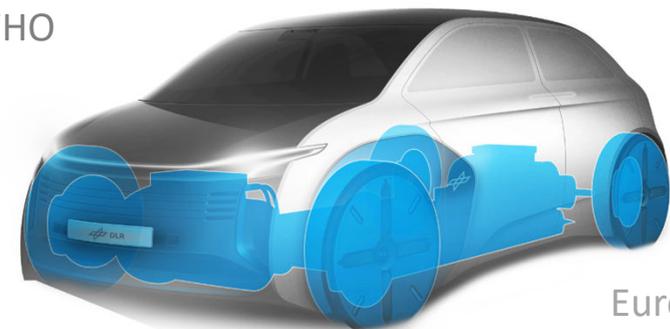
## Vision: Emissionsfreie Mobilität

- Verbesserung der Luftqualität
- Reduktion der Belastungen durch den Fahrzeugverkehr

**ZEDU1**

Neckartor

WHO



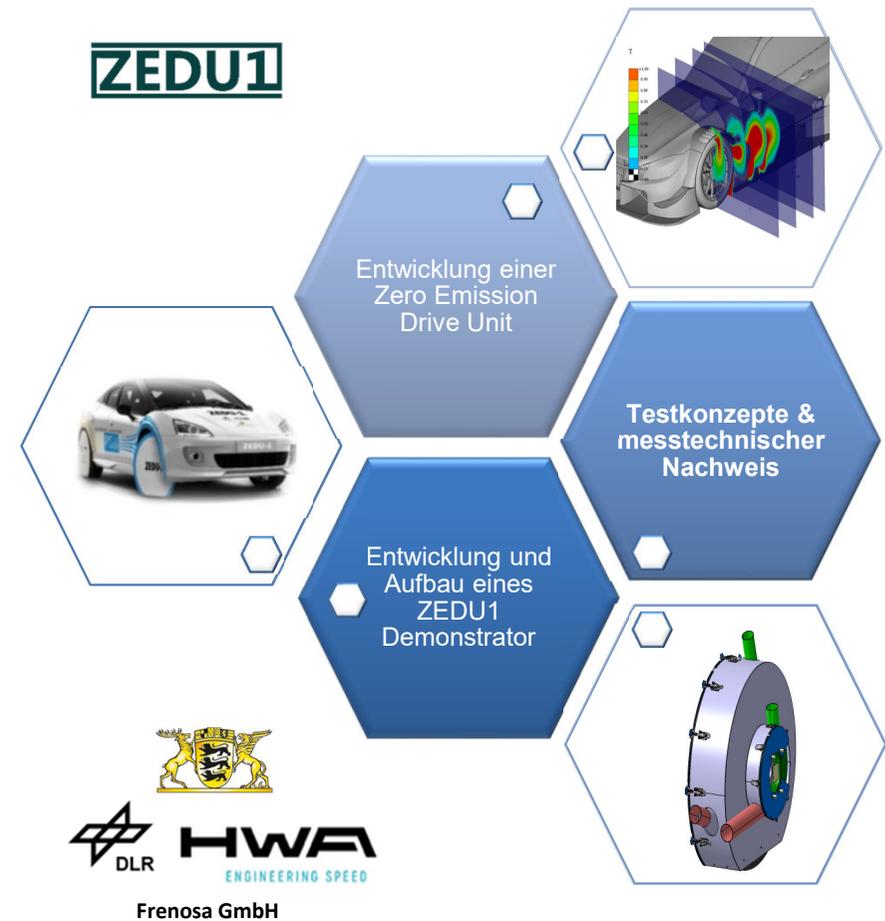
Euro 7

Mikroplastik



# Ansatz

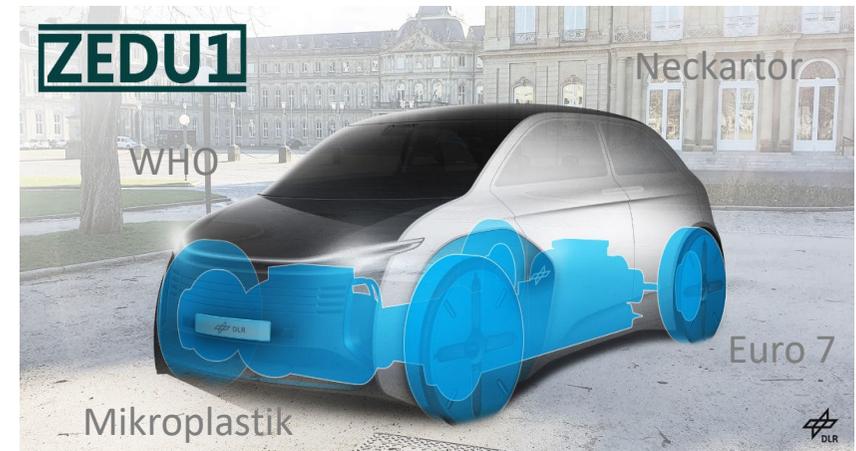
- Entwicklung einer Zero Emission Drive Unit (ZEDU-1)
  - Keine Emissionen aus Verbrennungsprozessen
  - Keine (nahezu) Feinstaubbelastungen im Fahrzeugverkehr durch Abriebe (Bremse, Reifen)
- Demonstration im Erprobungsträger
- Messtechnischer Nachweis der Emissionsfreiheit im realen Einsatz



# ZEDU-1

## Projekt Zero Emission Drive Unit Phase 1

<b>Umfang:</b>	6 Mio €
<b>Gefördert durch:</b>	WM-BW
<b>Partner:</b>	DLR-FK & DLR-VT
<b>Partner in UA:</b>	HWA, Frenosa GmbH
<b>Assoziierte / Partner of Interest:</b>	M+H, Continental, ZF



# Ziele

## Emissionsfreiheit

- Keine Emissionen aus motorischen Prozessen
  - Elektromobilität (Batterie, Wasserstoff, ..)
- Feinstaubfreiheit
  - Keine Feinstaubbelastungen durch Bremsabriebe
  - Nahezu keine Feinstaubbelastungen durch Reifenabrieb

## Messtechnischer Nachweis

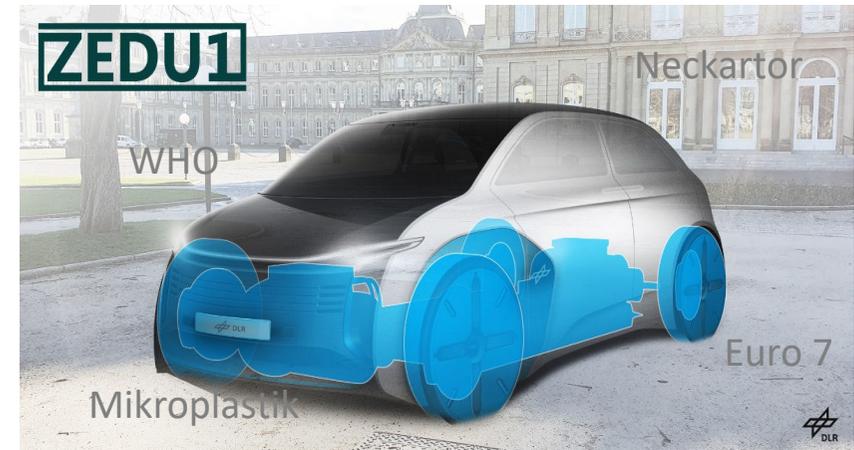
- Feinstaubmessungen bis in den Ultrafeinpartikelbereich
- Messnachweis am Prüfstand als auch auf der Straße (mobil)
- Messzyklen u.a. normkonform (WLTP, ..) und real drive Nutzerprofil
- Abgleich mit Konventionellem Fahrzeug (Bremsen/Reifen)

## Energetisch effizient

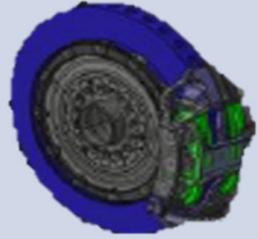
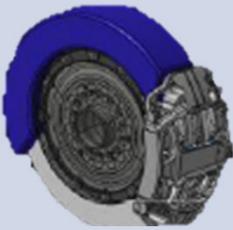
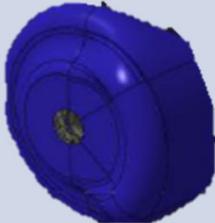
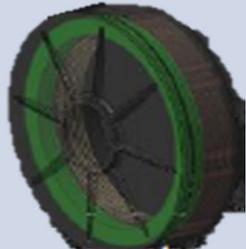
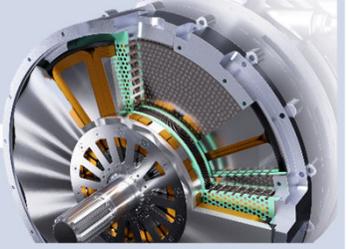
- Inkl. Steuerung, Leistungselektronik, Energie- und Thermomanagement
- Rekuperation der Bremsenergie nahezu vollständig

## Alltagstauglich

- Volle Bremsperformance
- Kostengünstig
- Skalierbar: Skalierung Serie / Übertragung NFZ, Schiene, .....

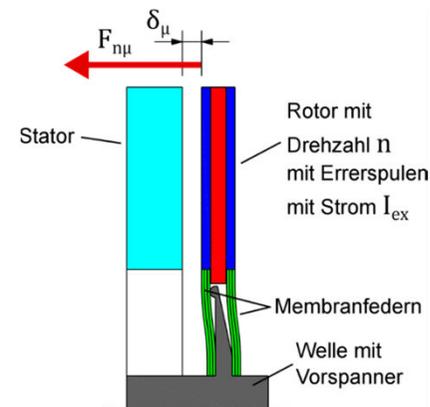
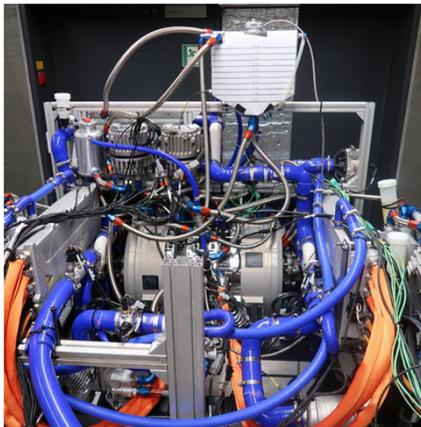
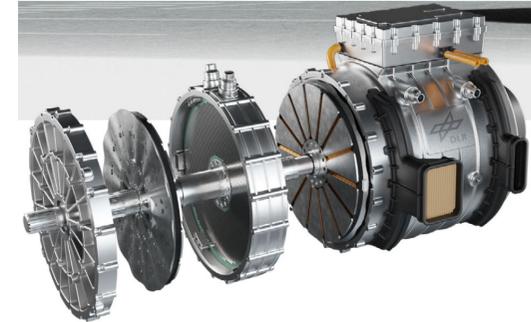
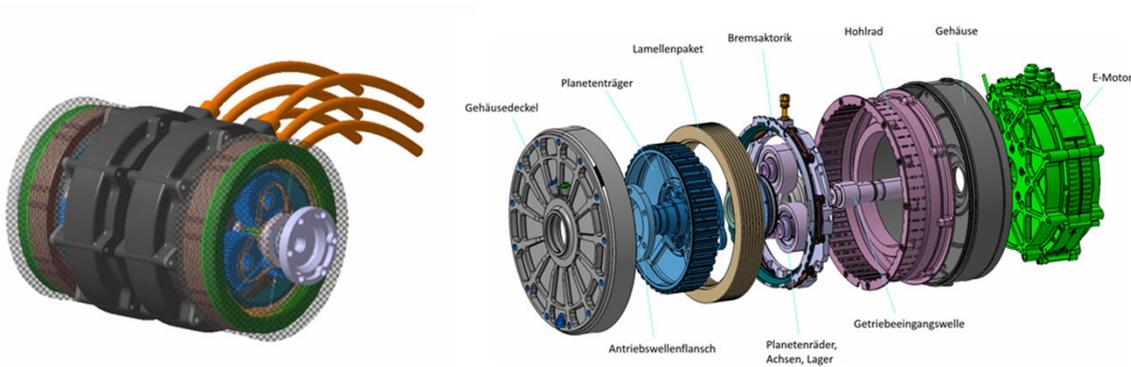


# Konzepte Bremse

Kriterium	Konzept1	Konzept2	Konzept3	Konzept4	Konzept5
Darstellung					
Beschreibung	Beschichtung	Filter zusätzlich	gekapselt	Lamellenbremse	Induktionsbremse
Grad der Emissionsvermeidung	teilweise ---	teilweise ---	vollständig +++	vollständig +++	vollständig ++
Entwicklungsaufwand	++	+	-	+	---
Entwicklungsrisiko	+	0	-	+	--
Gewicht	+++	+	-	0	-
Kosten	++	+	-	+	-
Bewertung	+	--	0	+++	++
	ARS/Frenosa			HWA	DLR



# Entwicklung Bremse

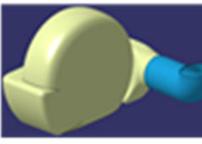


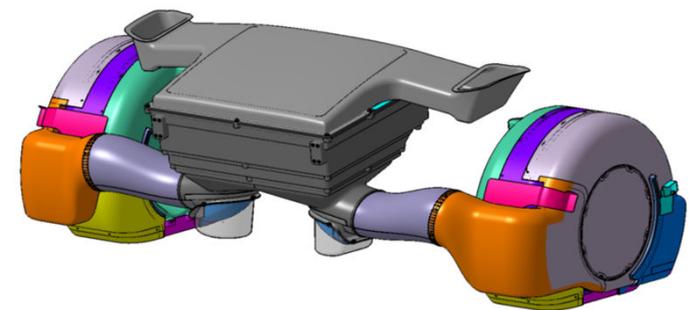
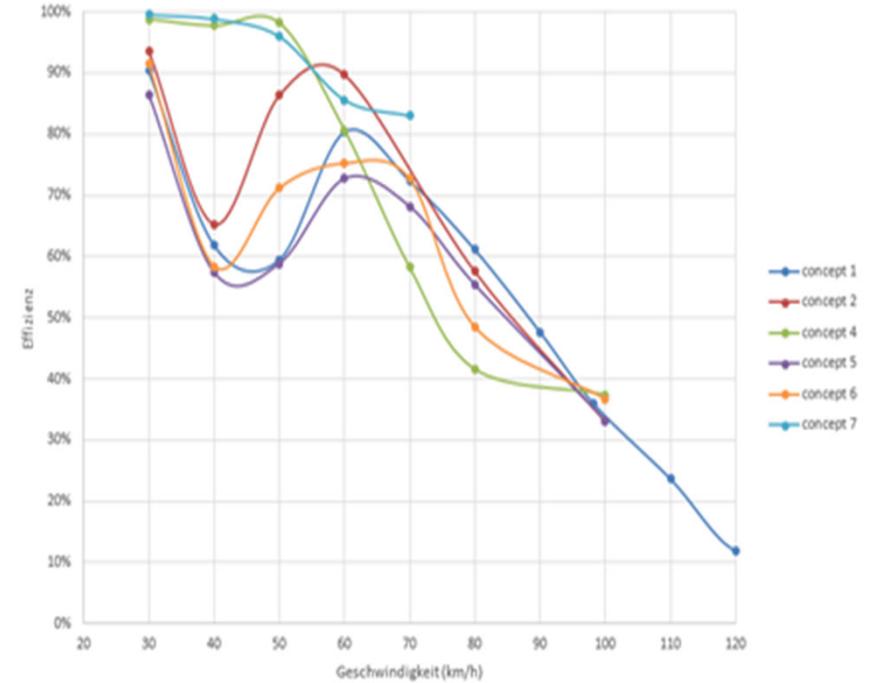
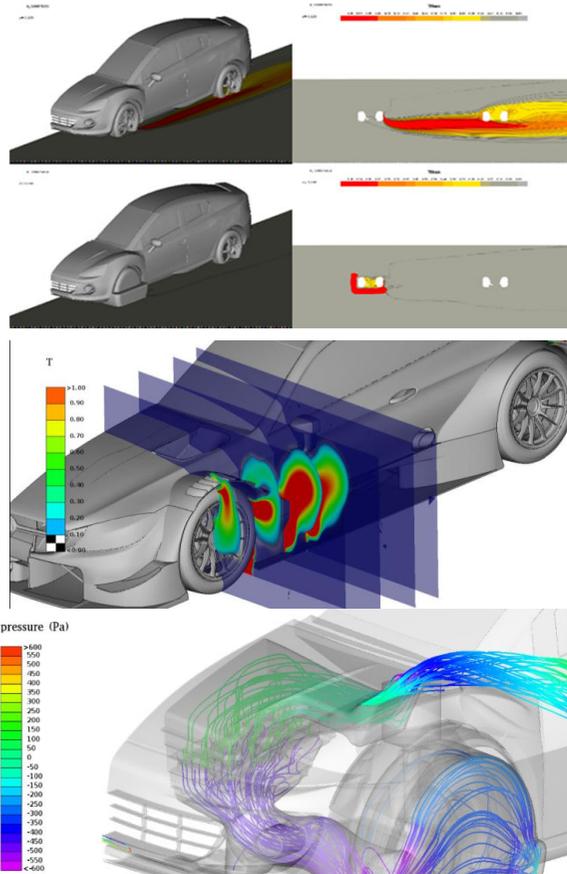
Lamellenbremse: Packaging, Explosionszeichnung und Prüfstands Aufbau

Induktionshybridbremse: Explosionszeichnung, Funktion und Prüfstands Aufbau



# Konzepte Reifenemissionen

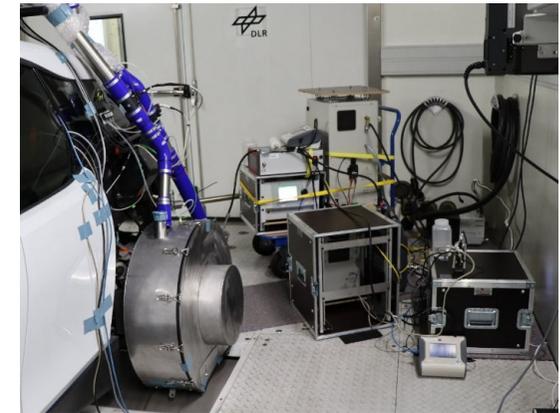
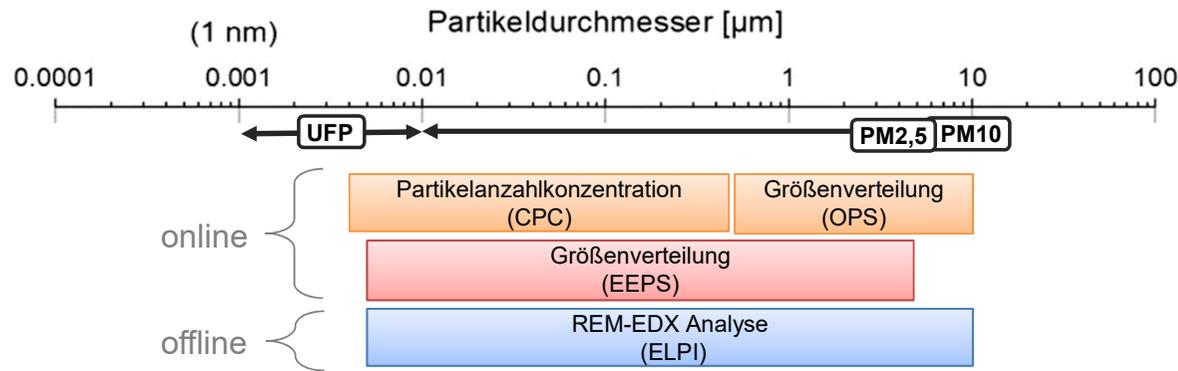
Bild	Gesamt
	+
	0
	0
	+
	+++



Reifenabriebsabsorptionskonzepte: Strömungsverteilung, Absorptionseffizienz (v) und Konstruktion



# Partikelmesstechnik



## Optische Messung



CPC

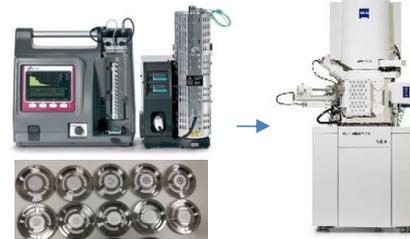
OPS

## Elektromobilität



EEPS

## Impaktor & Mikroskopie



ELPI

REM-EDX

## Charakterisierung der Emissionen:

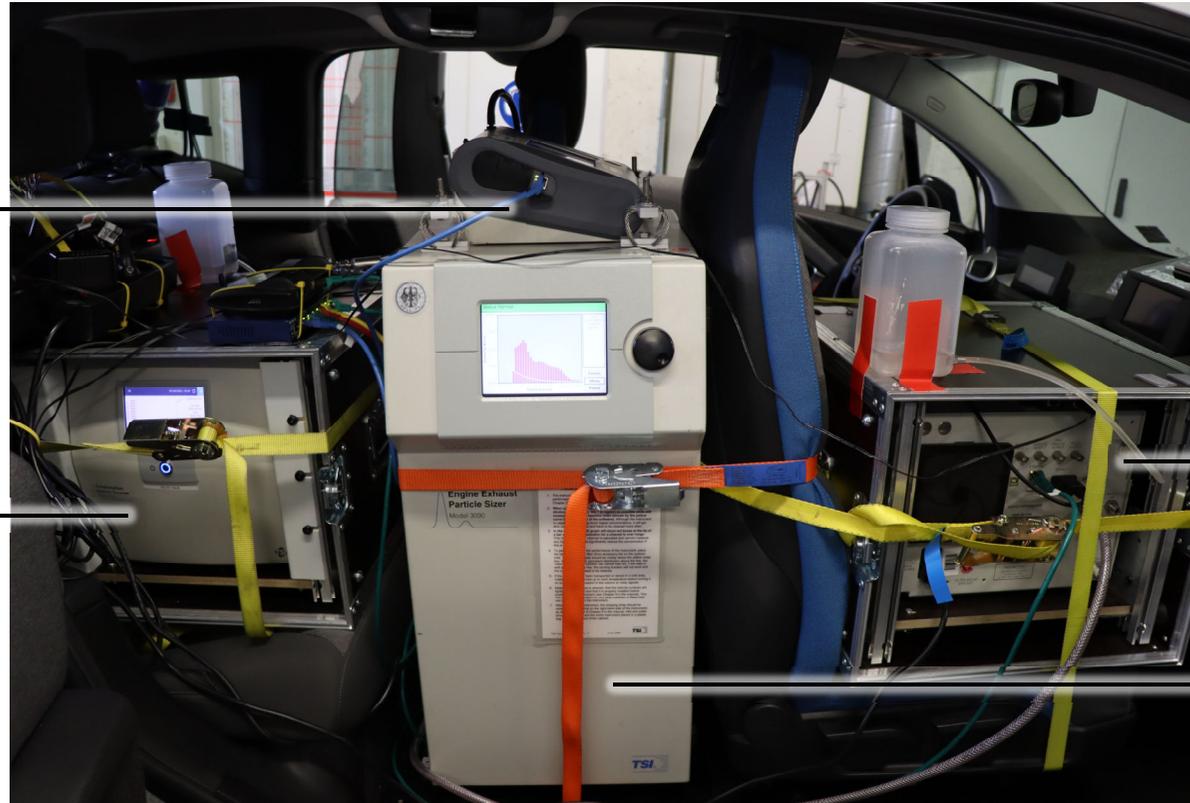
- Partikelanzahlkonzentration
- Größenverteilung
- Morphologie
- Elementare Zusammensetzung



# Messtechnik – Partikelemissionen – Referenzfahrzeug

OPS (0.3 – 10  $\mu\text{m}$ )

CPC #2 (2.5 nm - 3  $\mu\text{m}$ )



CPC #1 (2.5 nm - 3  $\mu\text{m}$ )

EEPS (5.6 - 560 nm)



# Mess-Szenarien

**Komponenten-  
prüfstand**



**Rollenprüfstand**



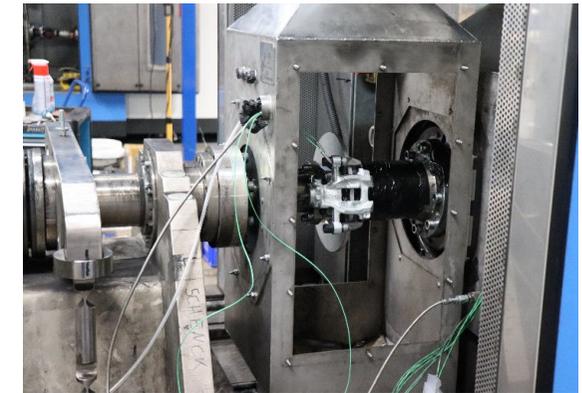
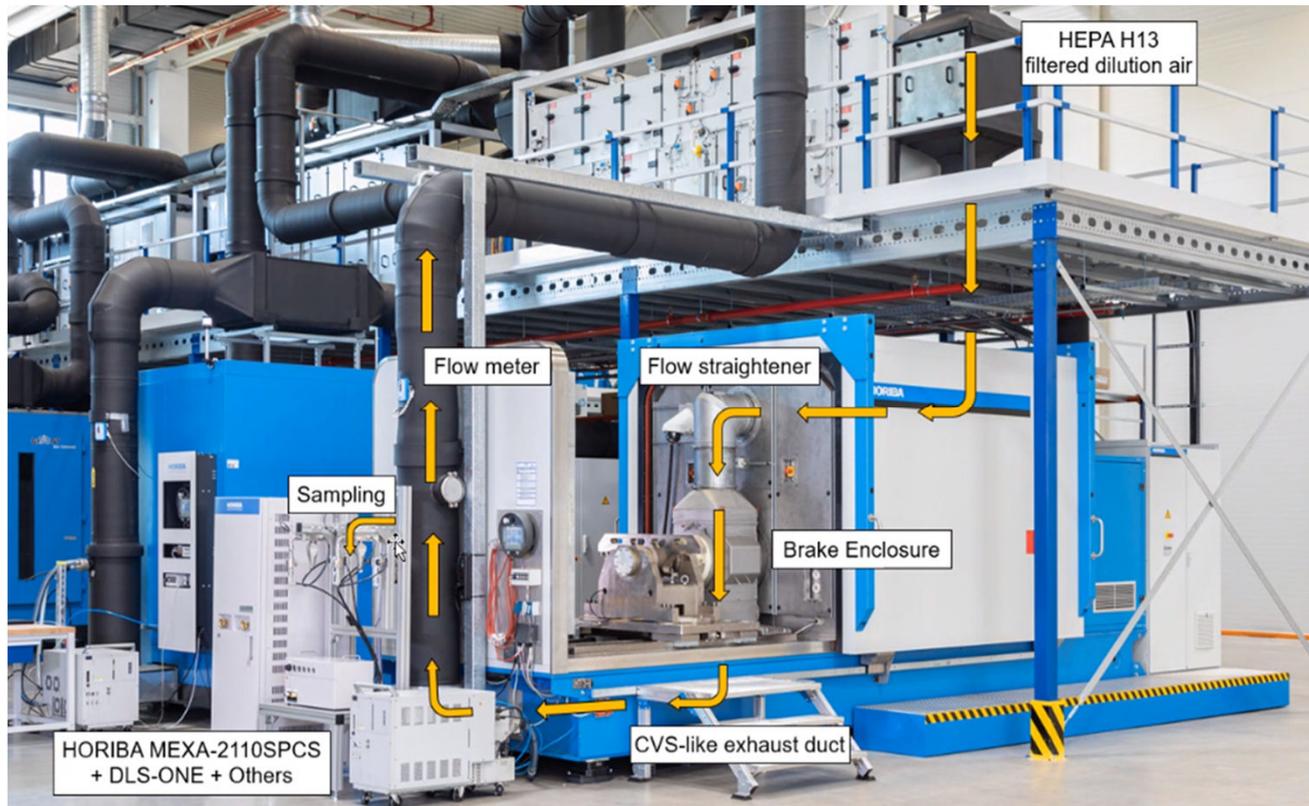
**Testgelände**



**Realfahrt**



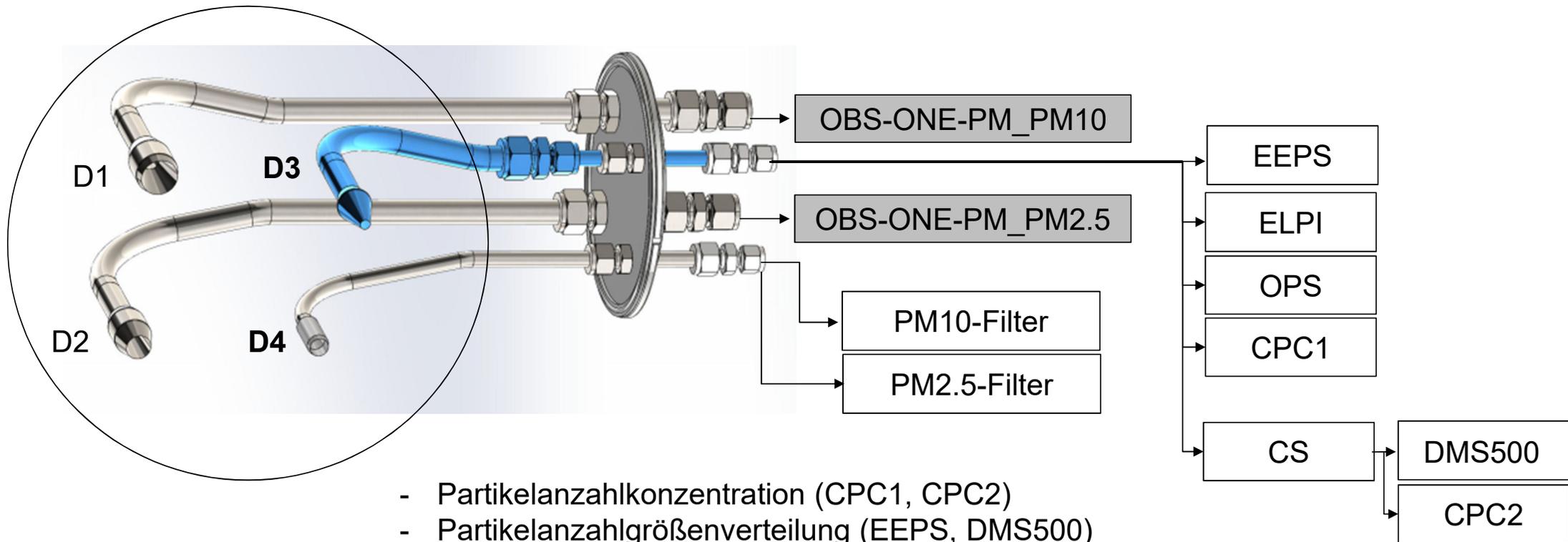
# Testaufbau – Komponentenprüfstand



Quelle: Horiba



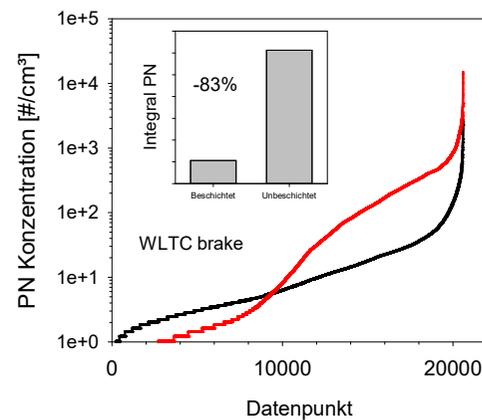
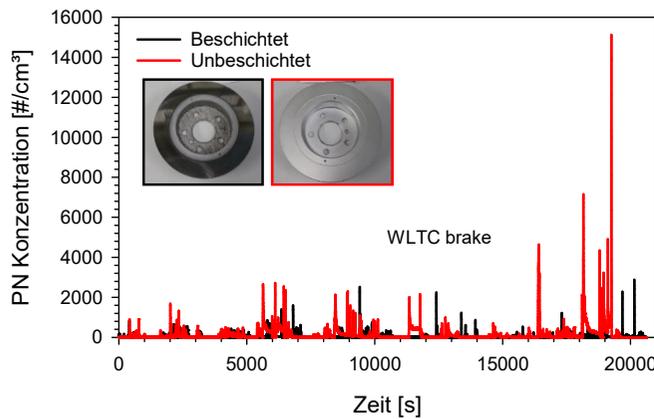
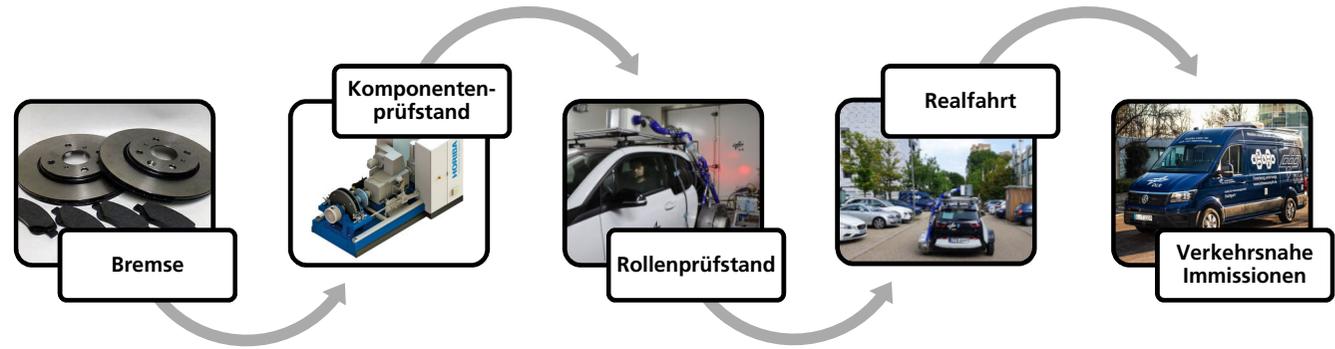
# Messtechnik – Partikelemissionen – Komponentenprüfstand



- Partikelanzahlkonzentration (CPC1, CPC2)
- Partikelanzahlgrößenverteilung (EEPS, DMS500)
- Vergleich volatile und nicht-volatile Partikel
- Partikelsammlung für Offline-Analyse (ELPI, PM10, PM2.5)
- Gravimetrische Messung durch HORIBA



# Bremsemissionen am Komponentenprüfstand: Einfluss der Beschichtung



- Untersuchung der Emissionen vom reproduzierbaren Komponentenprüfstand bis zur komplexen Realfahrt
- Beschichtung sorgt für deutliche Reduktion der Partikelemissionen (83% WLTC brake)



# Massenverlust – Standardbremse vs. Beschichtete Bremse (diverse Profile)

- Abgeriebene Masse pro 100 km:

- Standardbremse: 0,77 g Anteil Scheibe: 63 %
- Beschichtete Bremse: 0,20 g Anteil Scheibe: 58 %

- 74 %



## Versuchsfahrzeuge

**Referenzfahrzeug** zur Bestimmung der Partikelemissionen derzeitiger Elektrofahrzeuge



**BMW i3**

- Aufbau des Versuchsfahrzeuges 2021
- Entwicklung von Messverfahren
- Separate Vermessung von Bremsen und Reifenabrieben in unterschiedlichen Szenarien

**Demonstrator-Fahrzeug** für die Demonstration von Technologien nahezu feinstaubfreien Fahrens



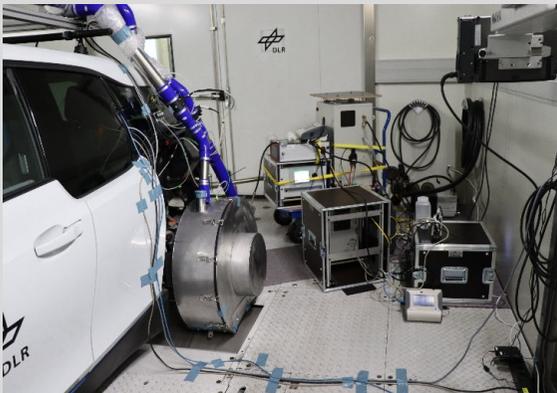
**ZEDU1 – Demonstrator**

- Fertigstellung Mitte 2022
- Vermessung der Emissionen zur Bestimmung der Feinstaub-Einsparung



# Messzenarien Referenzfahrzeug

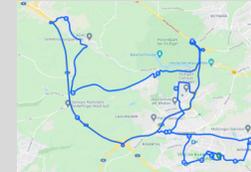
## Rollenprüfstand



## Testgelände



## Realfahrten (RDE, Straße)



Total	46.2 km
Urban	22.5 km
Rural	14.5 km
Motorway	9.2 km



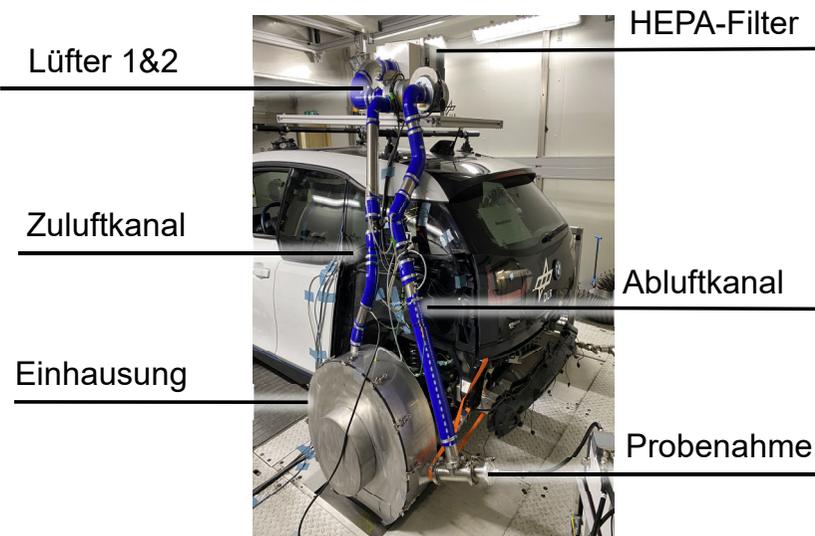
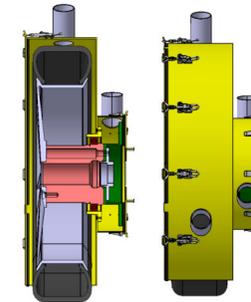
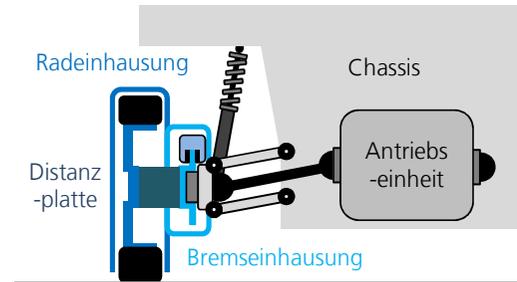
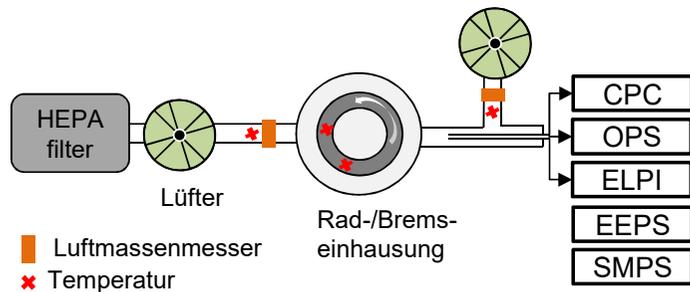
# Messkonzept Referenzfahrzeug

## Versuchsaufbau:

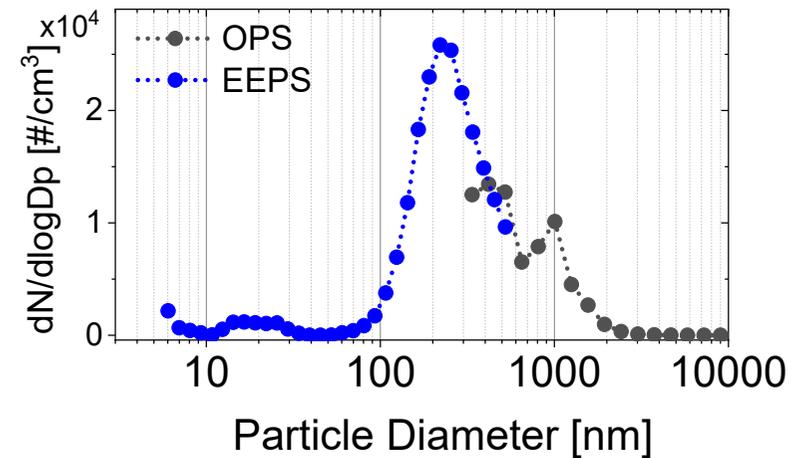
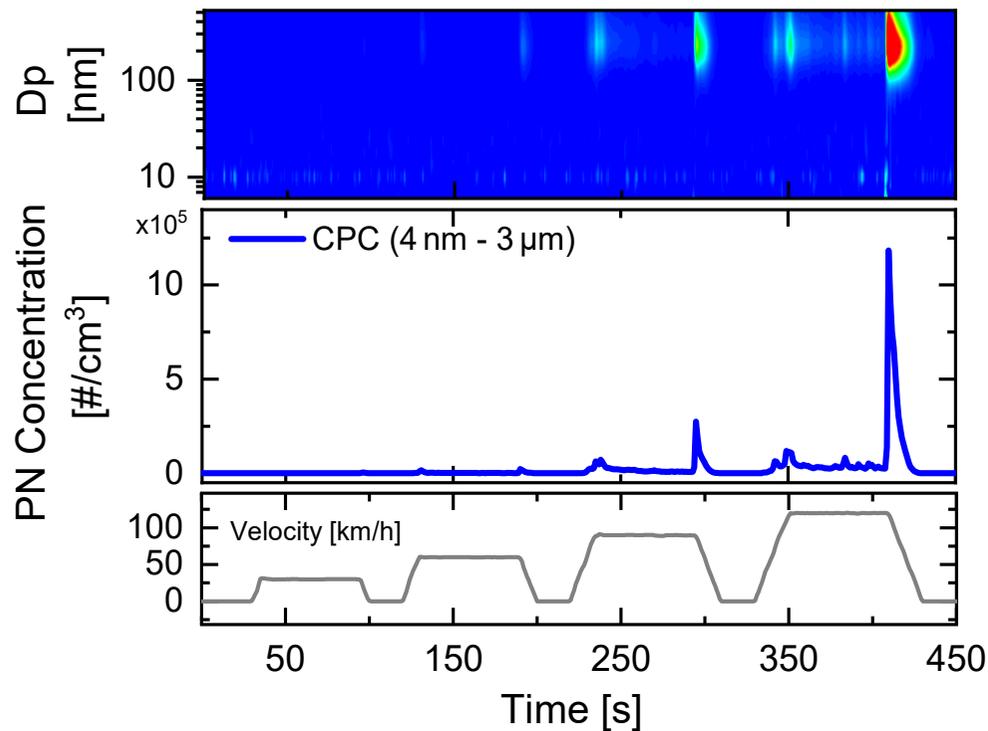
- Separate Einhausung von **Bremse & Rad**
- Durchströmen der Einhausungen mit definierter & gefilterter Luft (HEPA-Filter)
- Messung der Partikelkonzentration in der Abluft & Umgebung (Referenz)
- Temperaturmessung an Bremse/Reifen

## Testprofile:

- Rollenprüfstand, Realfahrt & Komponenten
- Testzyklen (WLTC, RDE, ..) & Einzelbremsungen
- Originalbremsscheiben & beschichtete Bremsscheiben



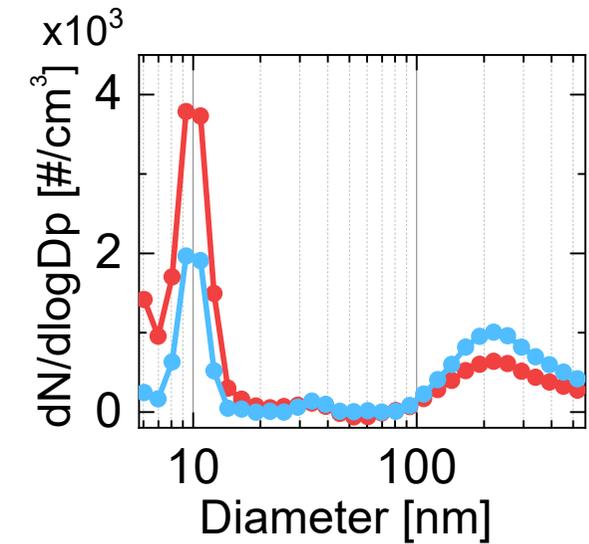
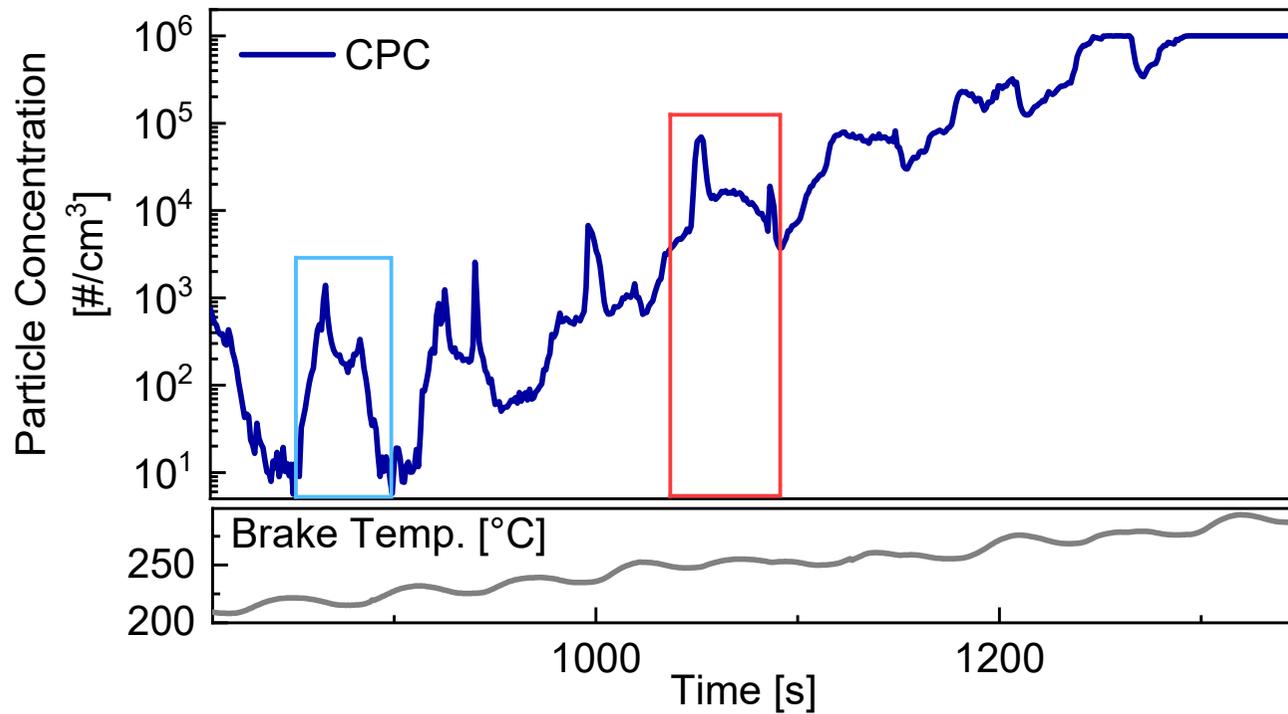
# Bremsenemissionen - Charakterisierung



- Geschwindigkeitsabhängig, Spitzenwerte beim Beschleunigen und Bremsen
- Partikeldurchmesser von etwa 220 nm, zusätzliche 10 nm-Partikel bei starkem Bremsen



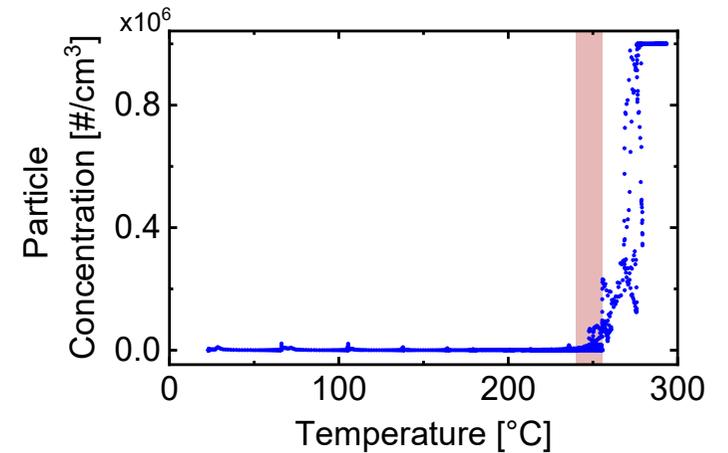
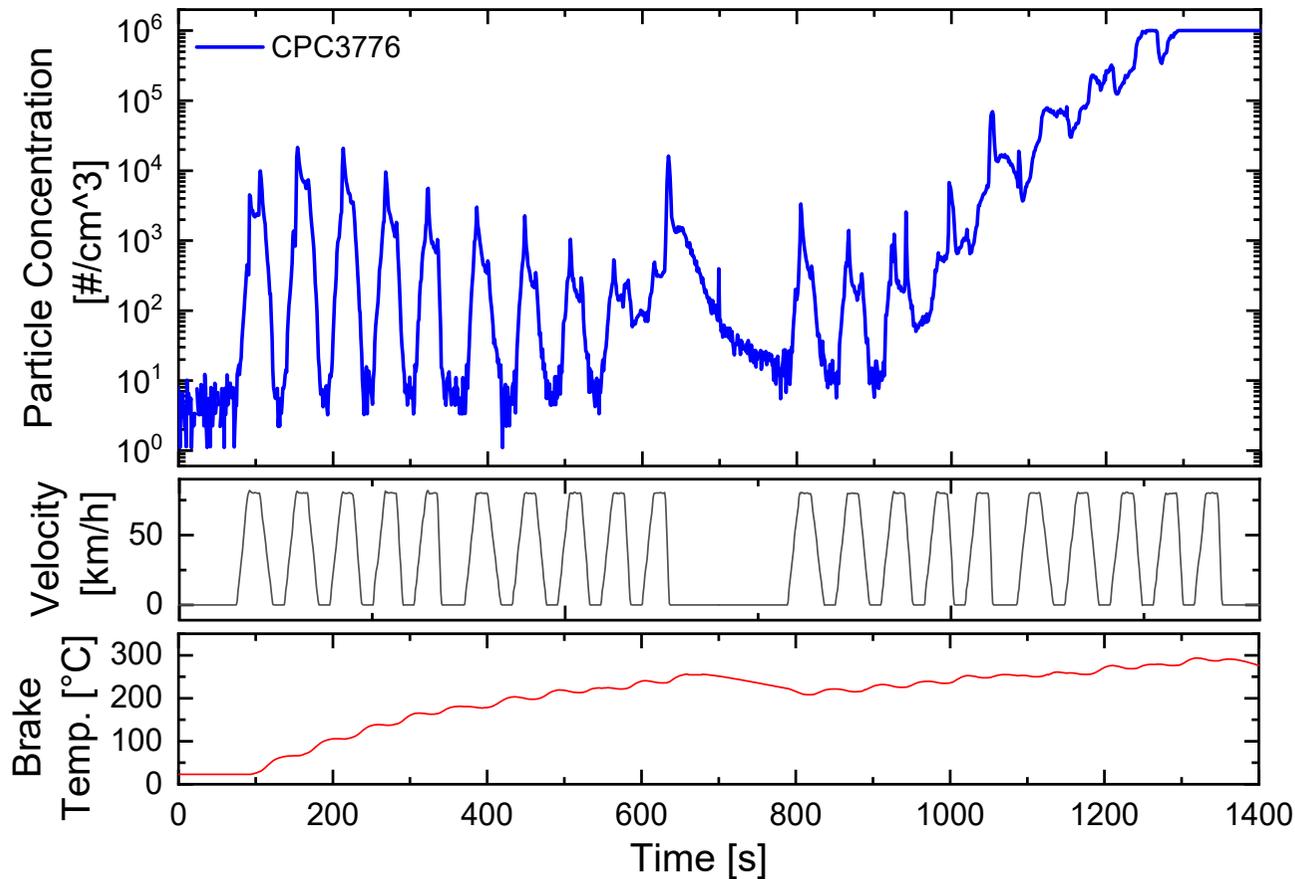
# Bremsemissionen: Temperaturabhängigkeit



- 10 nm-Partikel überwiegen bei hohen Temperaturen



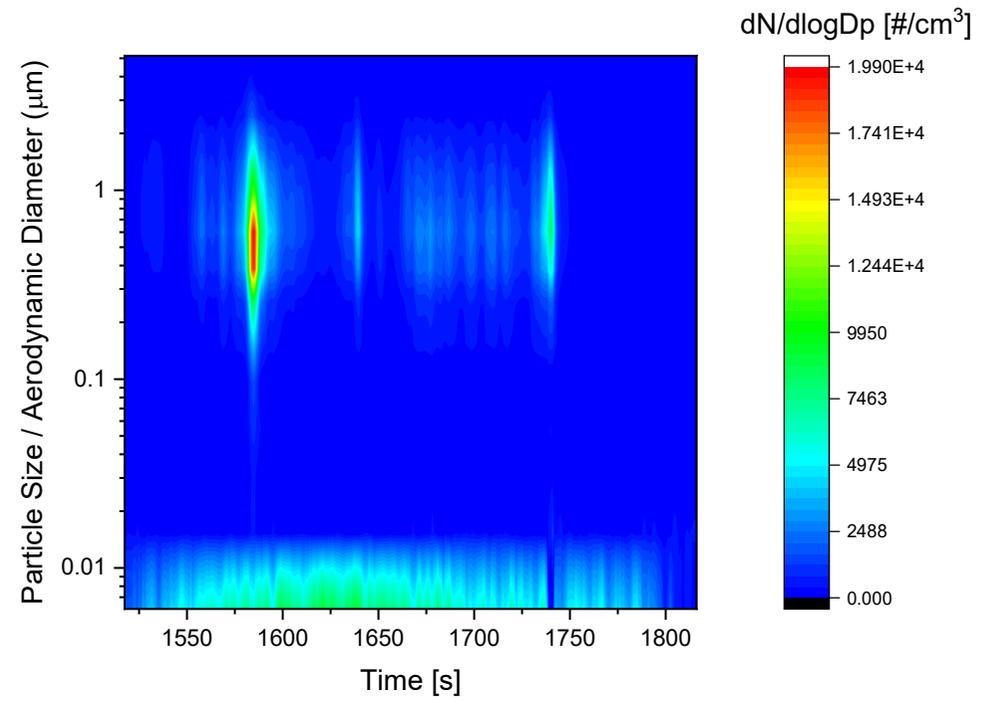
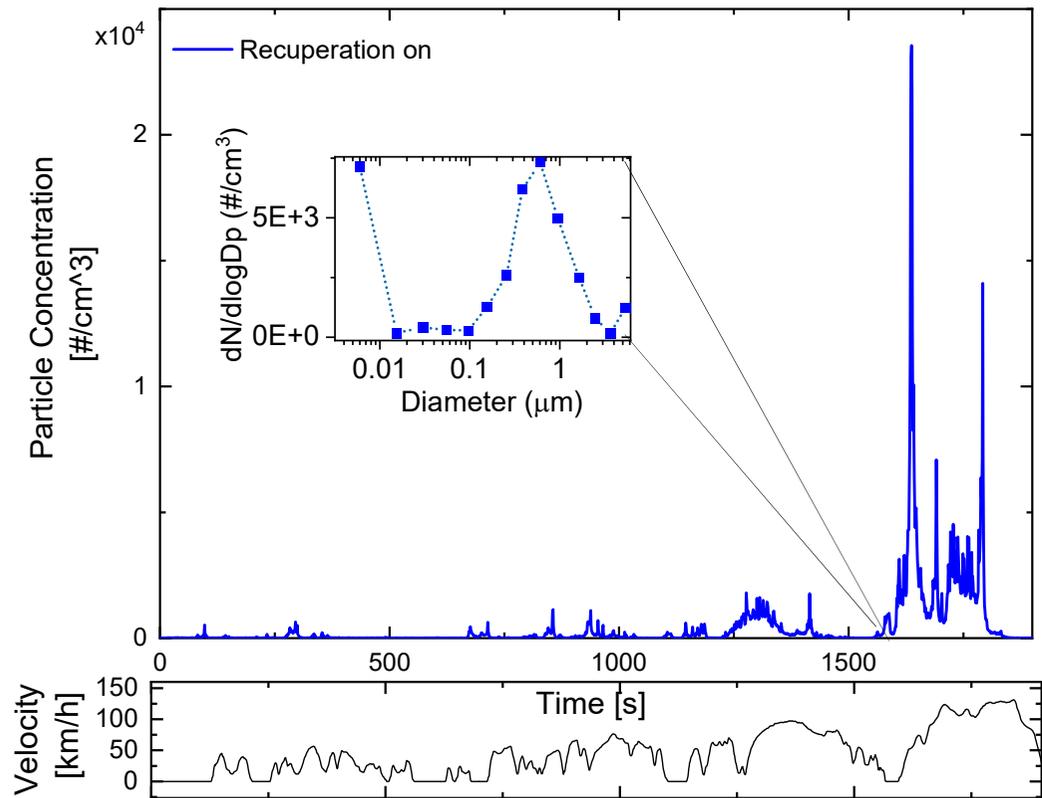
# Bremsemissionen – Bremstemperaturen



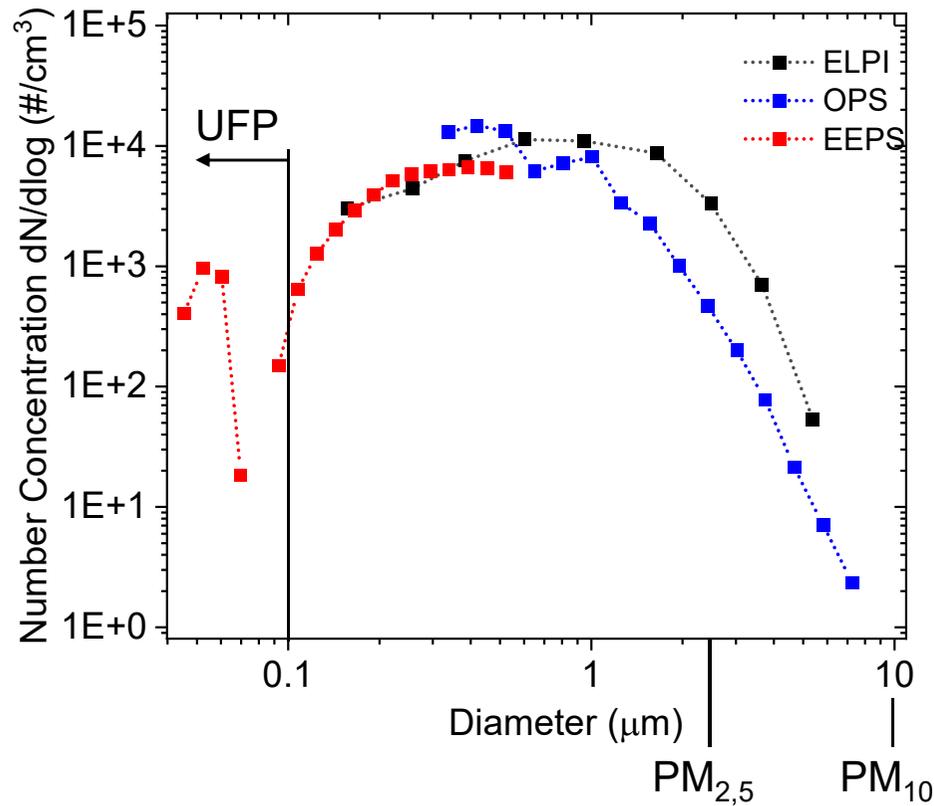
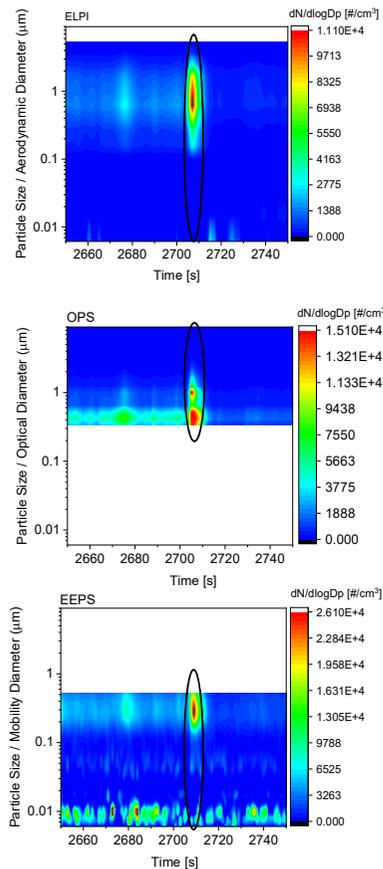
- Grenztemperatur liegt bei ca. 240°C
- Exponentieller Anstieg oberhalb der Grenztemperatur



# Bremsemissionen – WLTC – Größenverteilung der Bremspartikel



# Bremsemissionen – RDE Stuttgart - Partikelgrößenverteilung

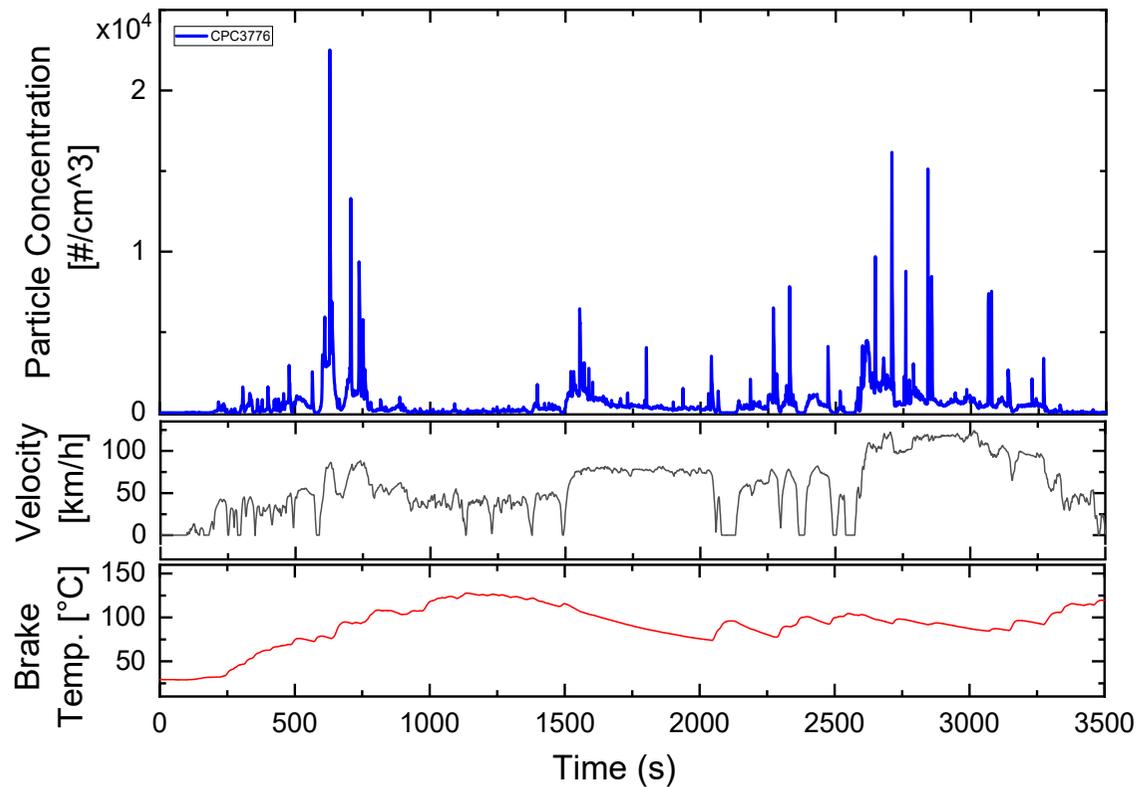


- Partikelverteilung mit Maximum zwischen 0.4 und 0.7  $\mu m$
- Ultrafeinpartikel sind vorhanden, konnten bei der Realfahrt (noch) nicht eindeutig zugeordnet werden



# Bremsemissionen – RDE Stuttgart

RDE Stuttgart - Recuperation off - Ventilation: 31 m<sup>2</sup>/h

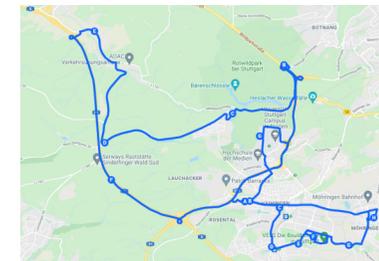
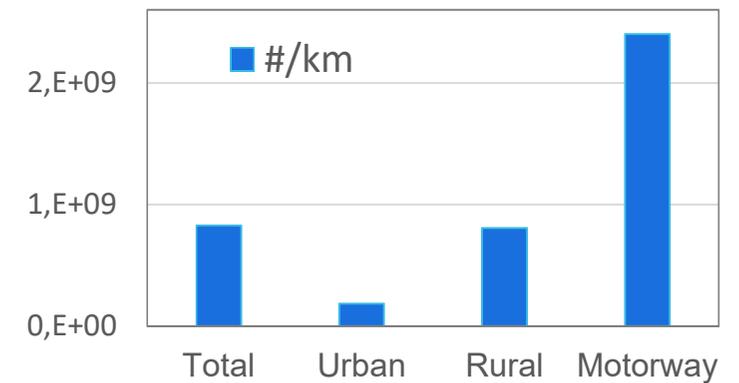
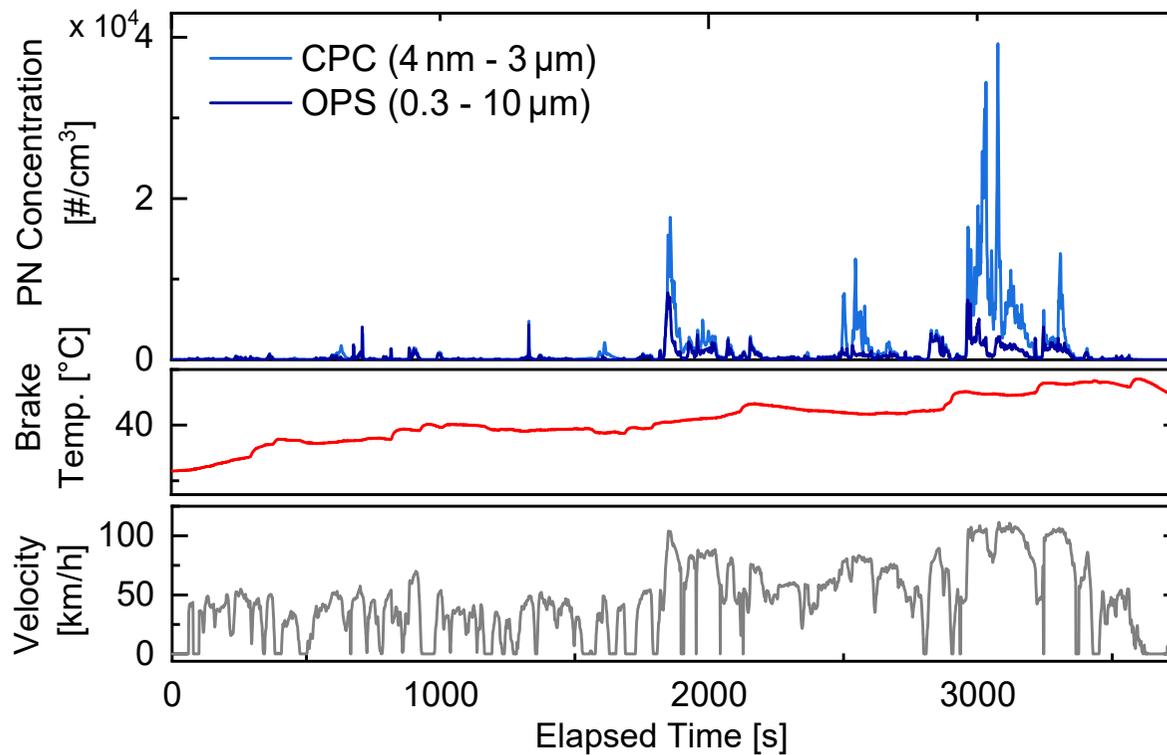


- Geringe Hintergrundkonzentration durch den HEPA-Filter
- Messbare Bremspartikelemissionen bei Realfahrt
- Eindeutige Emissionsevents
- Einfluss der Geschwindigkeit sichtbar

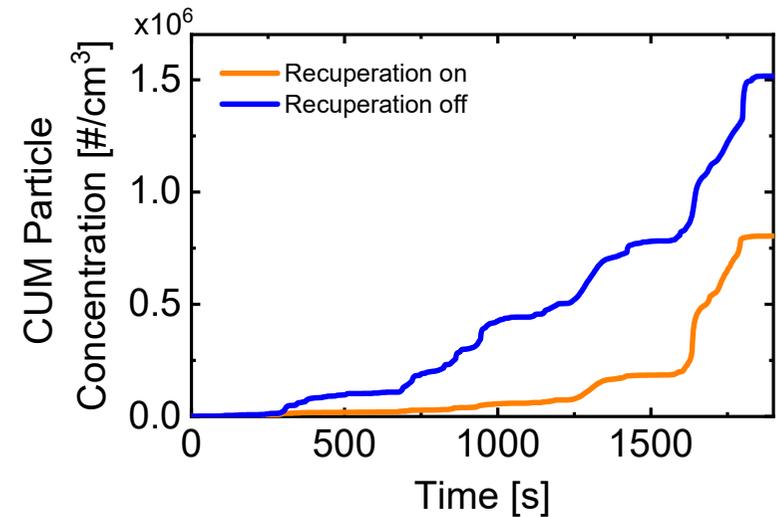
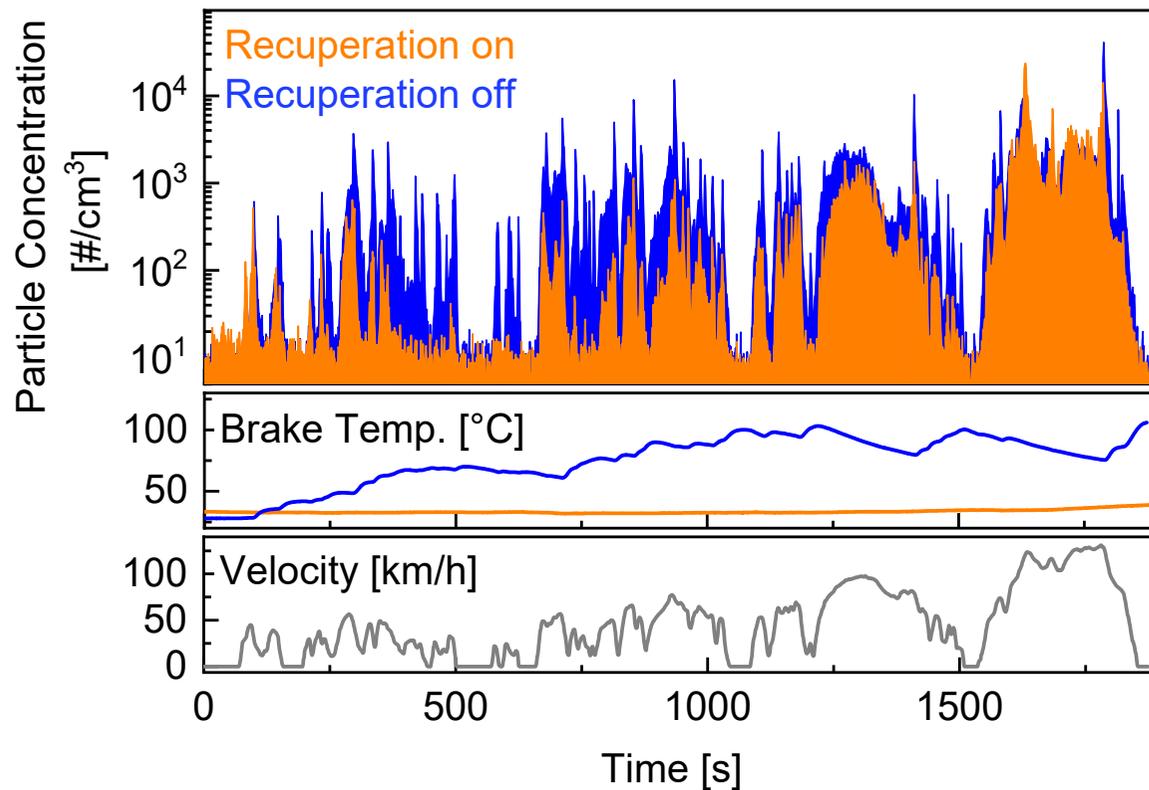


# Bremsemissionen – RDE Stuttgart

## Straßenfahrt: Wie sind die Partikelemissionen unter realistischen Bedingungen?



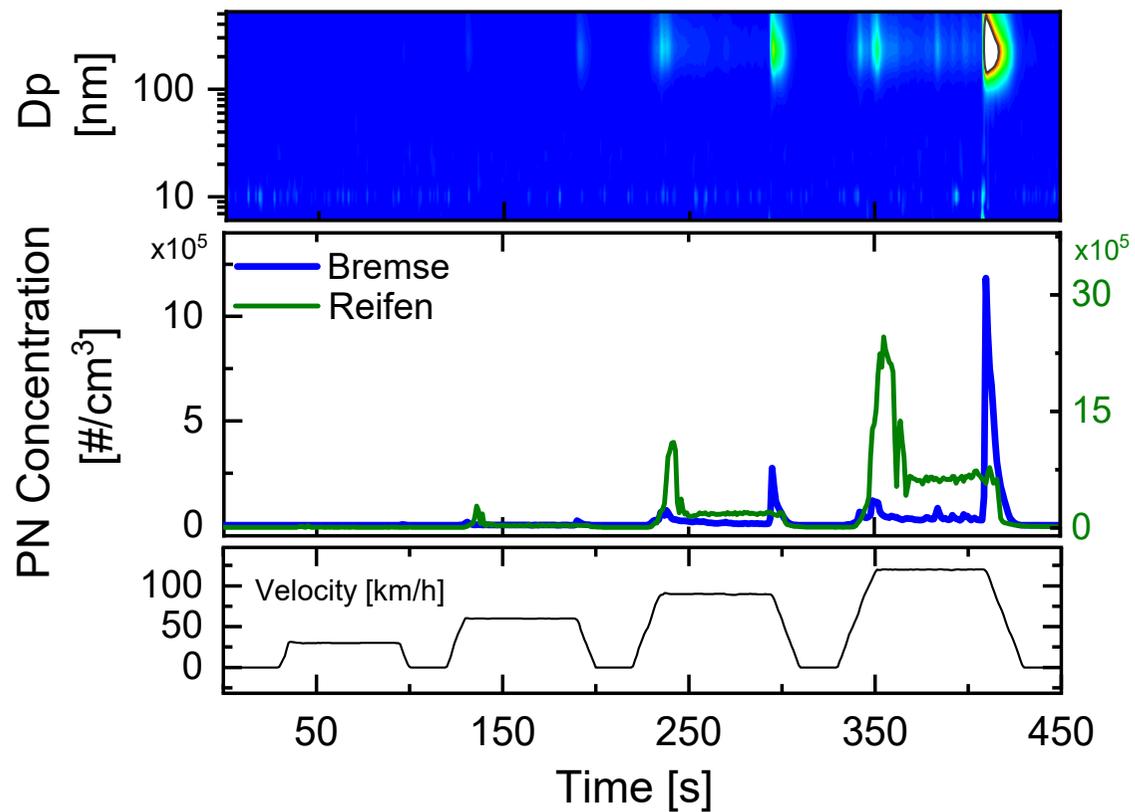
# Bremsemissionen – WLTC – Einfluss der Rekuperation



- Partikelemissionen auch ohne aktive Bremsung
- Rekuperation reduziert die Partikelanzahl um 49%



# Reifen- und Bremsemissionen: Ein Vergleich

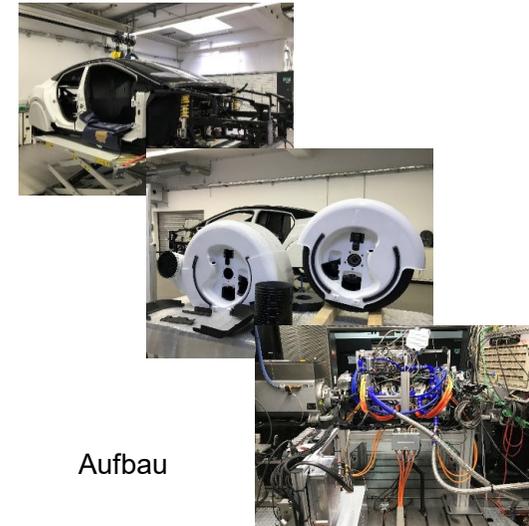


- Unterschiedlicher zeitlicher Verlauf der Konzentration bei Reifen- und Bremspartikel
- Bremsabrieb hat ein Maximum bei 200 bis 300 nm, bei starker Bremsung zusätzlich 10 nm ( $0,01\mu m$ ) -Partikel



# Ausblick

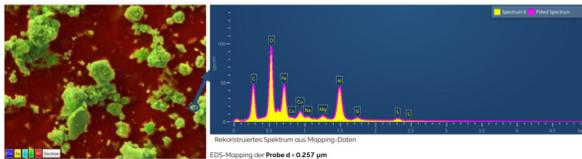
- Referenzfahrzeug:
  - Auswertung und Bewertung der Messergebnisse
  - Korrelation der Messergebnisse Rollenprüfstand, Real Drive und Komponentenprüfstand
  - Untersuchung der Morphologie und chemischen Zusammensetzung gesammelter Proben mit dem REM-EDX
- Fahrzeugdemonstrator ZEDU-1:
  - Vermessung der ZEDU-1 Einheit (Rollenprüfstand und Real Drive)
  - Vergleich Referenzfahrzeug
  - Vorstellung der Öffentlichkeit (September 2022)
- Messkonzepte für Real Drive Einsatz:
  - Entwicklung neuer, geeigneter mobiler Meskonzepte
  - Evaluation und Validierung kostengünstiger automotiv Sensoren (DATAMOST)
- Vermessung Hybrid-Induktionsbremse



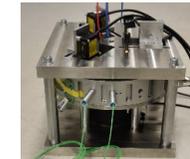
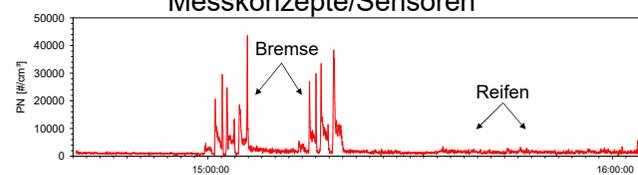
Aufbau



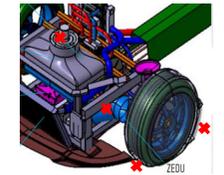
Demonstrator (Art View)



Messkonzepte/Sensoren



Hybridbremse



ZEDU-1



**ZEDU1**

Vielen dank für Ihre Aufmerksamkeit



Robert Hahn\_CC DLR-FK 2021

