

ZEDU-1: Mobilität ohne Feinstaubemissionen aus Brems- und Reifenabrieb



Bremsabriebsemissionen eines batterieelektrischen Fahrzeugs - (Mess-)Konzepte und Ergebnisse -

F. Philipps, L. Bonndorf, S. Reiland



Kurzvorstellung:



Franz Philipps
Teamleiter System und Fahrzeugvalidierung
DLR – FK / FEK
Stuttgart
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
Versuchsträger
Messkonzept

3

Messergebnisse Bremse

Komponentenprüfstand
Referenzfahrzeug

- Hartmetallbeschichtung
- Rekuperation

Demonstrator

- Lamellenbremse

4

Zusammenfassung



Lebenszeitverkürzung durch Feinstaub?



LUFTREINHALTUNG

The image is a composite of three distinct scenes. In the foreground, a man in a purple shirt carries a young child in a green shirt on his shoulders. They are standing in a field of tall, golden wheat. In the middle ground, a large industrial factory with several tall chimneys is emitting thick, dark grey smoke that rises into the sky. In the background, a multi-lane highway is filled with a traffic jam of cars, including several white SUVs and vans, viewed from behind. The overall lighting is warm and golden, suggesting a sunset or sunrise.

Problemstellung: Umweltbelastung, Mikroplastik & Luftreinheit

Themen mobilitätsbedingter Umweltbelastung:

- Klimaerwärmung (CO₂, ...)
- Gesundheit (NO_x, Feinstaub, Mikroplastik,...)

Emissionsquellen:

- Verbrennung (CO₂, NO_x, ...)
- 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)

EU:

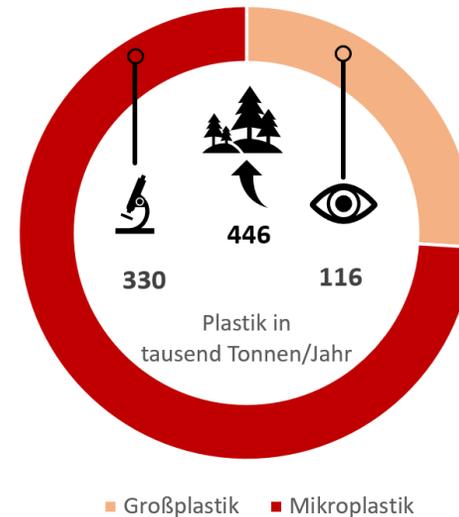
Luftqualitätsrichtlinie: Zum Schutz der menschlichen Gesundheit sind ab dem 1 Januar **2030** europaweit Jahres-Grenzwerte einzuhalten:

- Für die Feinstaubfraktion PM_{2,5}: 10 µg/m³ (Red. um Fakt. 2,5)
- Für die Feinstaubfraktion PM₁₀: 20 µg/m³ (Red. um Fakt. 2)
- Erreichung einer **Nullverschmutzung** der Luft bis spätestens **2050**

Euro 7:

- ab 2025 werden Grenzwerte für Abriebe eingeführt
- ab 2030 keine Verbrenner
-

Plastikfreisetzung in Deutschland



Erstellt aus Daten: Fraunhofer 2018

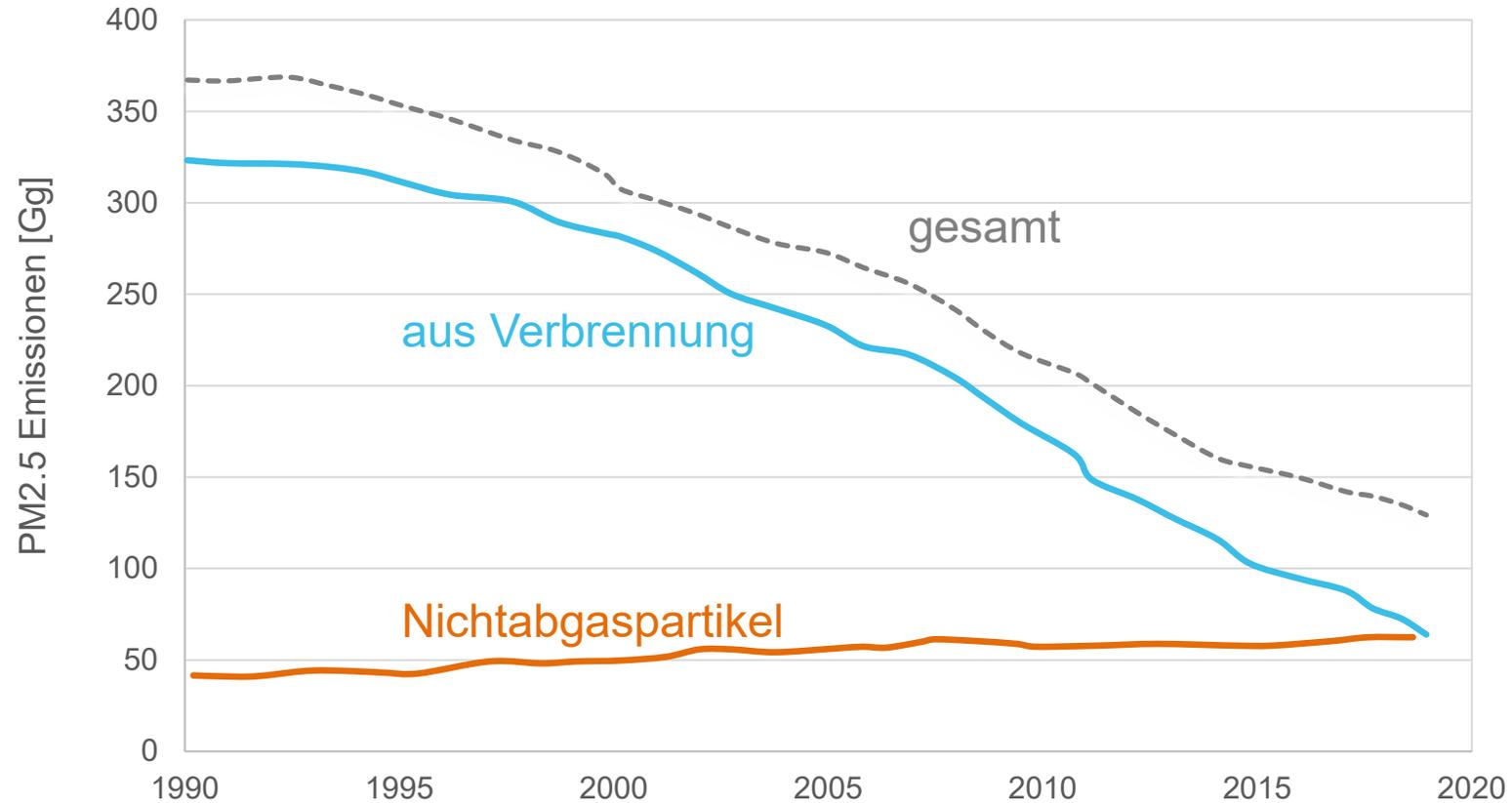
Die größten Mikroplastikquellen in Deutschland



	WHO 2005	WHO 2021	EU 2008	EU 2030
NO ₂	40 µg/m ³	10 µg/m ³	40 µg/m ³	20 µg/m ³
Pm _{2,5}	10 µg/m ³	5 µg/m ³	25 µg/m ³	10 µg/m ³
Pm ₁₀	20 µg/m ³	15 µg/m ³	40 µg/m ³	20 µg/m ³

Relevanz von Nicht-Abgasemissionen

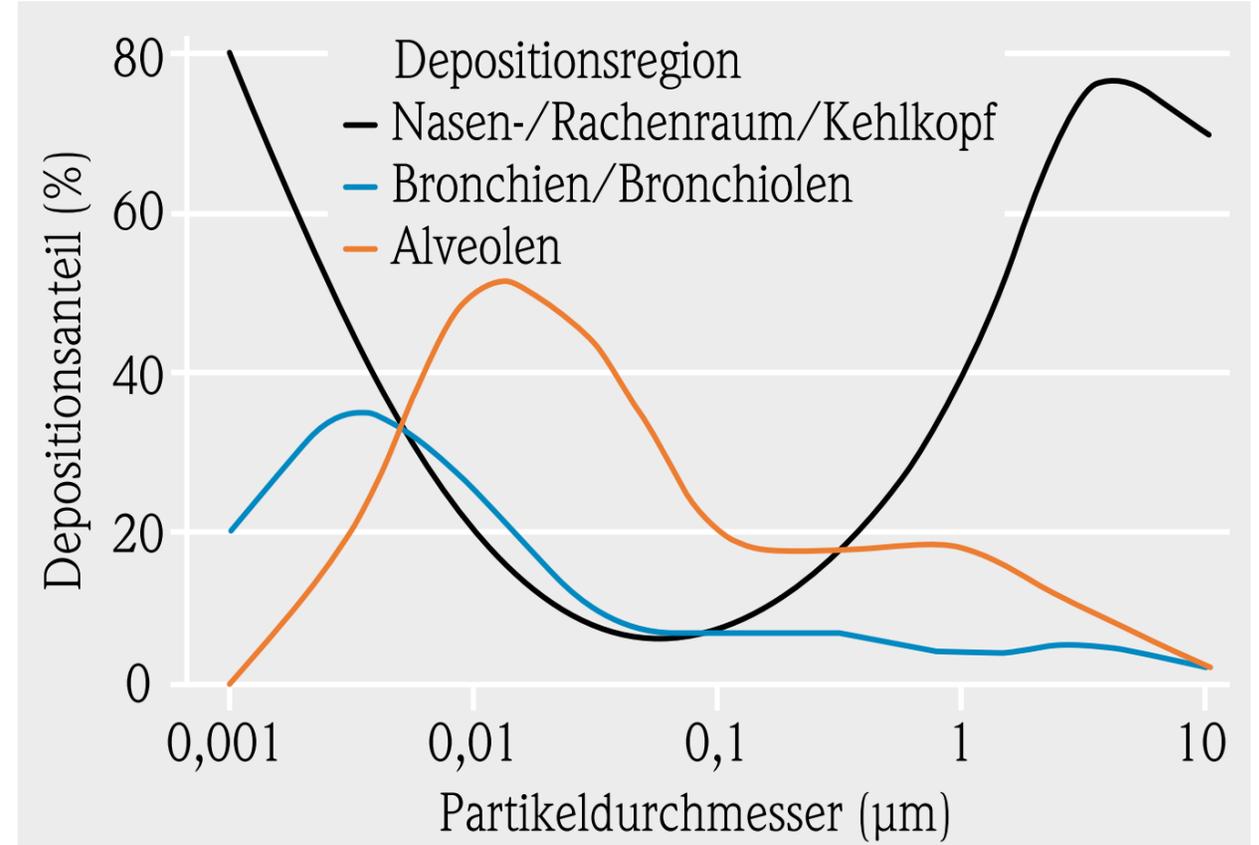
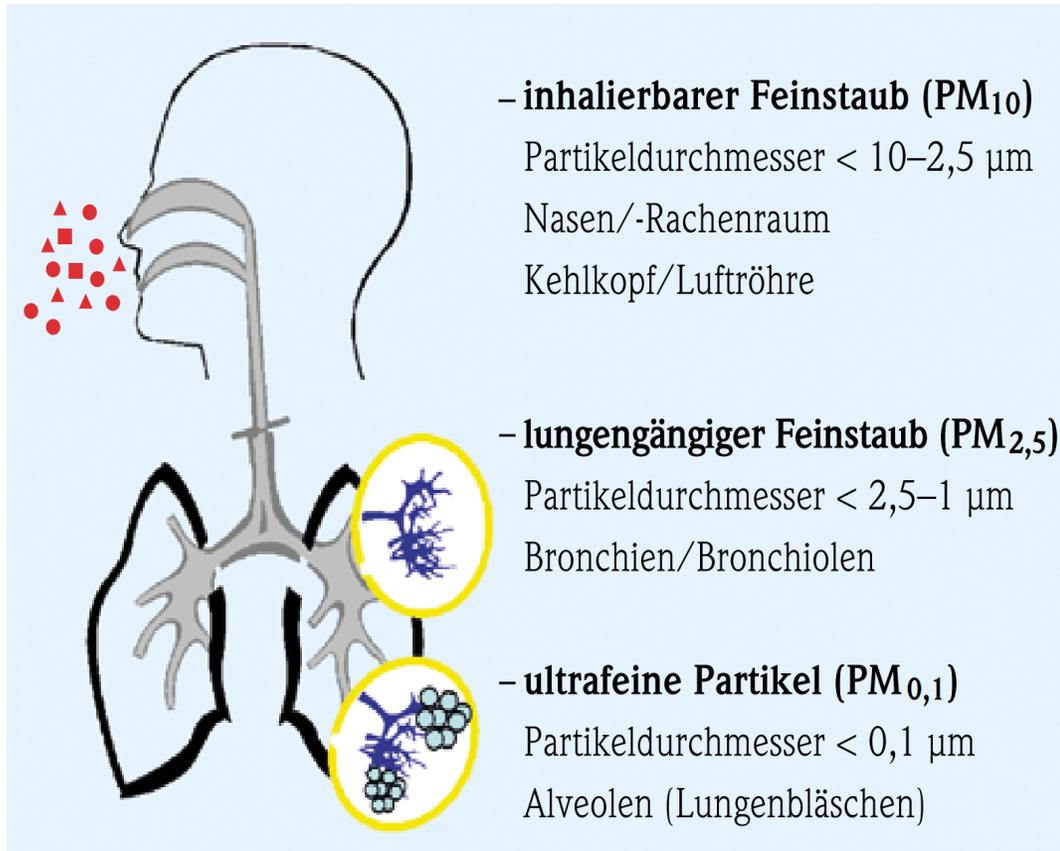
PM2,5-Emissionen im Straßenverkehr in der EU



Eionet Report - ETC/ATNI 2020/5 .



Partikeldeposition als Funktion des Partikeldurchmessers

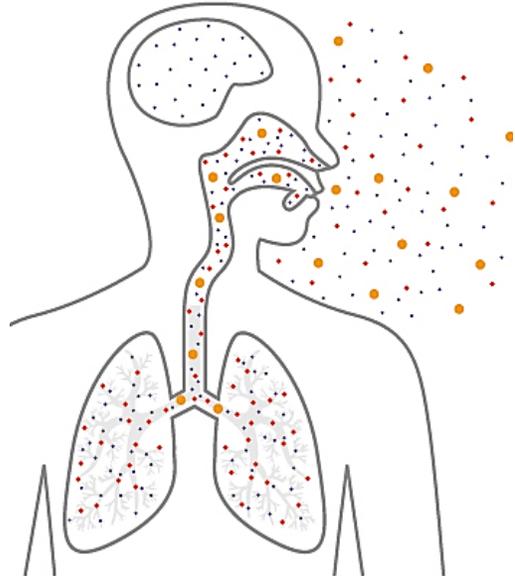


Partikeldepositionsregion des Atemtrakts als Funktion des Partikeldurchmessers bei Nasenatmung des Menschen (Oberdörster 2005)

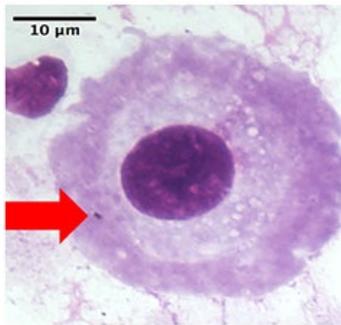
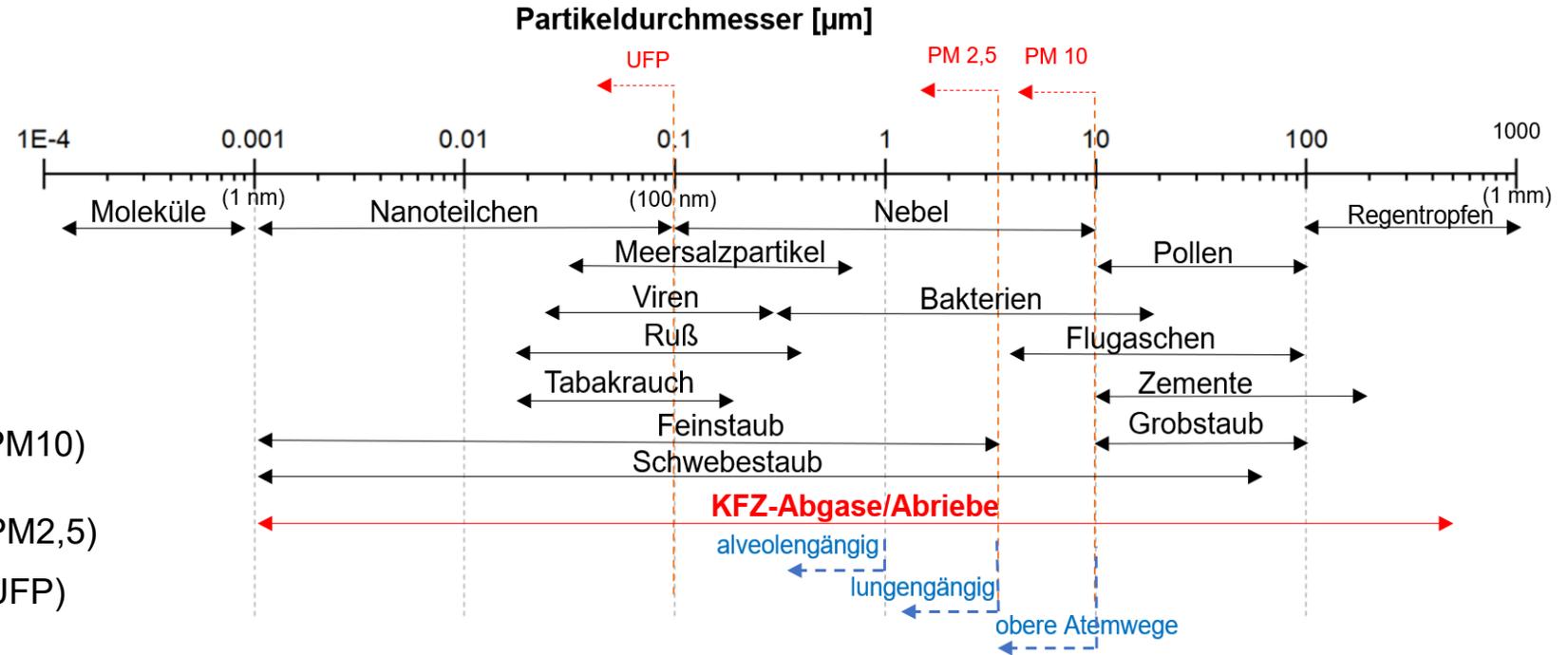
Noch äußerst unklar, welche UFP welche Wirkung auf Organismen haben -> Etablierung der Nanoökotoxikologie.
Wirksamkeit ist abhängig von: Größe (Depositionsregion), Konzentration, Masse, Oberfläche, Struktur, physikalischen und chemischen Eigenschaft sowie der gesundheitlichen Konstitution des Betroffenen.



Feinstaub und ultrafeine Partikel (UFP)



- 10 μm (PM10)
- 2.5 μm (PM2,5)
- 0.1 μm (UFP)



Beispiel: Nanopartikel in einer Plazentazelle

Liu et al. Evidence for the presence of air pollution nanoparticles in placental tissue cells. *Science of The Total Environment* 751, (2021).

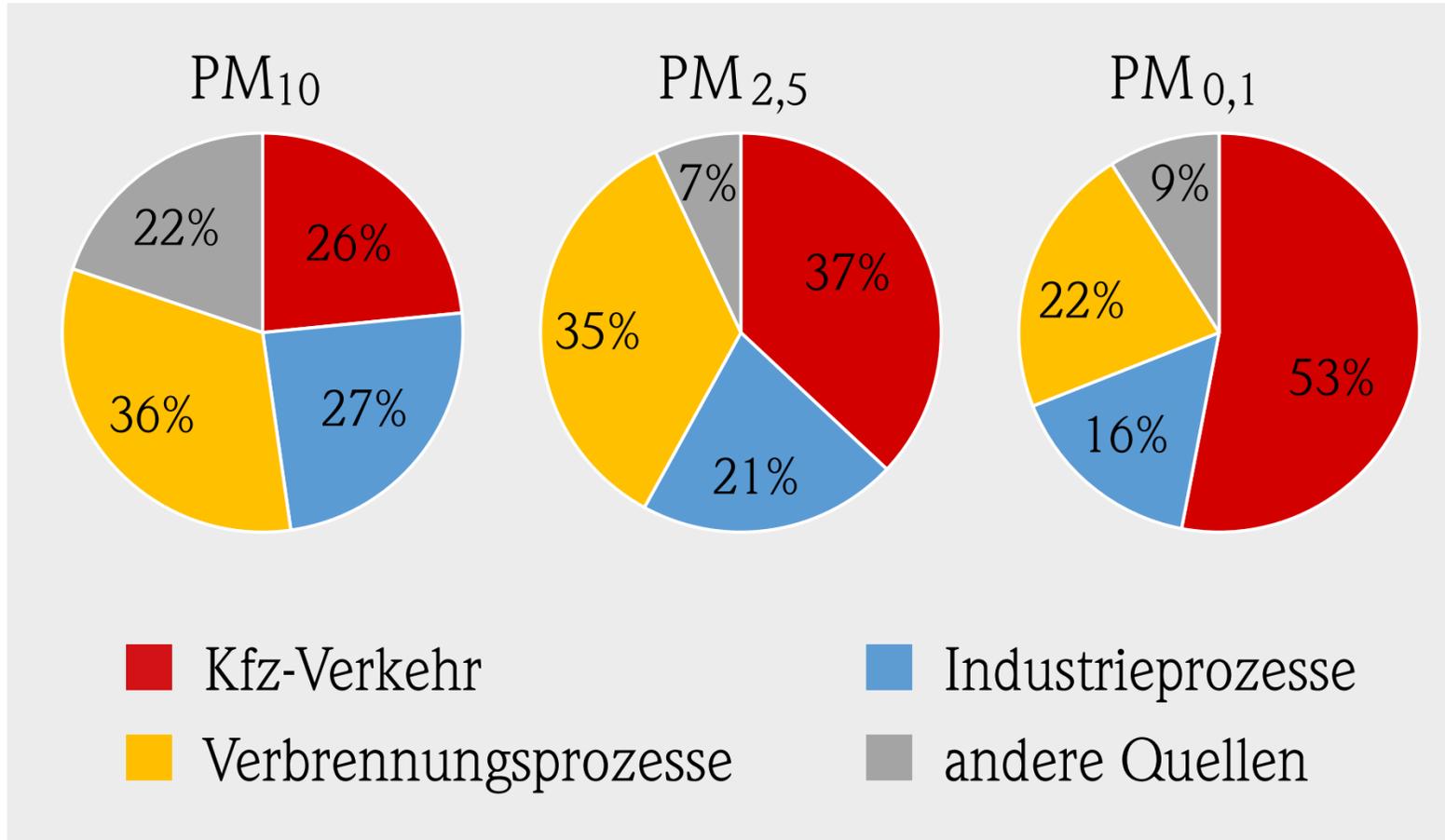
Ultra- / Feinstaubpartikel:

- dringen tief in die Lunge ein bis in die Alveolen, Lungengewebe und Blutkreislauf
- Betrifft alle Organe
- haben eine große (aktive) Oberfläche
- bleiben lange in der Luft (Aerosole)
- Quelle des oxidativen Potentials

⇒ **Gesundheitsrisiko**



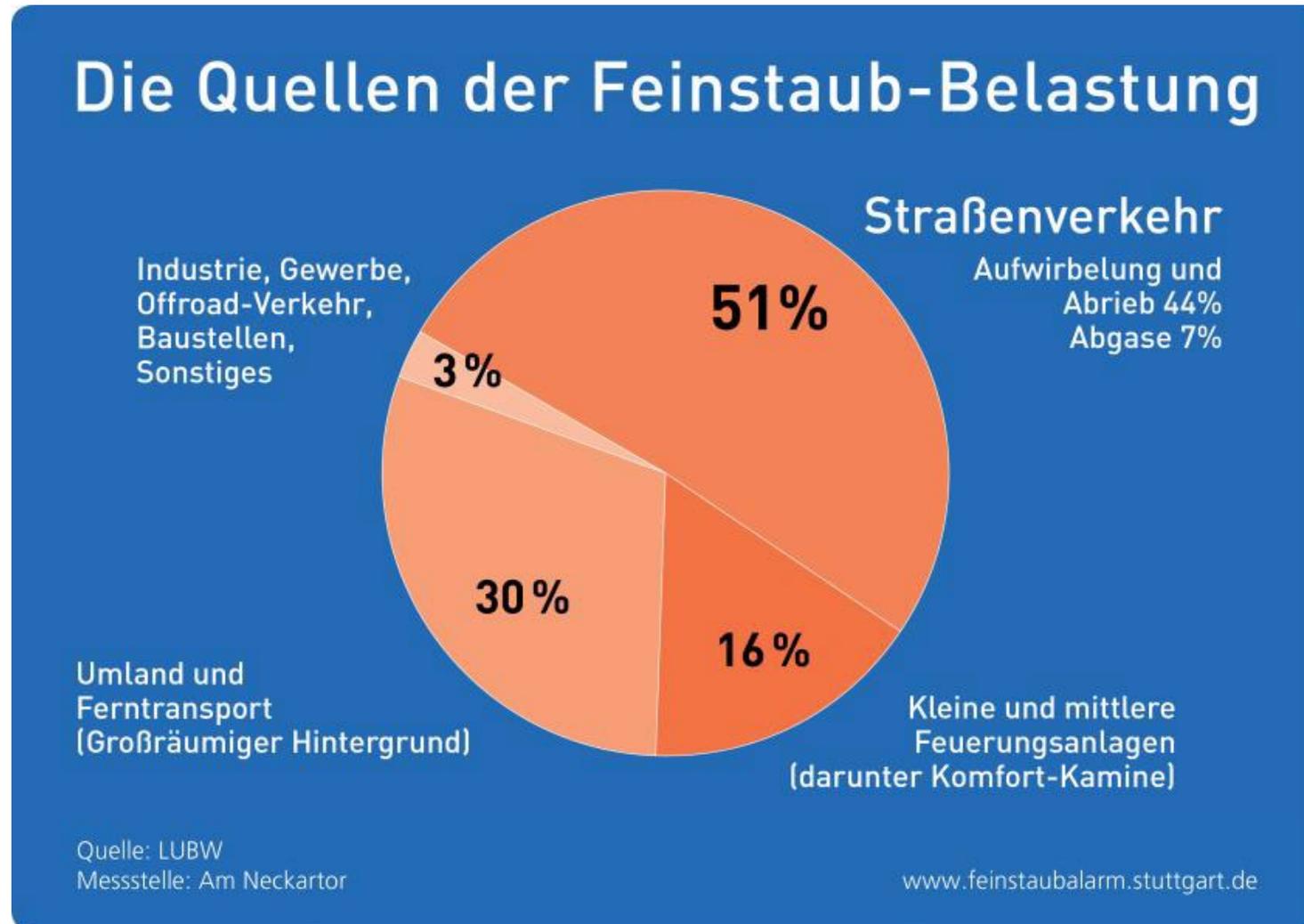
Aufschlüsselung der Quellenanteile



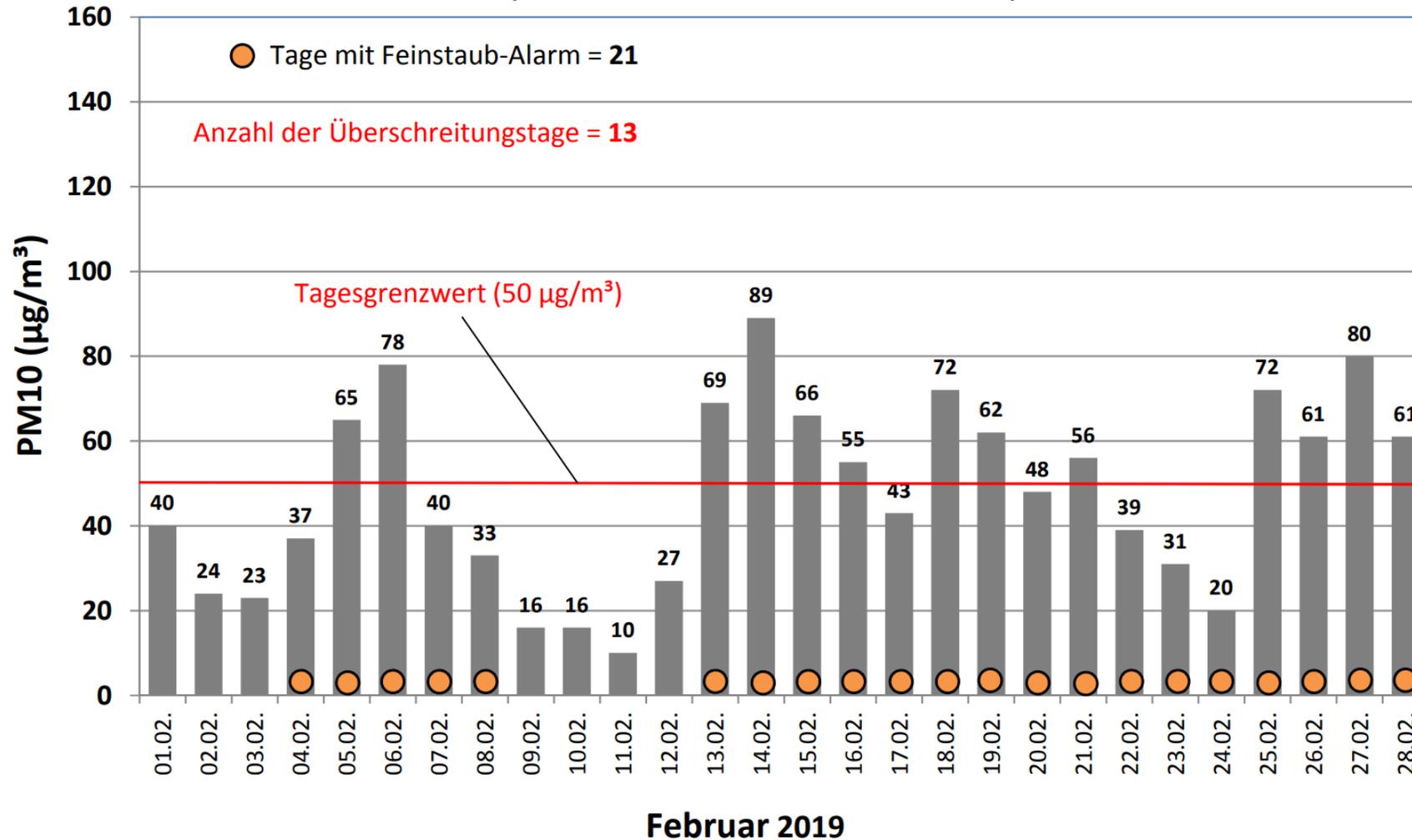
Aufschlüsselung der Quellenanteile an den Gesamtemissionen von PM₁₀, PM_{2,5} und PM_{0,1} in Großbritannien (nach AQEG 2005)



Feinstaub (PM10) nach Quellenanteil – Messstelle: Am Neckartor, Stuttgart



Feinstaub-Tagesmittelwerte (PM10) an der LUBW-Station "Am Neckartor" (kontinuierliches Messverfahren)



Quelle: LUBW, Grafik: AfU Stuttgart



ZEDU1

Neckartor

PROJEKT ZEDU-1



Mikroplastik

Euro 7

Motivation

Vision: Emissionsfreie Mobilität

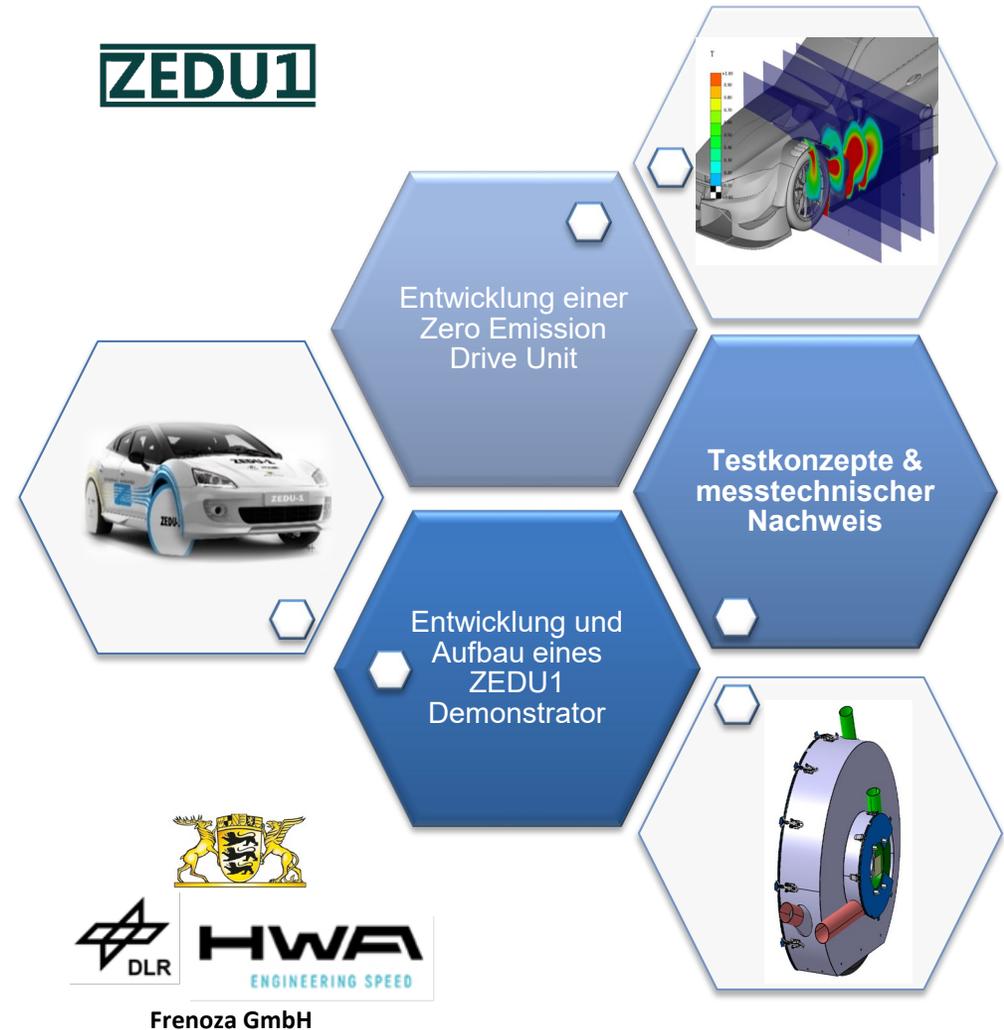
- Verbesserung der Luftqualität
- Reduktion der Belastungen durch den Fahrzeugverkehr



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
- Energetisch effizient
- Alltagstauglich

ZEDU1



ZEDU-1

Projekt: Zero Emission Drive Unit Generation 1

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



Versuchsfahrzeuge

Referenzfahrzeug zur Bestimmung der Partikelemissionen derzeitiger Elektrofahrzeuge



BMW i3

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

Demonstrator-Fahrzeug für die Demonstration von Technologien nahezu feinstaubfreien Fahrens

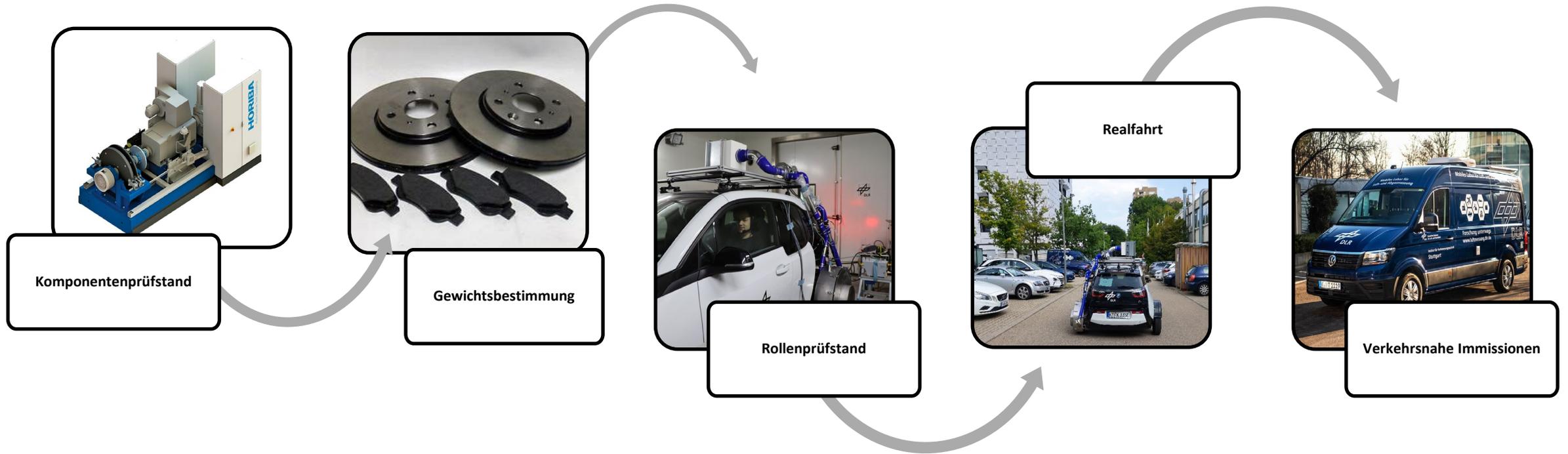


ZEDU1 – Demonstrator

- Fertigstellung Juni 2022
- Vorstellung der Öffentlichkeit 28.9.22
- Vermessung der Emissionen zur Bestimmung der Feinstaub-Einsparung



Messkonzept Bremse



HEPA H13
filtered dilution air

KOMPONENTENPRÜFSTAND

Flow meter

Flow straightener

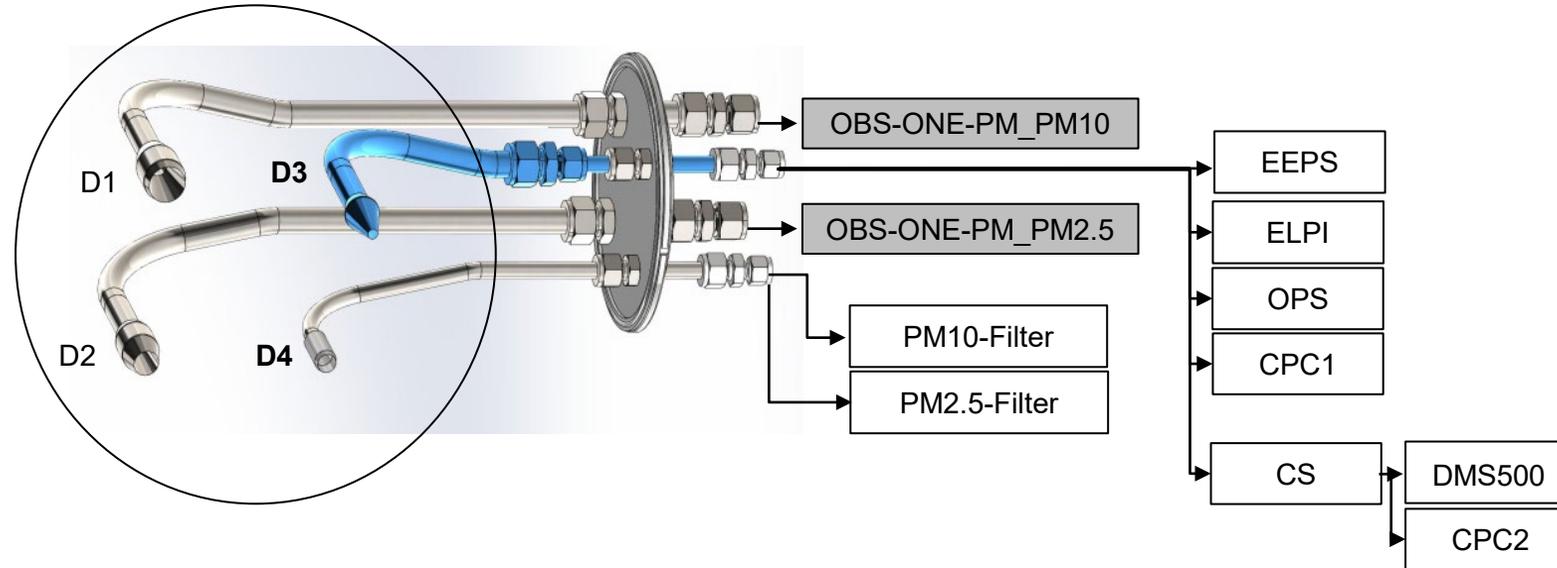
Sampling

Brake Enclosure

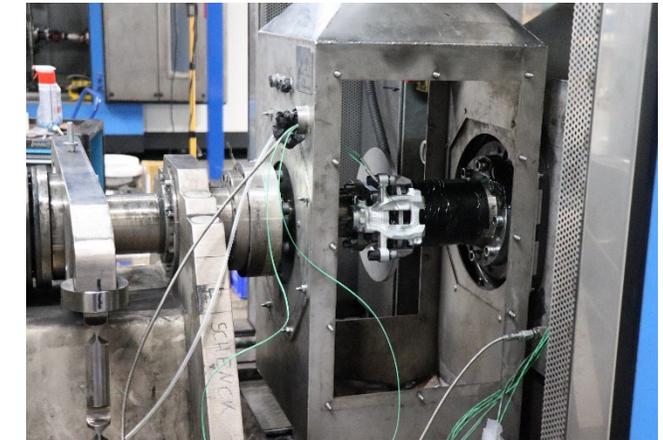
HORIBA MEXA-2110SPCS
+ DLS-ONE + Others

CVS-like exhaust duct

Testaufbau – Komponentenprüfstand



- Probe-Entnahmesonden D1 bis D4
- Partikelanzahlkonzentration (CPC1, CPC2)
- Partikelanzahlgrößenverteilung (EEPS, OPS, DMS500)
- Vergleich volatile und nicht-volatile Partikel
- Partikelsammlung für Offline-Analyse (ELPI, PM10, PM2.5)
- Gravimetrische Messung durch HORIBA



REFERENZ FAHRZEUG



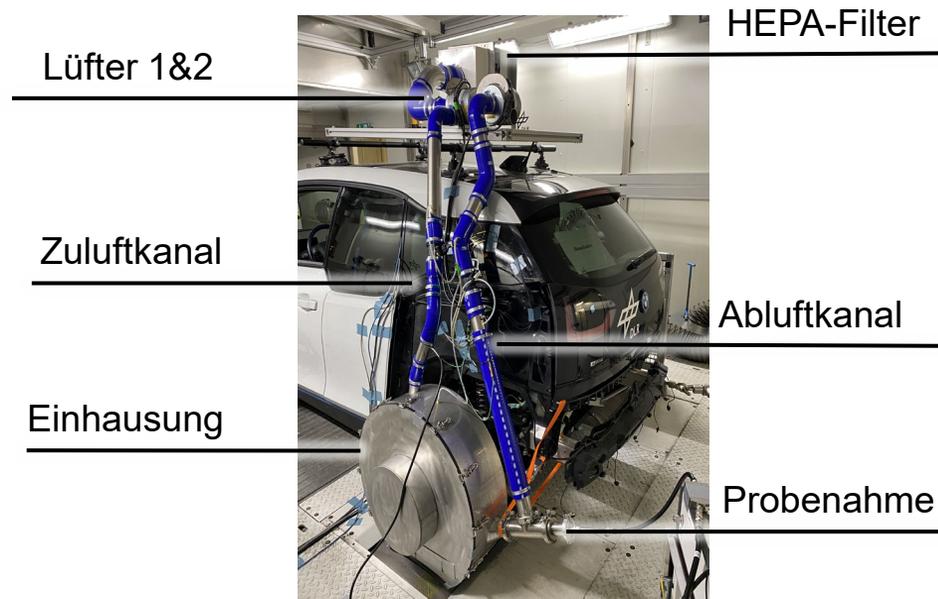
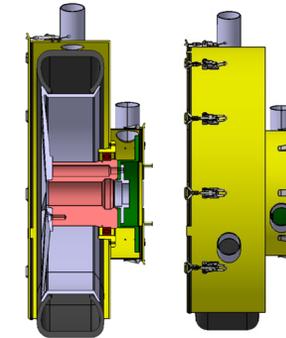
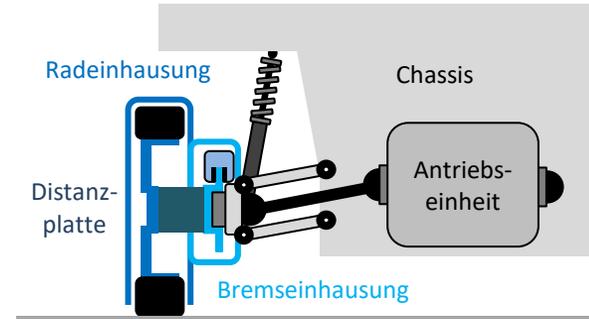
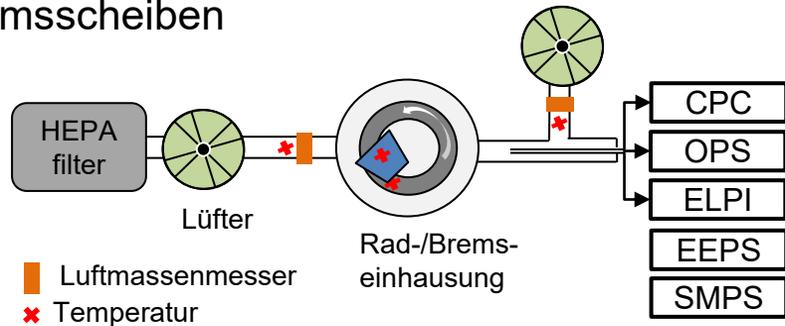
Messkonzept Referenzfahrzeug

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

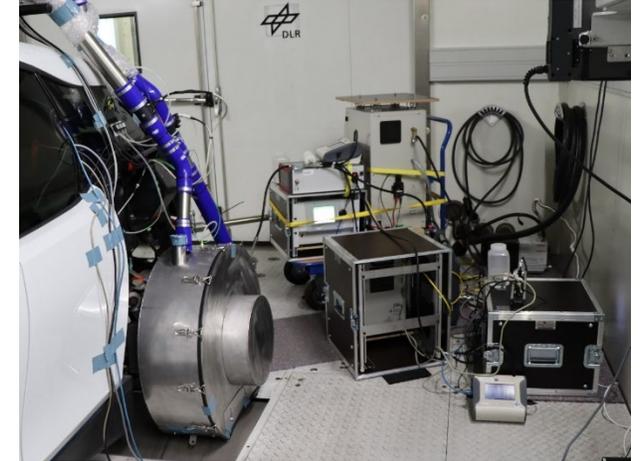
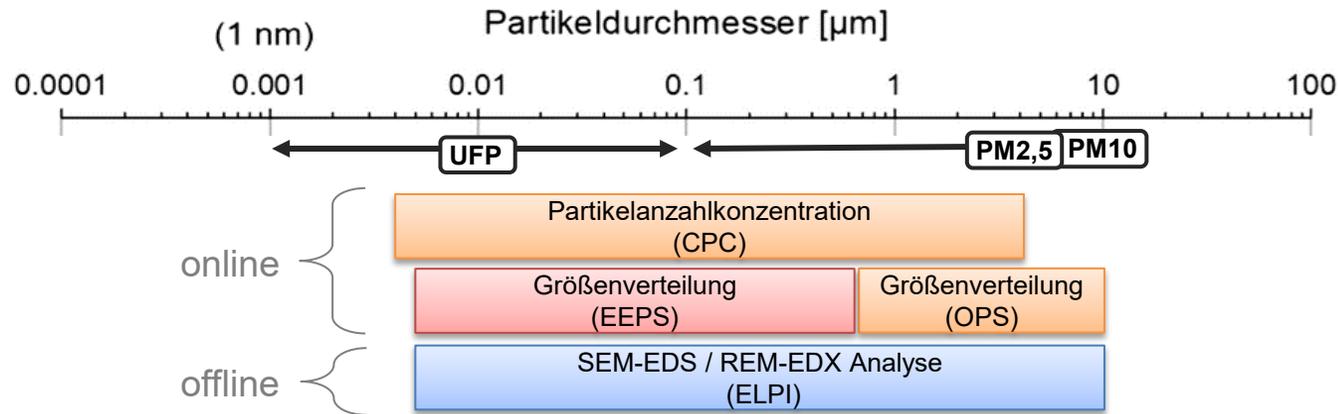
Testprofile:

- Rollenprüfstand, Realfahrt & Komponenten
- Testzyklen (WLTC, RDE, ..) & Einzelbremsungen
- Originalbrems Scheiben & beschichtete Brems Scheiben



Patent: Augsburg, K., D. Hesse and F. Wenzel, DE 10 2017 006 349 B4: Vorrichtung zur Messung und Klassifizierung der Partikelemissionen einer Radbremse eines Fahrzeuges. (2017). Beschreibt eine Vorrichtung, die ein vollständiges Gehäuse für die Bremse am Fahrzeug beinhaltet.

Partikelmesstechnik



Optische Messung

CPC OPS

Elektromobilität

EEPS

Impaktor & Mikroskopie

ELPI REM-EDX

- Charakterisierung der Emissionen:
- Partikelanzahlkonzentration
 - Größenverteilung
 - Morphologie
 - Elementare Zusammensetzung



Messaufbau für mobile Messungen



Stromversorgung, Datenlogger und Wandler

OPS (0.3 – 10 μm)

CPC #1 (2.5 nm - 3 μm)

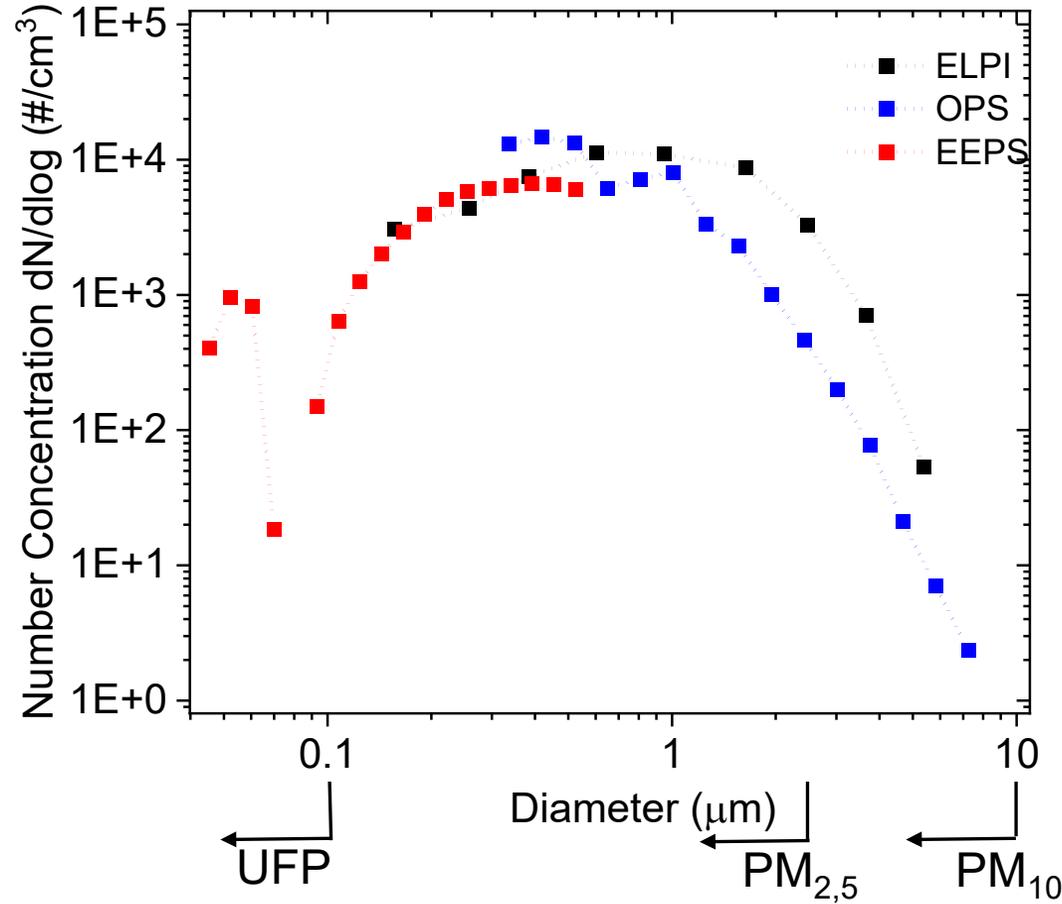
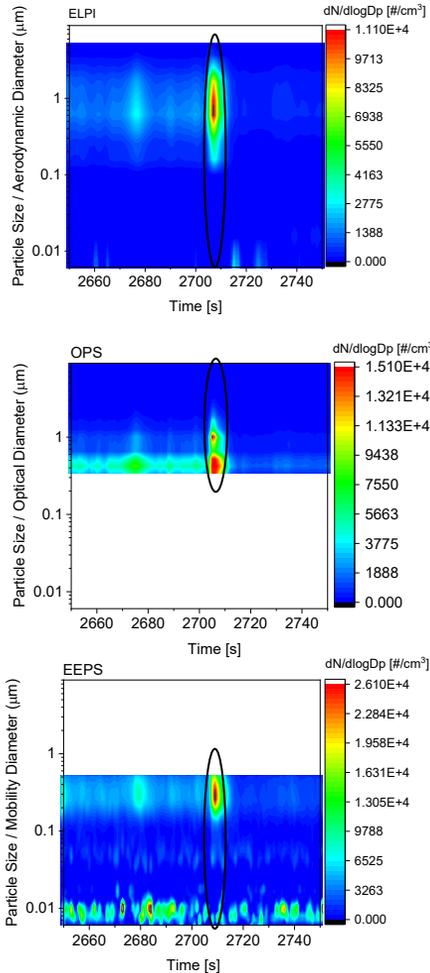


CPC #2 (2.5 nm - 3 μm)

EEPS (5.6 - 560 nm)



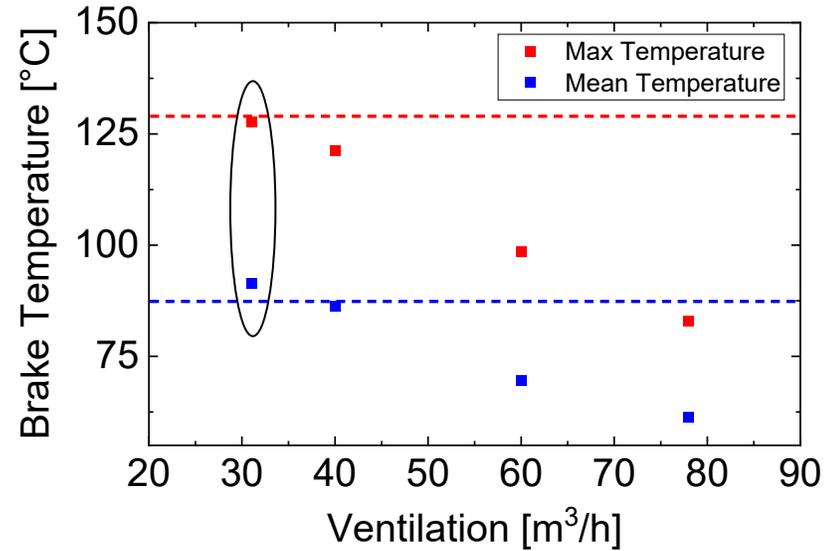
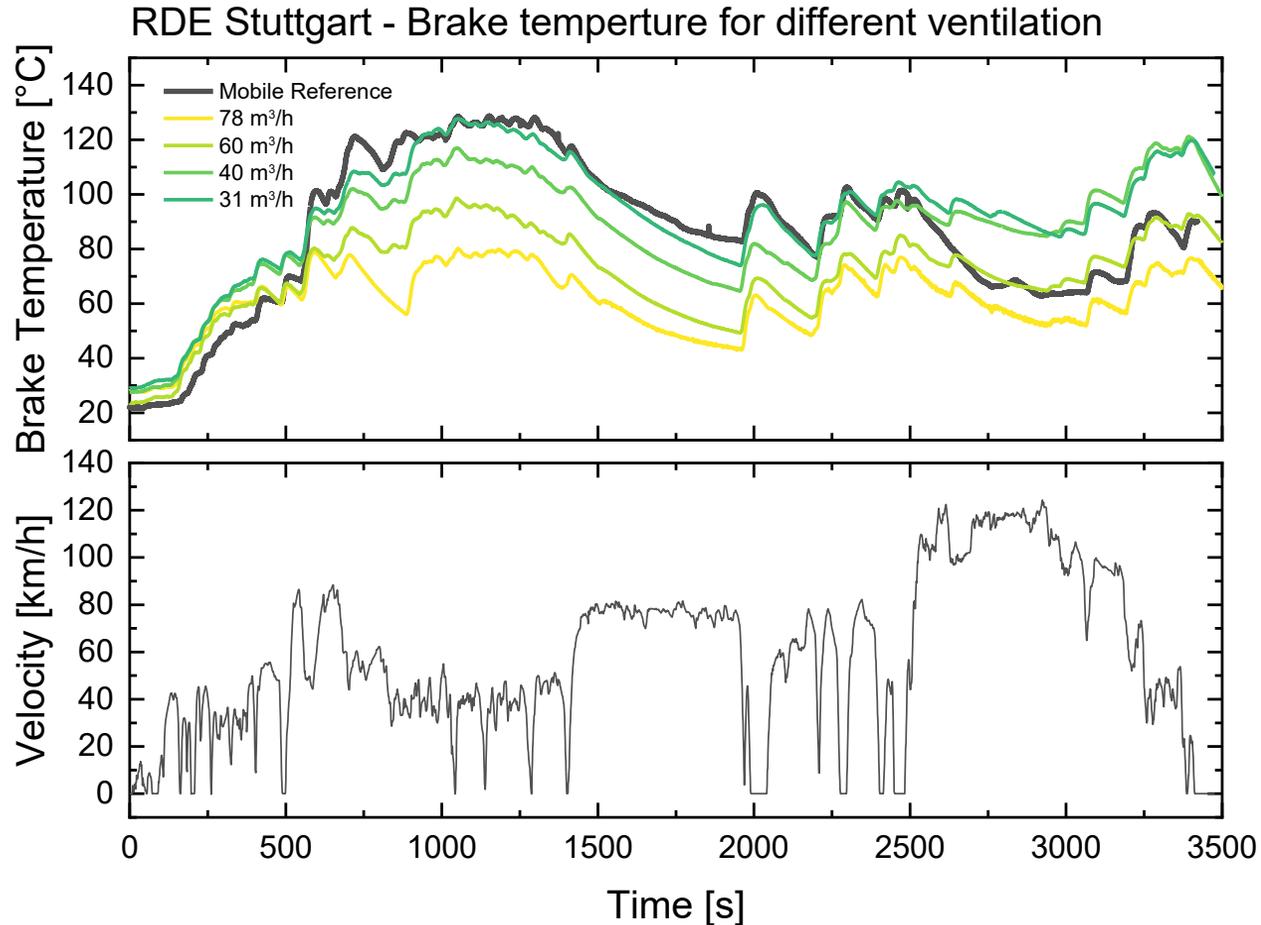
Bremsemissionen – RDE-Messgeräte - Partikelgrößenverteilung



- Mit den Geräten ELPI, OPS und EEPS wird das Spektrum der Emissionen von PM₁₀ bis UFP abgedeckt
- Partikelverteilung mit Maxima bei ca. 10 nm und 200 bis und ca. 700 nm



Optimierung des Kühlluftstroms

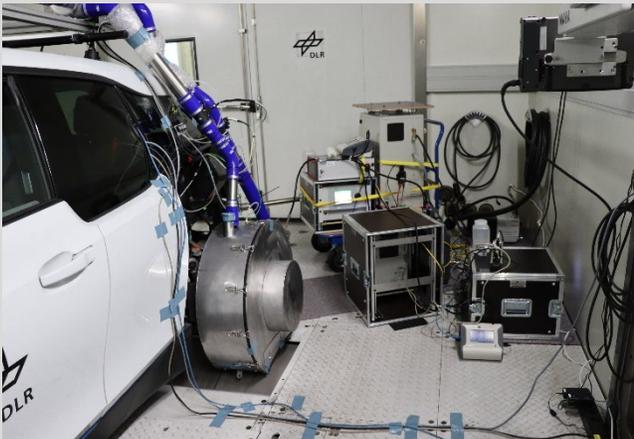


- Vorgehen orientiert an PMP-Empfehlung für Komponentenprüfstände
- Erfolgreiche Einstellung des Kühlluftstroms durch Realfahrt ohne Einhausung



Messszenarien Referenzfahrzeug

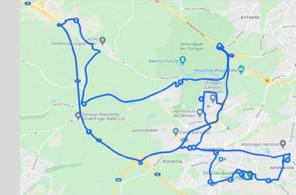
Rollenprüfstand



Testgelände



Realfahrten (RDE, Straße)



Total	46.2 km
Stadt	22.5 km
Land	14.5 km
Autobahn	9.2 km

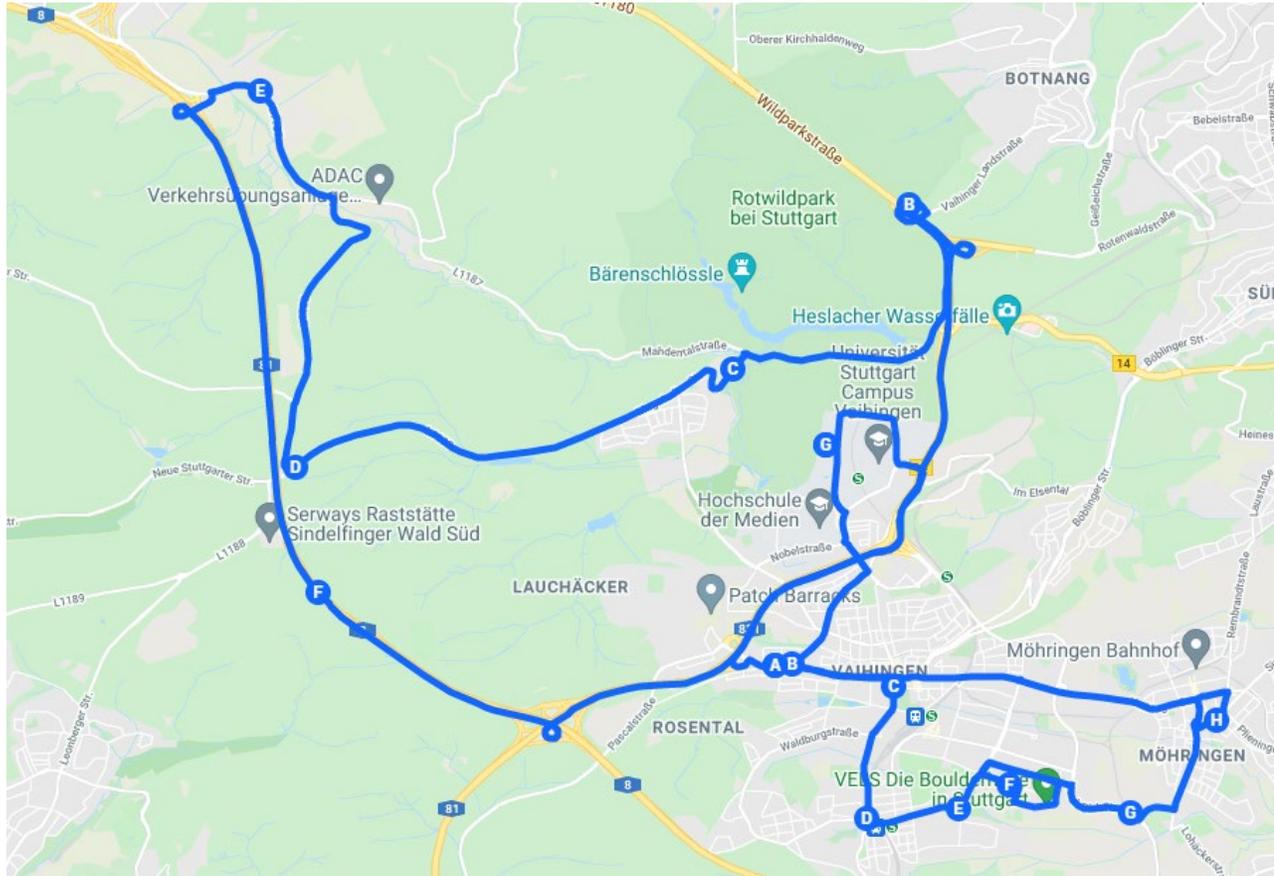


Fahrzyklen

Fahrzyklus	Zeit [s]	Strecke [km]	Mittlere Geschwindigkeit [km/h]	Max. Geschwindigkeit [km/h]
WLTC Class 3	1800 (0,5 h)	23.2	46.5	131
WLTC Brake Part 10	5272 (1,5 h)	64.7	44.2	132.5
Realer Fahrzyklus	3619 (~1h)	47.4	47.2	111.1



Realfahrt Straße



Strecken	Länge
Gesamte Strecke	46.2 km
Stadt ($v < 60$ km/h)	22.5 km
Land ($60 < v < 90$ km/h)	14.5 km
Autobahn ($60 < v < 90$ km/h)	9 km

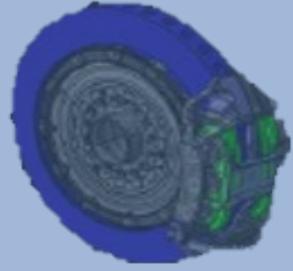
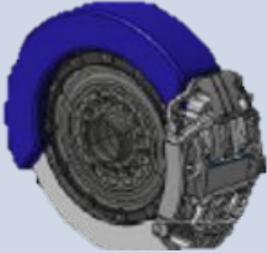
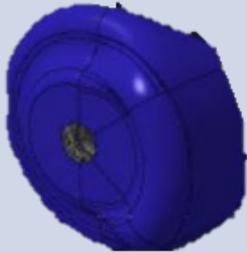
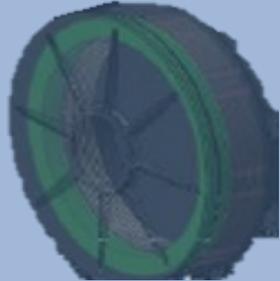
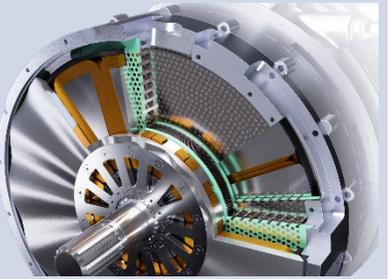


Real Driving Cycle (RDE) mit Stadt-, Land- und Autobahnabschnitten

Geplottet mit Daten aus OpenStreetMap.org

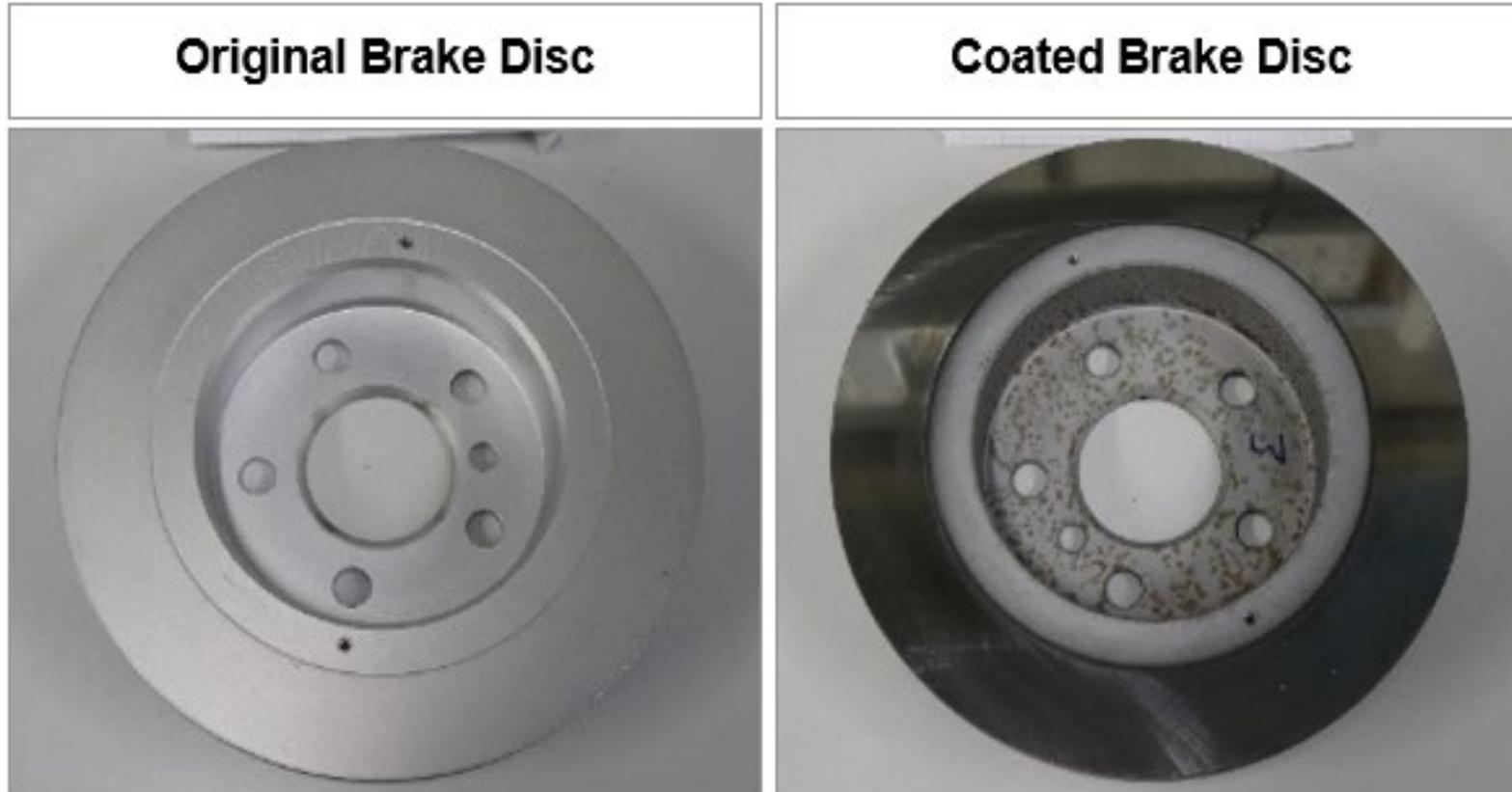


Konzepte Bremse

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	+++	++
	Frenoza			HWA	DLR

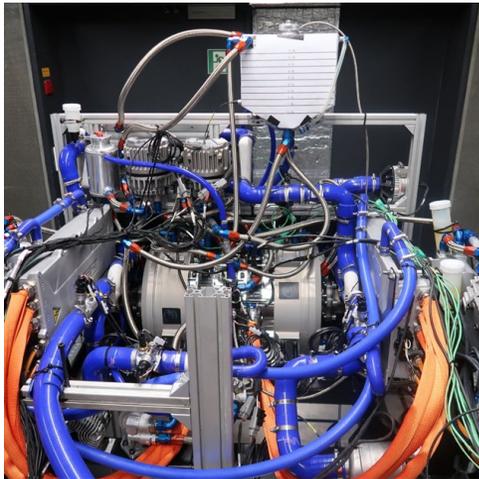
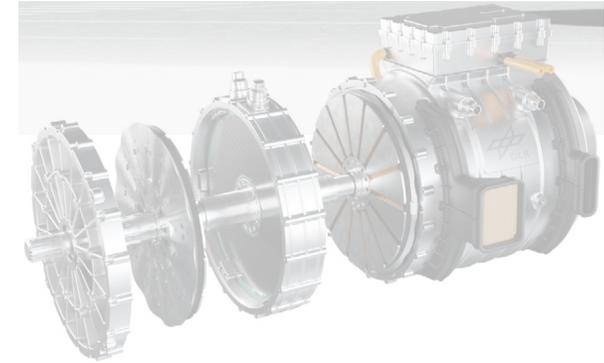
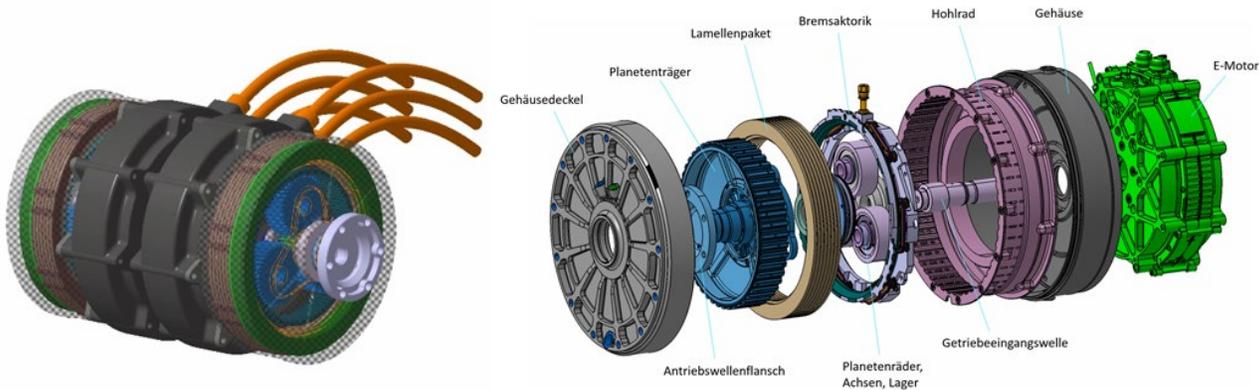


Original Bremsscheibe (Guss) und Bremsscheibe mit Hartmetall Beschichtung

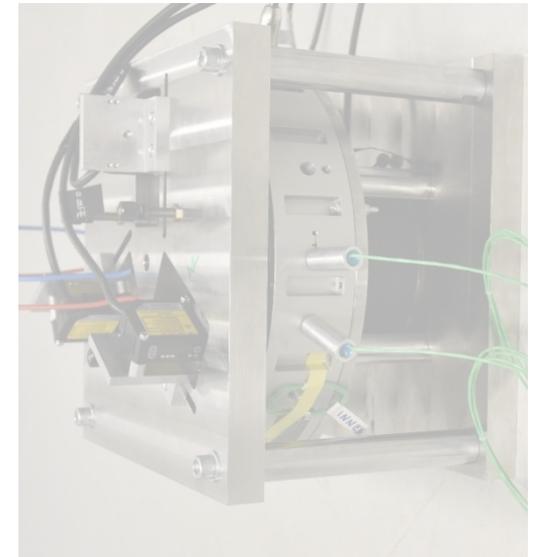
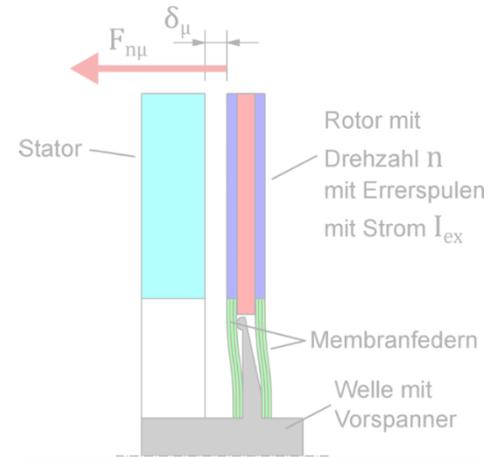


Hartmetallschichtung: 20 % Wolframcarbide und 30 % Titancarbid in einer 50 % duktilen Matrix aus rostfreiem Stahl. ©FRENOZA GmbH

Entwicklung Bremse



Lamellenbremse: Packaging, Explosionszeichnung und Prüfstands Aufbau



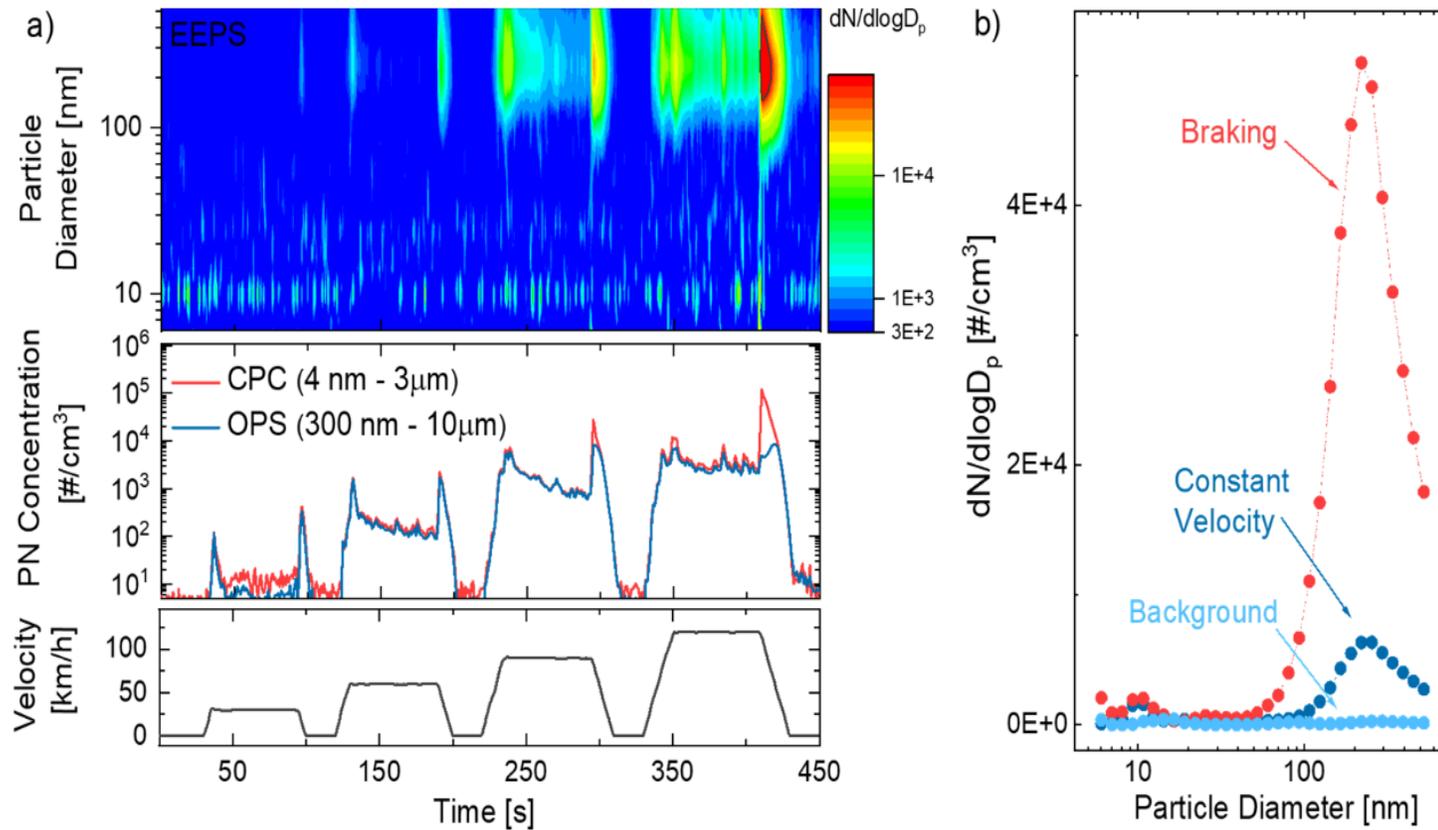
Induktionshybridbremse: Explosionszeichnung, Funktion und Prüfstands Aufbau



MESSERGEBNISSE



Bremspartikelemissionen ZEDU Brake Zyklus (Geschwindigkeitstreppe)

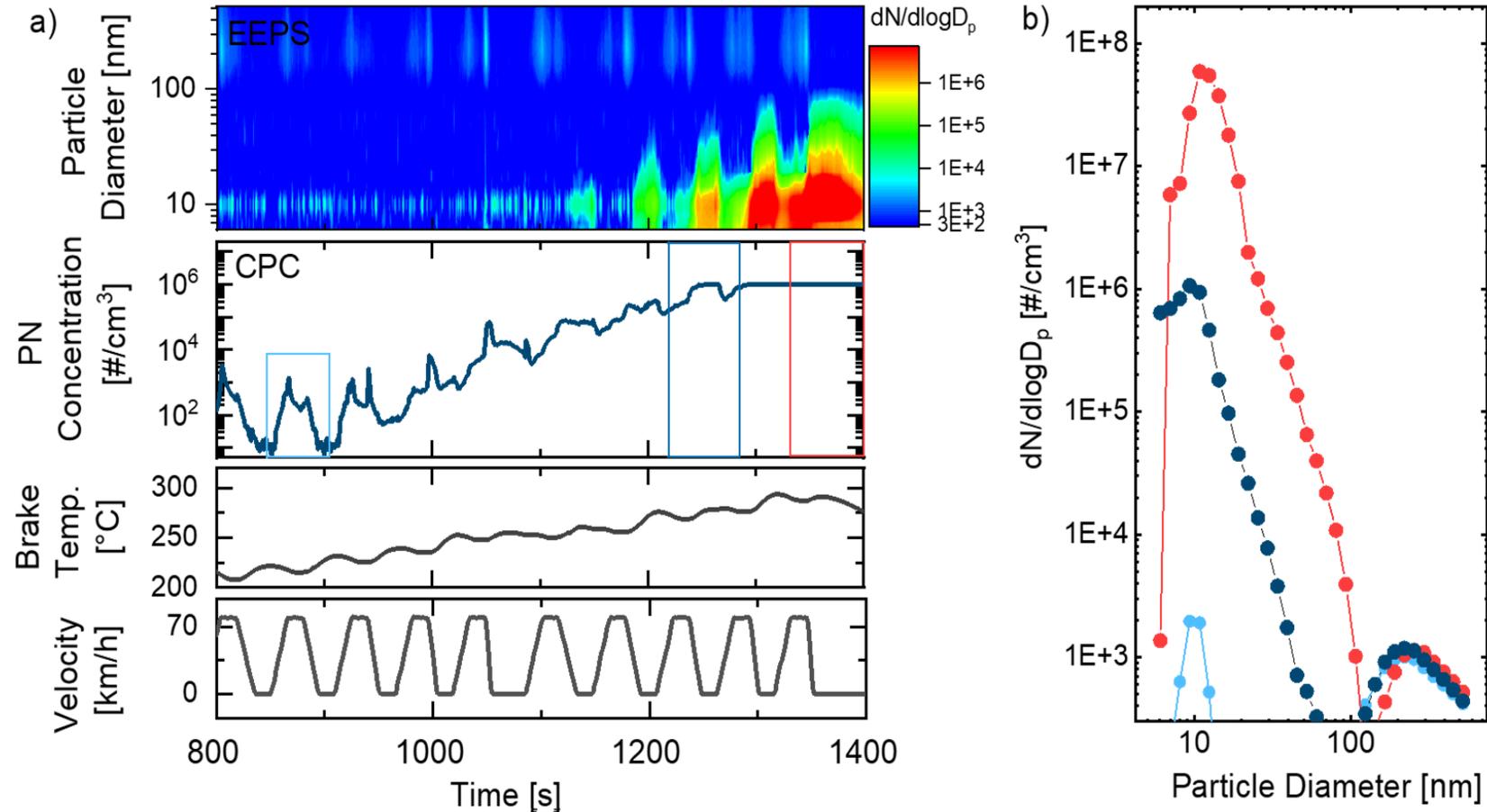


a) Partikelgrößenverteilung (EEPS) sowie die Partikelanzahlkonzentration (CPC und OPS Messung)

b) Partikelgrößenverteilung (EEPS): $v =$ konstant 120 km/h, Bremsvorgang, Hintergrund.



Partikelemissionen bei hohen Bremstemperaturen (ZEDU Accelerate Zyklus)

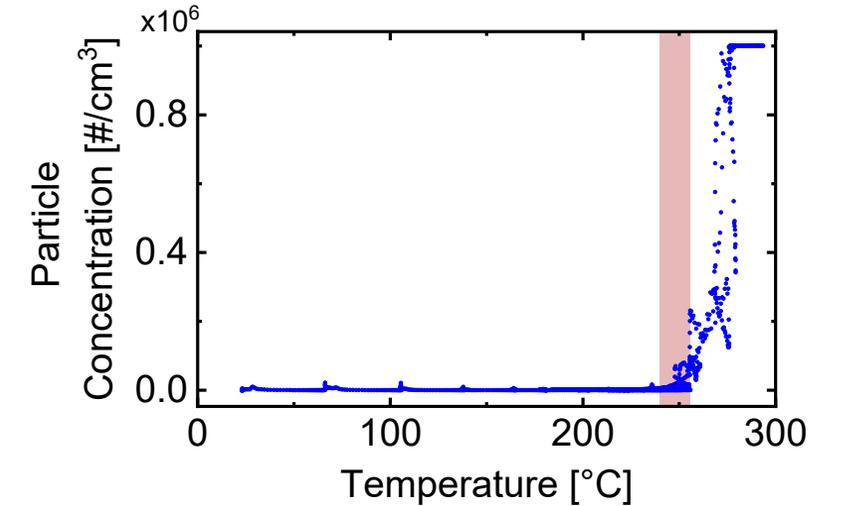
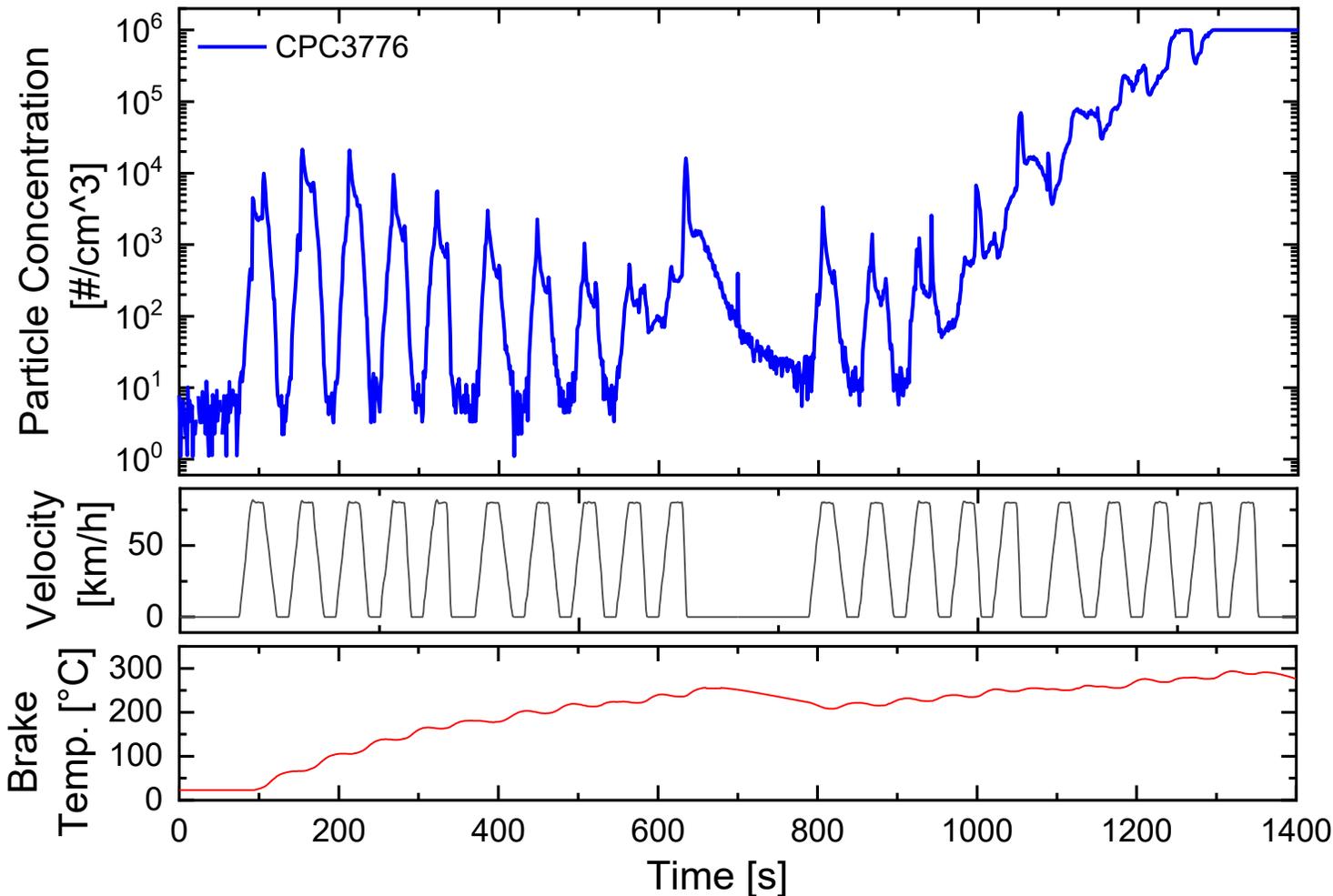


a) Partikelanzahlkonzentration (EEPS und CPC), Temperatur und Geschwindigkeitsverlauf.

b) Partikelgrößenverteilung (EEPS) für unterschiedliche Bremstemperaturen. (Gemittelte Zeitraum ist farblich gekennzeichnet.)



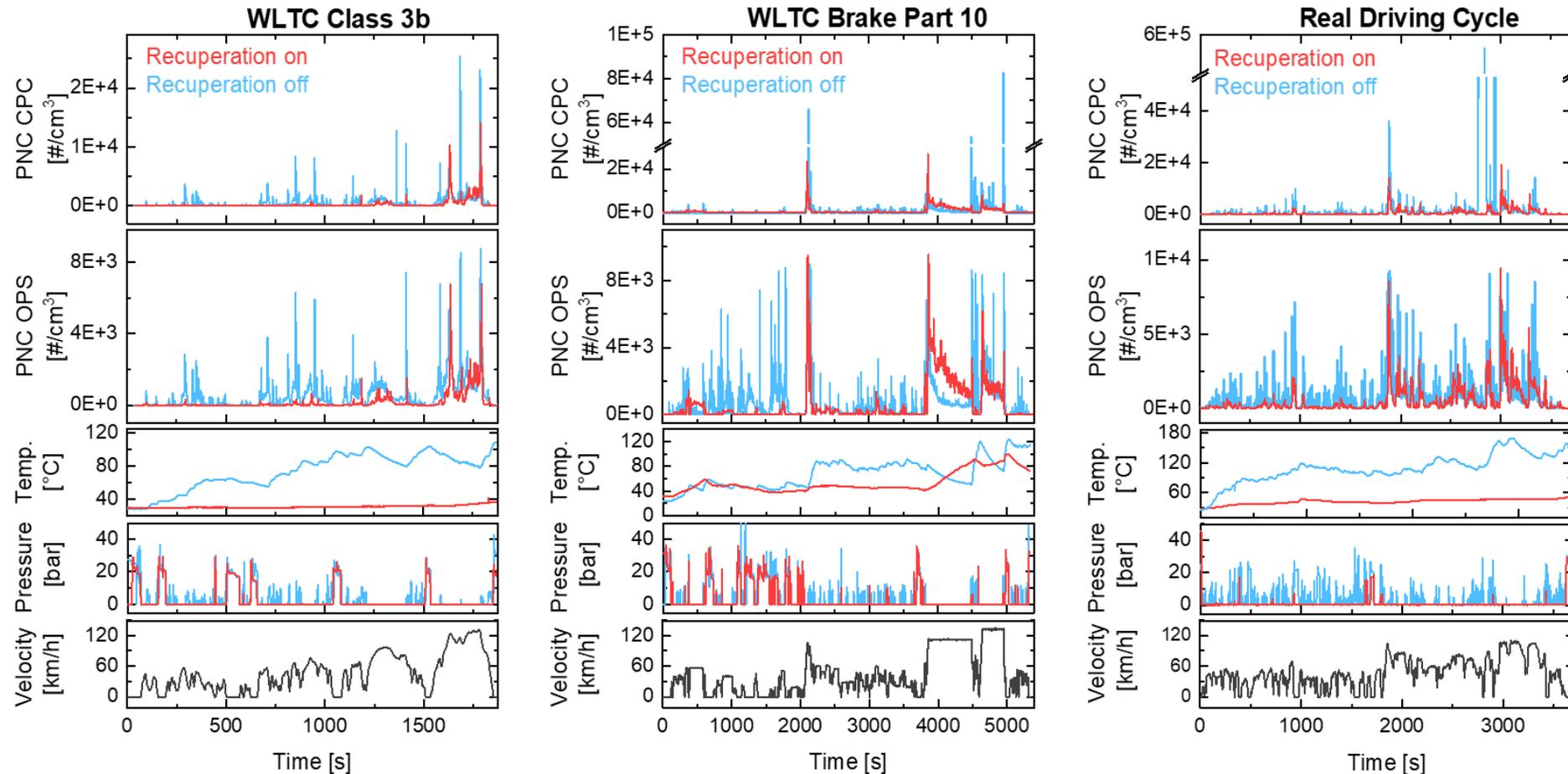
Bremsemissionen und Grenztemperatur (ZEDU Accelerate Zyklus)



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



Bremsemissionen mit und ohne Rekuperation



Partikelzahlkonzentration von (Ultra-)feine Partikeln mit Durchmesser zwischen 4 nm und 3 μm wurden mit CPC gemessen.

Detektion größerer Partikeln zwischen 300 nm und 10 μm erfolgte mit OPS.

Korreliert: Geschwindigkeit des Fahrzeugs, Druck der hydraulischen Bremse und die Bremstemperatur.



Bremsemissionen mit und ohne Rekuperation

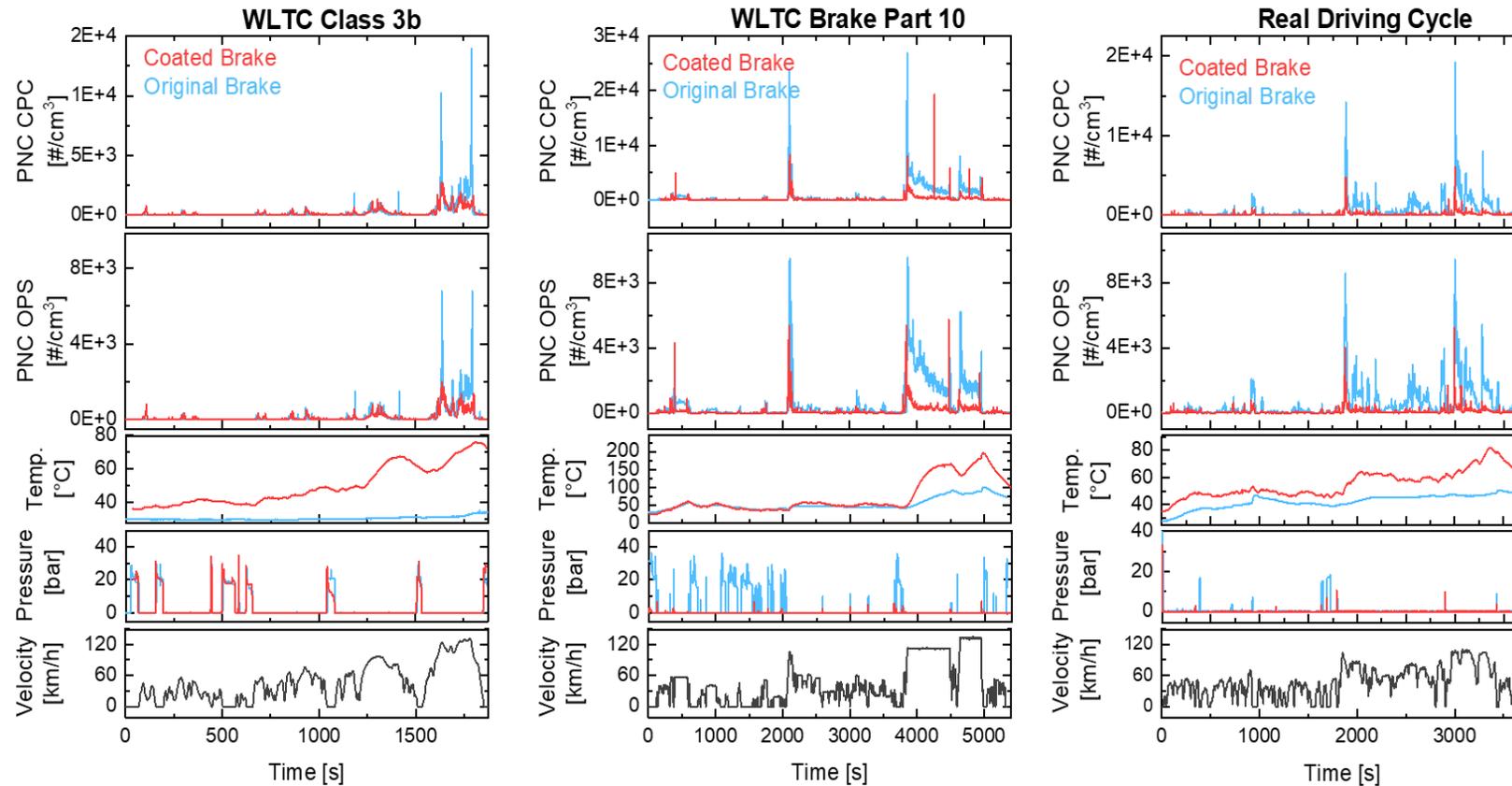
Fahrzyklus	Reduzierung der Bremsereignisse durch Rekuperation [%]	PN-Emissionen an der Hinterachsbremse [# / km]		Reduzierung der PN-Emissionen durch Rekuperation [%]	
		CPC 4 nm - 3 μm	OPS 300 nm - 10 μm	CPC 4 nm - 3 μm	OPS 300 nm - 10 μm
	#				
WLTC Clas 3b	95.8	1.63×10^8	$1,29 \times 10^8$	65.4	67.9
WLTC Brake part 10	88.5	$5,11 \times 10^8$	$4,27 \times 10^8$	4.3	-15.2
Realer Fahrzyklus	87.7	4.10×10^8	3.45×10^8	89.8	34.6

CPC: Detektion von (Ultra-)feine-Partikelemissionen zwischen 4 nm und 3 μm

OPS: Detektion von größeren Partikel mit Durchmessern zwischen 300 nm und 10 μm



Partikelemissionen Original- und beschichteten Bremsscheibe für unterschiedliche Fahrzyklen.



Partikelzahlkonzentration von (Ultra-)feine Partikeln mit Durchmesser zwischen 4 nm und 3 μm wurden mit CPC gemessen
Detektion größerer Partikeln zwischen 300 nm und 10 μm erfolgte mit OPS.
Dazu korrelieren Geschwindigkeit des Fahrzeugs, der Druck der hydraulischen Bremse und die Bremstemperatur.



Bremspartikelemissionen und Emissionsreduktion durch Hardmetallbeschichtung

Fahrzyklus	PN-Emissionen an der Hinterachsbremse [#/km]		Reduzierung der PN-Emissionen durch Beschichtung [%]	
	4 nm - 3 µm	300 nm - 10 µm	4 nm - 3 µm	300nm - 10 µm
WLTC Class 3b	1.33×10^8	8.50×10^7	18.5	33,9
WLTC Brake Part 10	1.45×10^8	9.38×10^7	71.7	78
Realer Fahrzyklus (RDE)	$8,64 \times 10^7$	5.85×10^7	78.9	83



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 %



ZEDU1

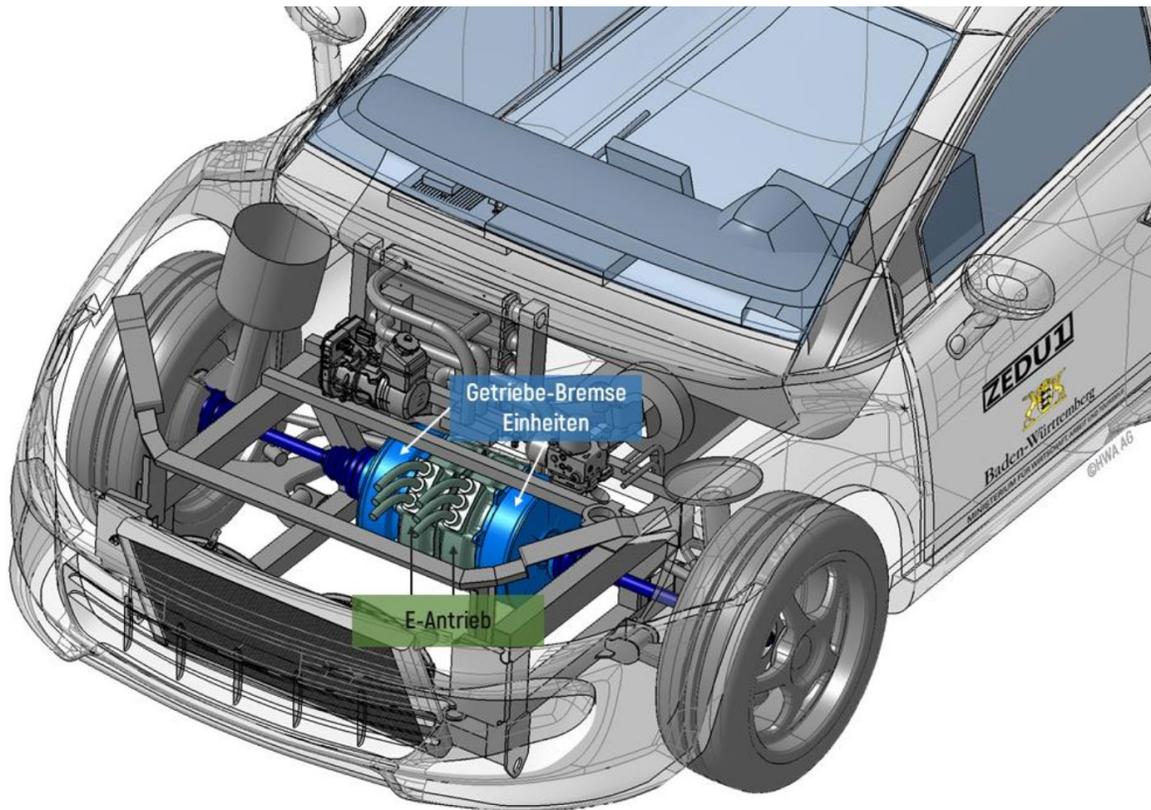
Neckartor

DEMONSTRATOR



Mikroplastik

ZEDU-1 Integration der Motor Bremseinheit ins Fahrzeug



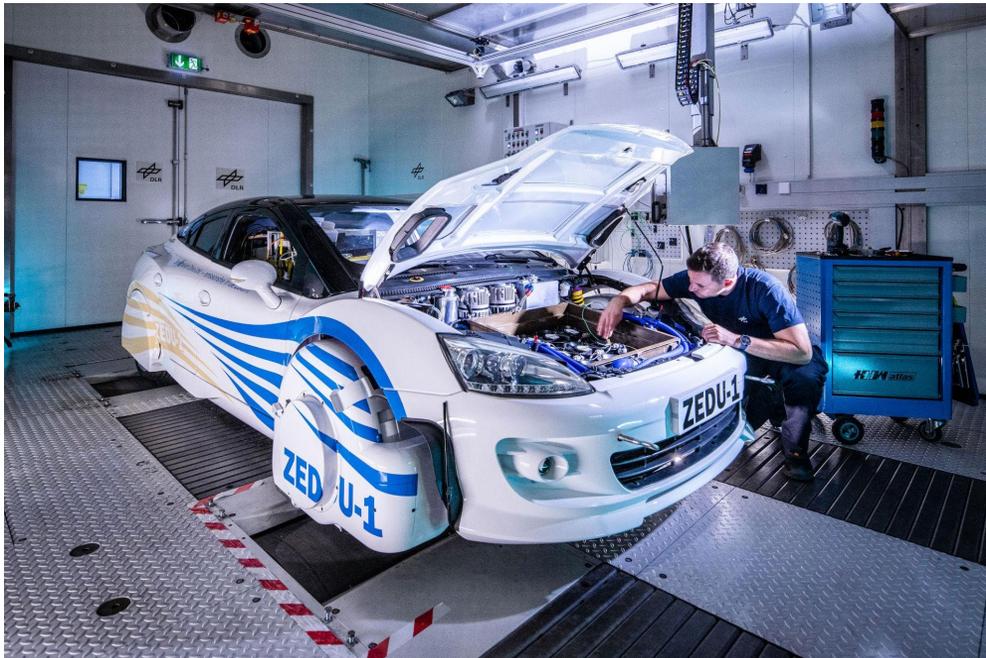
Packaging



Einbau



ZEDI-1: Demonstrator



Test auf dem DLR-Rollenprüfstand:



[Roll-out ZEDU-1 am 2022.08.28 in Stuttgart mit Ministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut](#)



Messszenarien Demonstrator-Fahrzeug

Rollenprüfstand (DLR)



Testgelände (Boxberg)



ZEDU-1: Film (Kurzfassung)



Find ZEDU-1 at: DLR-Portal:
Ntv PS Automagazine:
SWR-Stuttgart:
SWR-Landesschau:
YouTube:

[ZEDU-1: Das im Betrieb umweltfreundlichste Auto der Welt - DLR Portal](#)

[Was steckt im "umweltfreundlichsten Auto der Welt"? - n-tv.de](#)

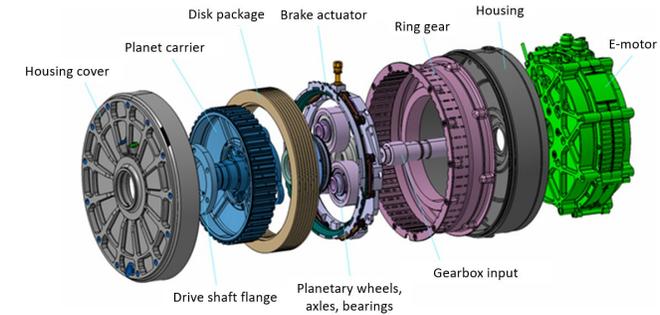
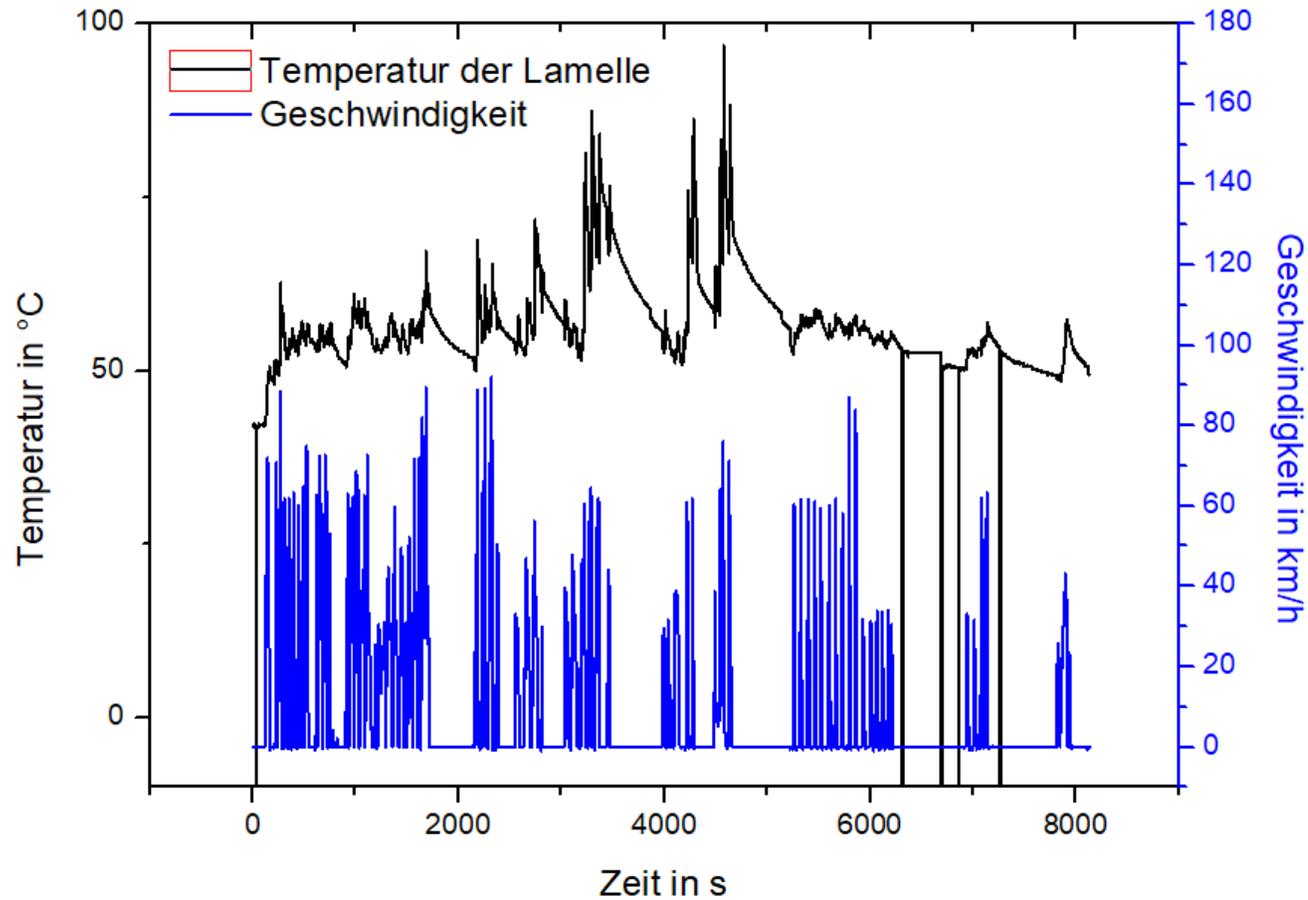
<https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/stuttgart/stuttgart-umweltfreundlichstes-auto-der-welt-100.html>

<https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/sendung-1930-uhr-vom-2892022-108.html> (SWR 28.09.2022. from minute 12:20)

[Roll-out ZEDU-1: emissionsfrei unterwegs in die Zukunft ohne Feinstaub und Mikroplastik](#)



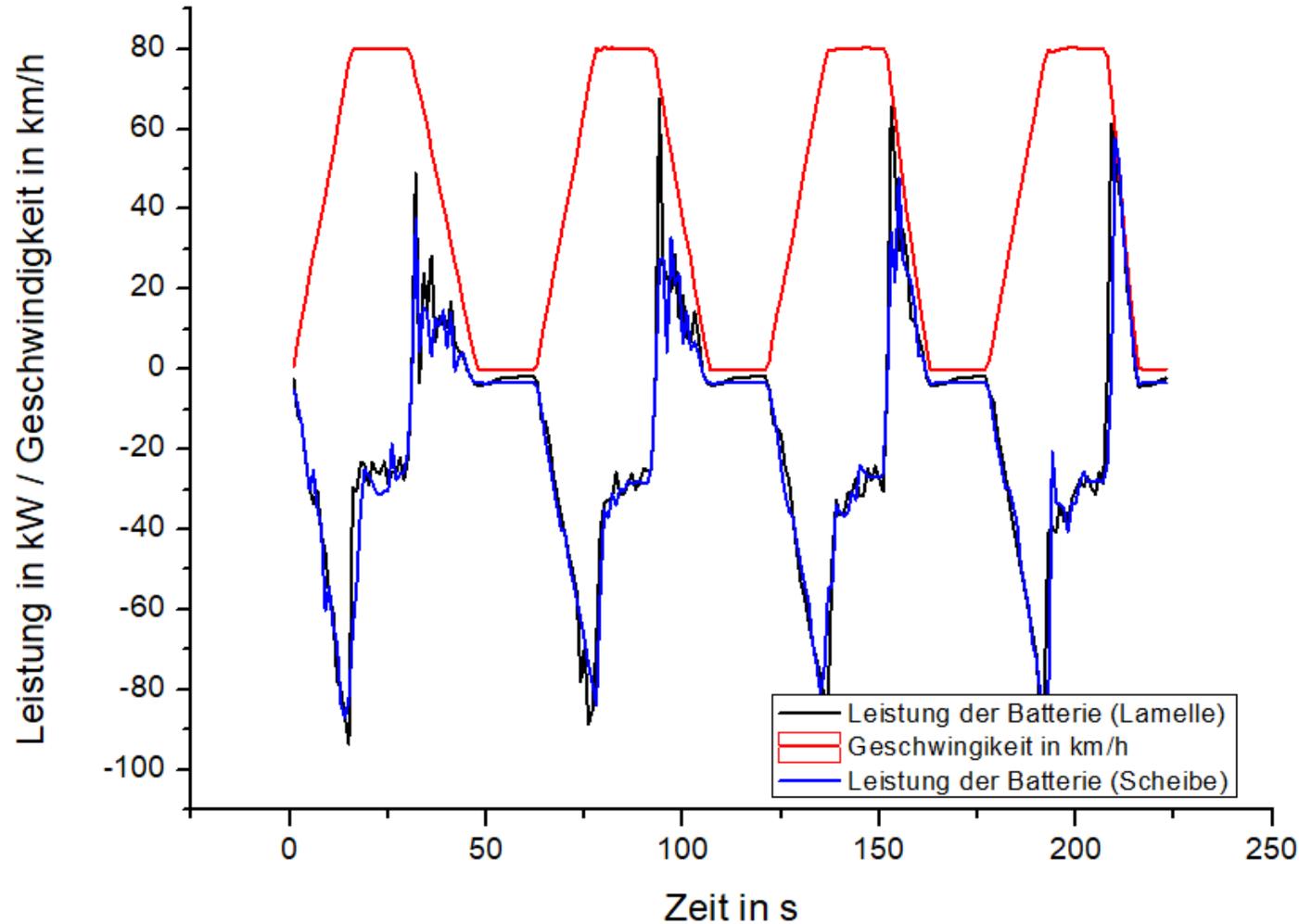
Charakterisierung Lamellenbremse



- Fahrprofil: alternierende Beschleunigungs- und Bremstests
- Bremstemperatur steigt nicht über 100 °C (Grenzwert 180 °C)
- Absolute Verzögerung überschreitet Haftungsgrenze der Reifen
- → Ausreichende Verzögerung und Kühlung der neu entwickelten Lamellenbremse



Technologie-Vergleich: Scheiben- und Lamellenbremse



- Lamellenbremse zeigt **vergleichbares Bremsverhalten** wie Scheibenbremse
- Keinen signifikanten Unterschied im **energetischen Verbrauch** der Bremssysteme



Zusammenfassung



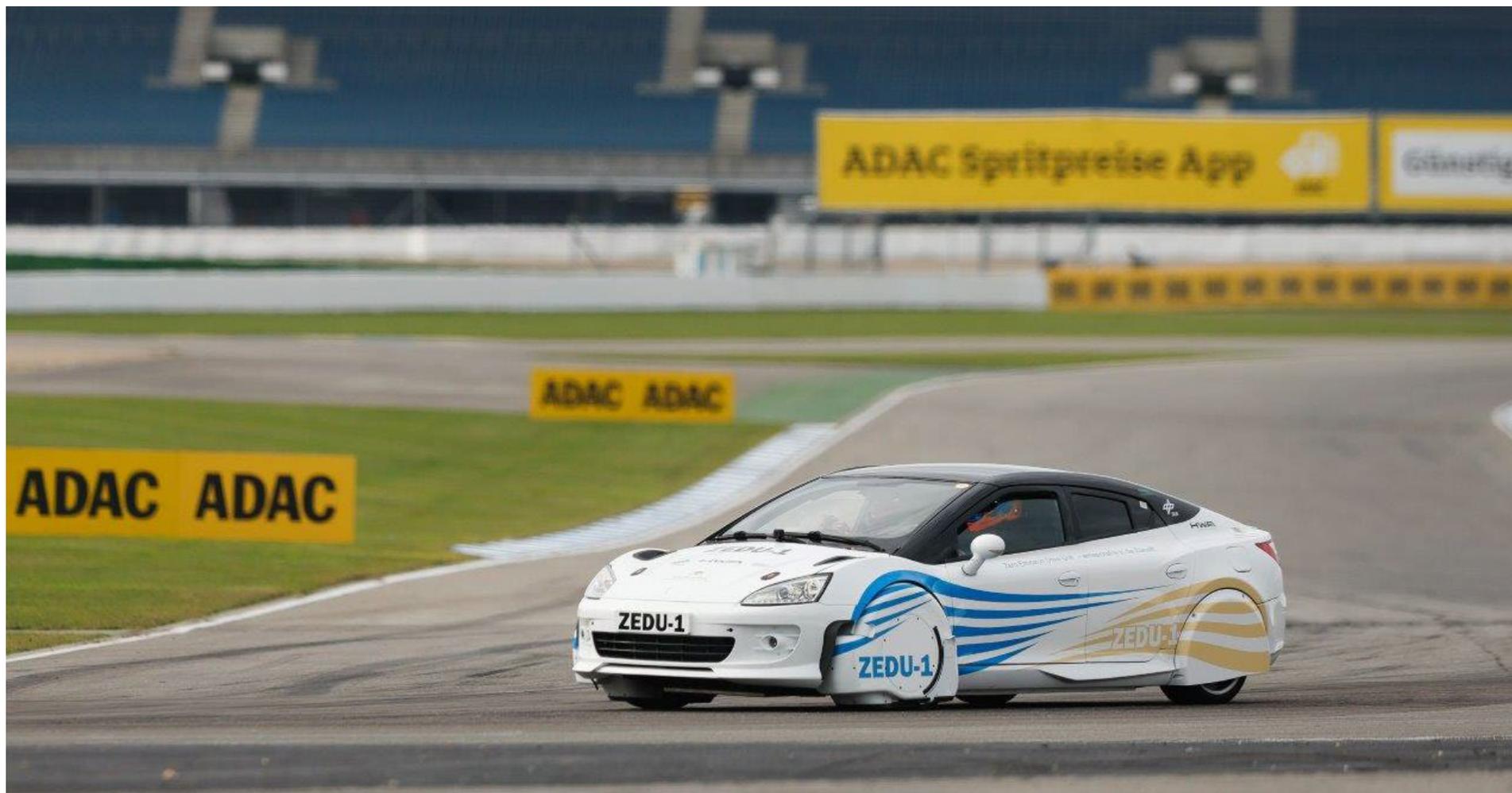
- Abgasemissionen sinken. Gleichzeitig steigen **Brems- und Reifenemissionen** (EU)
- Messung von Nicht-Abgaspartikeln – eine neue technologische Herausforderung (komplexes, dynamisches System)
- Der gezeigte on-board-Messaufbau:
 - bietet **verlustfreie, isokinetische** Probeentnahme
 - ist **geeignet** zur Bestimmung von Bremsabriebsemissionen auf einem Prüfstand und im realen Betrieb
 - => mögliches Konzept für **zukünftige RDE-Messungen** von Nicht-Abgasemissionen
- Für WLTC 3b, WLTC Brake 10 und reale Fahrten wurden Partikelverteilung und Konzentrationen im Bereich 4nm bis 10.000 nm (10 µm) gemessen
- Bremsabriebe sind nicht auf grobe mechanische Abriebe beschränkt, sondern Auch Quelle für feine und ultrafeine Partikel.
- Bremsabriebsemissionen auf dem Komponentenprüfstand unterscheiden sich stark von denen am Fahrzeug (vor allem im realen Betrieb) und spiegeln nicht die Komplexität des Systems wider.
- „**RDE-Messungen**“ am Fahrzeug - eine Schlüsselmethode für die Validierung von Nicht-Abgasemissionen in realen Szenarien
- Bisher wurden Messungen am Fahrzeug nur mit Verbrennern durchgeführt. Die Elektrifizierung der Fahrzeuge wirkt sich erheblich auf Bremsemission im realen Betrieb aus.
- Rekuperation => Reduktion der Emissionen um bis zu 90% (UFP)
- Hartmetall-Bremsbeschichtung -> Reduktion der Emissionen um bis zu 78,9% (80%)
- Lamellenbremse technisches Funktionsprinzip im Fahrzeugeinsatz (Demonstrator) nachgewiesen



LUFTREINHALTUNG

The image is a composite background. In the foreground, a man in a purple shirt carries a young child in a green shirt through a field of tall, golden-brown grass. In the middle ground, a multi-lane road is filled with a line of cars, including a white SUV in the immediate foreground. In the background, a factory or industrial facility is visible, with a large, billowing plume of white smoke or steam rising into the sky. The overall lighting is warm and golden, suggesting a sunset or sunrise.

Vielen dank für Ihre Aufmerksamkeit



Vielen dank für Ihre Aufmerksamkeit



Find ZEDU-1 at: DLR-Portal:
Ntv PS Automagazine:
SWR-Stuttgart:
SWR-Landesschau:
YouTube:

[ZEDU-1: Das im Betrieb umweltfreundlichste Auto der Welt - DLR Portal](#)
[Was steckt im "umweltfreundlichsten Auto der Welt"? - n-tv.de](#)
<https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/stuttgart/stuttgart-umweltfreundlichstes-auto-der-welt-100.html>
<https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/sendung-1930-uhr-vom-2892022-108.html> (SWR 28.09.2022. from minute 12:20)
[Roll-out ZEDU-1: emissionsfrei unterwegs in die Zukunft ohne Feinstaub und Mikroplastik](#)

