

Zero Emission Drive Unit

Übersicht der Bremskonzepte

Franz Philipps, Linda Bondorf, und Sven Reiland



XL μ -Symposium
27.10.2023 Chemnitz



Agenda

1

Übersicht

Problemstellung
EU-Luftreinheitsrichtlinie
Euro 7

2

ZEDU1

Motivation & Ansatz
Partikelmesstechnik
Konzepte Bremse
Versuchsfahrzeuge

3

Prüfeinrichtungen

Messkonzepte
Messtechnik
Prüfstände
Fahrprofile

4

Messergebnisse

Graugussbremse
HM-Beschichtung
Rekuperation



WHO: † 9Mil. Menschen/a weltweit (~ 30.000 in Deutschland)

UBA: 8.000 -15.000 t/a Feinstaub – 1/3 aus Bremsabrieben

UBA: 110.000 t/a Mikroplastik – 1/4 aus Reifenabrieben

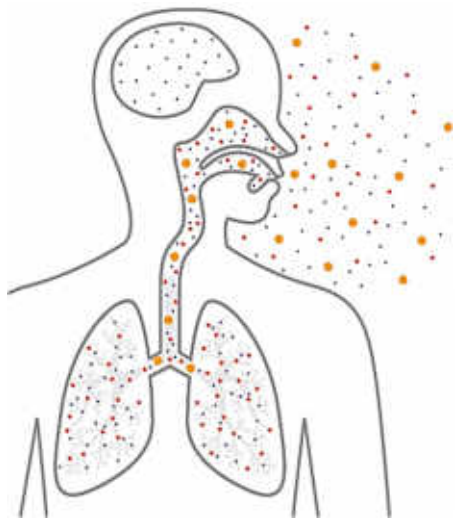
Lebenszeitverkürzung durch Feinstaub?

EU: Euro 7 – Limitierung der Bremsabriebe ab **2025**

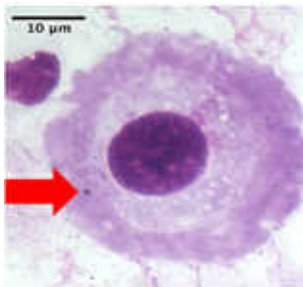
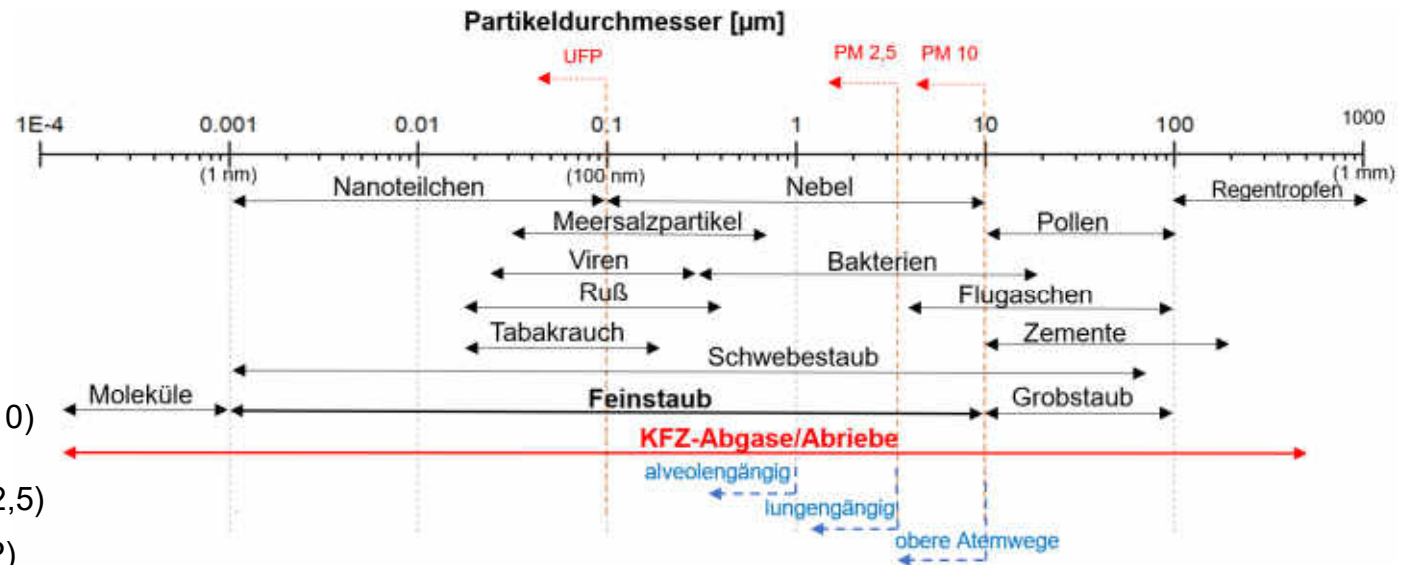
EU: Luftqualitätsrichtlinie ab dem 1 Januar **2030**

EU: Nullverschmutzung bis **2050**

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).

Feinstaubpartikel und insbesondere Ultrafeinpartikel (UFP):

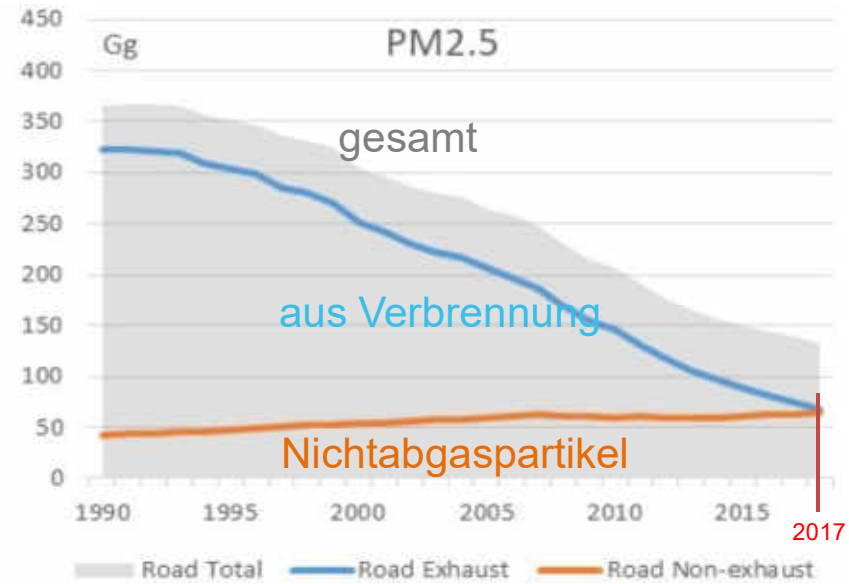
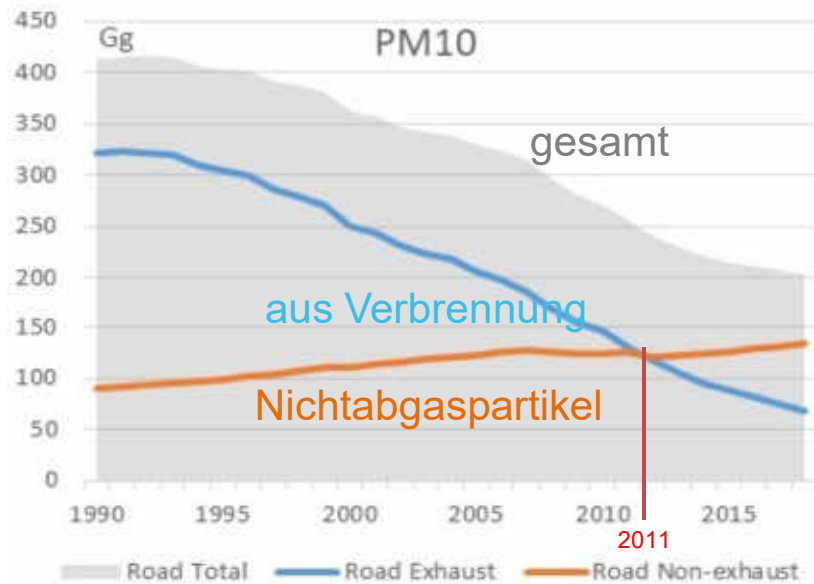
- dringen tief in die Lunge ein bis in die Alveolen, Lungengewebe und Blutkreislauf
- Betrifft alle Organe
- haben eine große (aktive) Oberfläche
- bleiben lange in der Luft (Aerosole)
- Quelle des oxidativen Potentials

⇒ **Gesundheitsrisiko**

⇒ **Angaben PM₁₀ und PM_{2,5}: unzureichender Bezug zu biologischen Wirksamkeit**



Relevanz von Nicht-Abgasemissionen im Straßenverkehr in der EU



Quelle: Eionet Report - ETC/ATNI 2020/5

Feinstaub in Deutschland:

- Gesamt: ca. 220.000 t/a
- Verkehr: ca. 30.000 t/a (~14 % - 32%)
 - aus Reifenabrieben: ca. 14.000 t/a
 - aus Abgasen: ca. 7.000 t/a
 - aus Bremsabrieben: ca. 8.000 - 15.000* t/a (~ 90 % davon Ultrafeinstaub)

Quelle: diverse Studien: * Werte haben je nach Studie große Streuung



Neue EU-Richtlinien für Luftschadstoffe

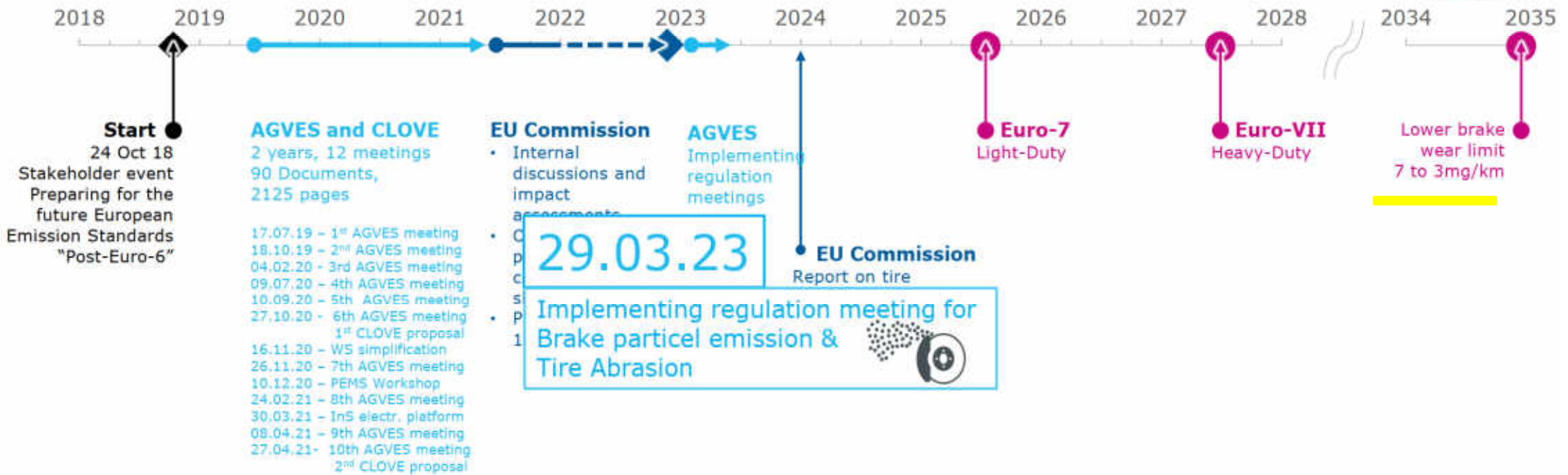
- Grenzwerte für Schadstoffe werden ab **2030** verschärft
- Neue EU-Leitlinien für Luftqualitätsstandards:
 - Luftqualitätsrichtlinie:
 - für PM_{2,5}: 10 µg/m³ (Bedeutet: Verringerung um den Faktor 2,5 in 7 Jahren)
 - für PM₁₀: 20 µg/m³ (Bedeutet: Verringerung um den Faktor 2 in 7 Jahren)
 - Regelmäßige Überprüfung der Luftqualitätsnormen.
 - Laufende Neubewertung anhand wissenschaftlicher Erkenntnisse und gesellschaftlicher und technischer Entwicklungen
 - ⇒ Laufende Verbesserung der Umsetzung
 - Erreichen von **Null**-Luftverschmutzung bis spätestens **2050**.

Quellen :

- [Revision EU ambient air quality legislation \(europa.eu\)](https://european-council.europa.eu/media/eu-amb-air-quality-legislation)
- [Commission proposes rules for cleaner air and water \(europa.eu\)](https://european-council.europa.eu/media/commission-proposes-rules-cleaner-air-water)
- [Luftreinhaltung in der EU | Umweltbundesamt](#)



Euro-7/VII – Implementierung



AGVES = Advisory Group Vehicle Emission Standards
CLOVE = Consortium for Low Vehicle Emissions



ZEDU1

Neckartor

PROJEKT ZEDU1



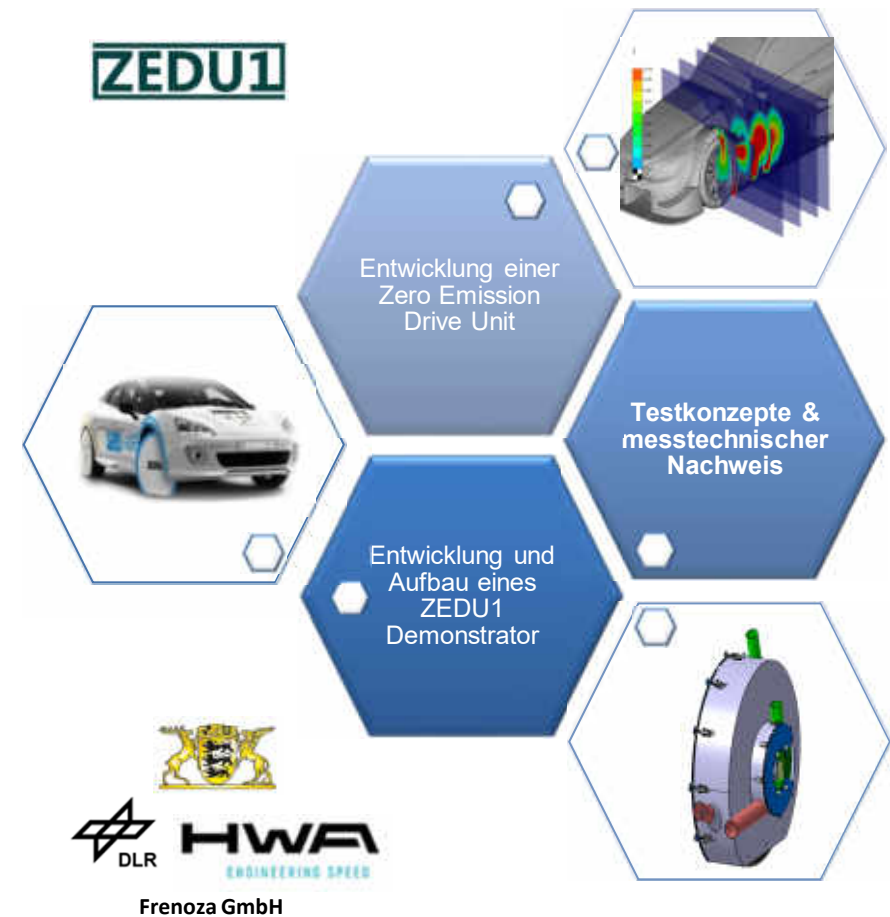
Mikroplastik

Euro 7



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



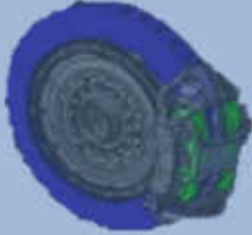

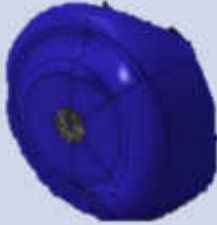


ZEDU-1

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

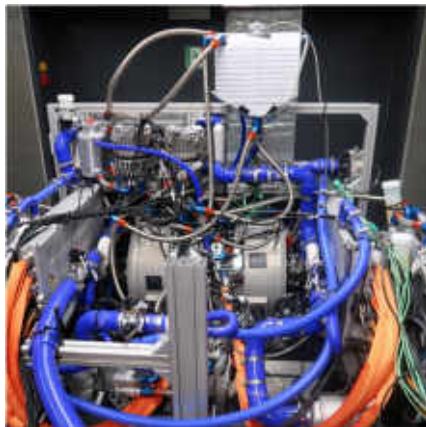
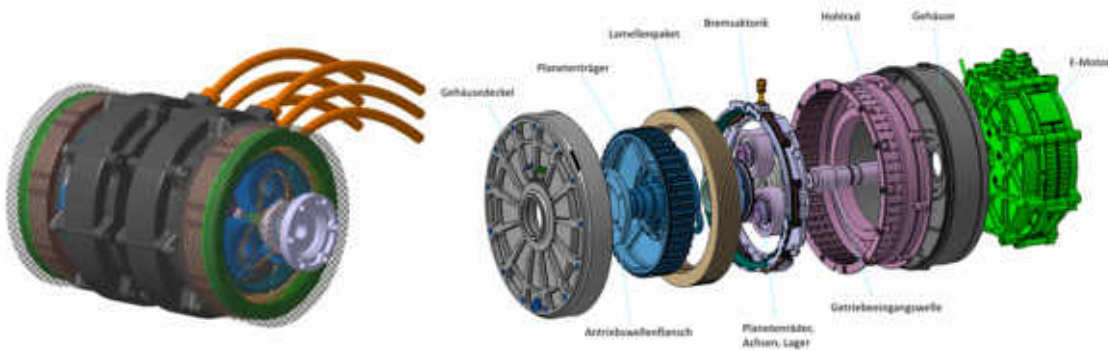


Konzepte Bremse

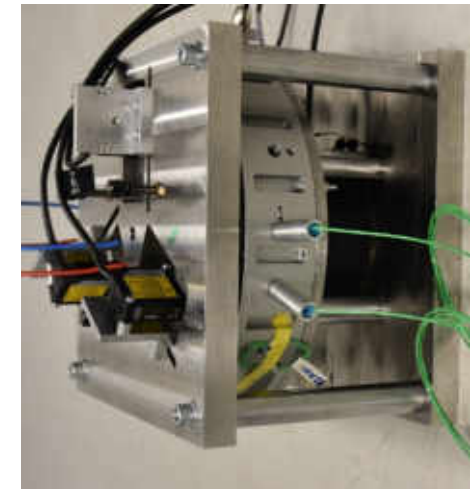
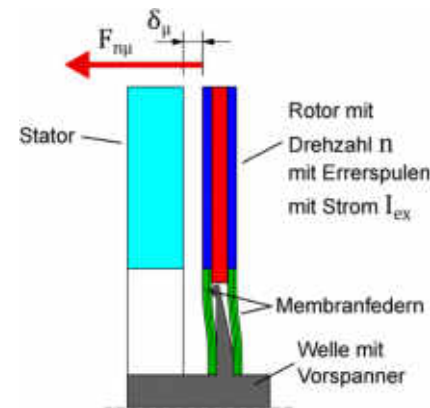
Kriterium	Konzept1	Konzept2	Konzept3	Konzept4	Konzept5
Darstellung					
Beschreibung	Beschichtung	Filter zusätzlich	gekapselt	Lamellenbremse	Induktionsbremse
Grad der Emissionsvermeidung	teilweise ---	teilweise ---	vollständig +++	vollständig +++	vollständig ++
Entwicklungsaufwand	++	+	-	+	---
Entwicklungsrisiko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



Entwicklung Bremse








Lamellenbremse: Packaging, Explosionszeichnung und Prüfstands Aufbau

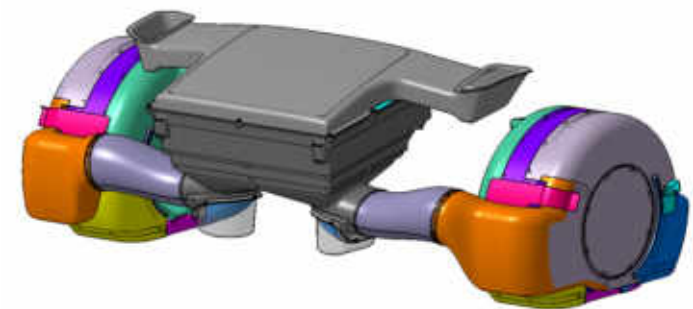
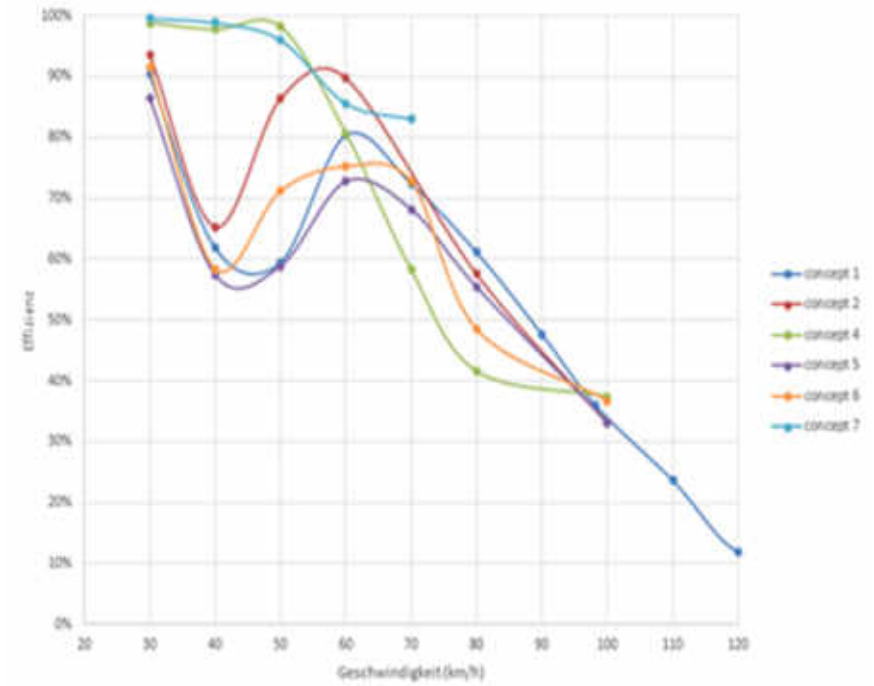
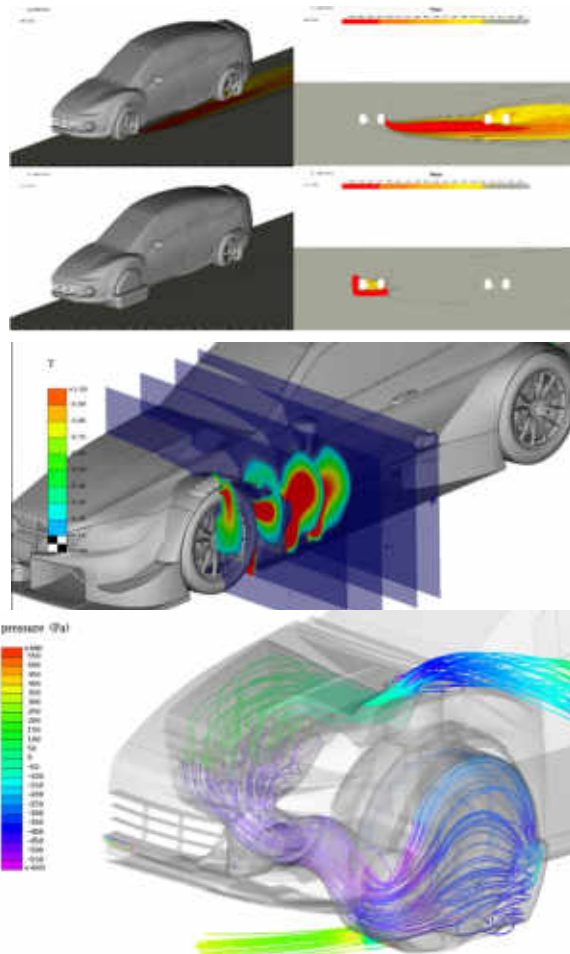


Induktionshybridbremse: Explosionszeichnung, Funktion und Prüfstands Aufbau



Konzepte Reifenemissionen

Bild	Gesamt
	+
	0
	0
	+
	+++



Reifenabriebsabsorptionskonzepte: Strömungsverteilung, Absorptionseffizienz (ν) und Konstruktion



Versuchsfahrzeuge

Referenzfahrzeug zur Bestimmung der Partikelemissionen derzeitiger Elektrofahrzeuge



BMW i3

- 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



ZEDI-1: Demonstrator



Test auf dem DLR-Rollenprüfstand



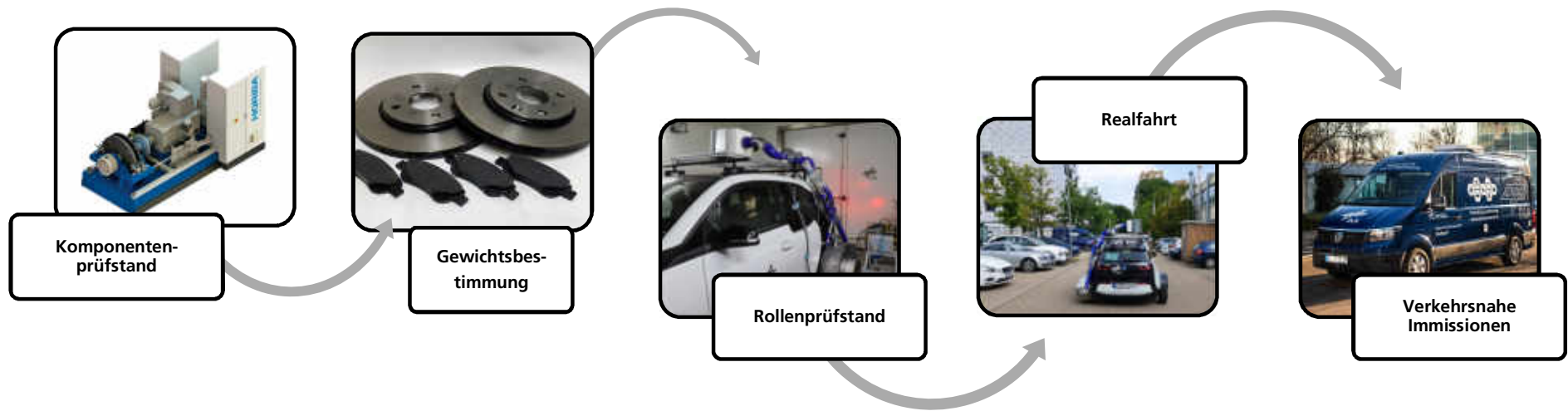
[Roll-out ZEDUI-1 am 2022.09.28 in Stuttgart mit Ministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut](#)



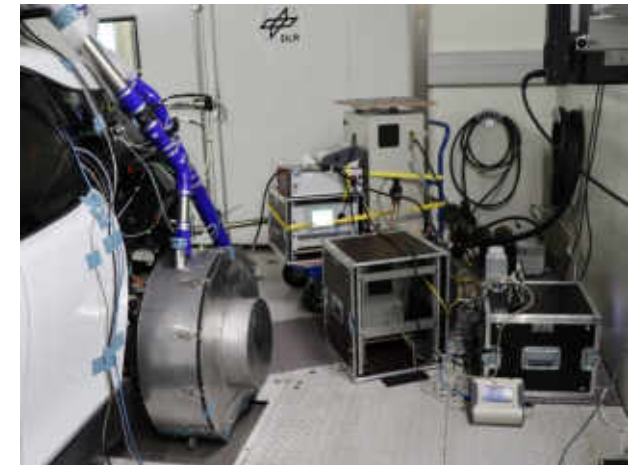
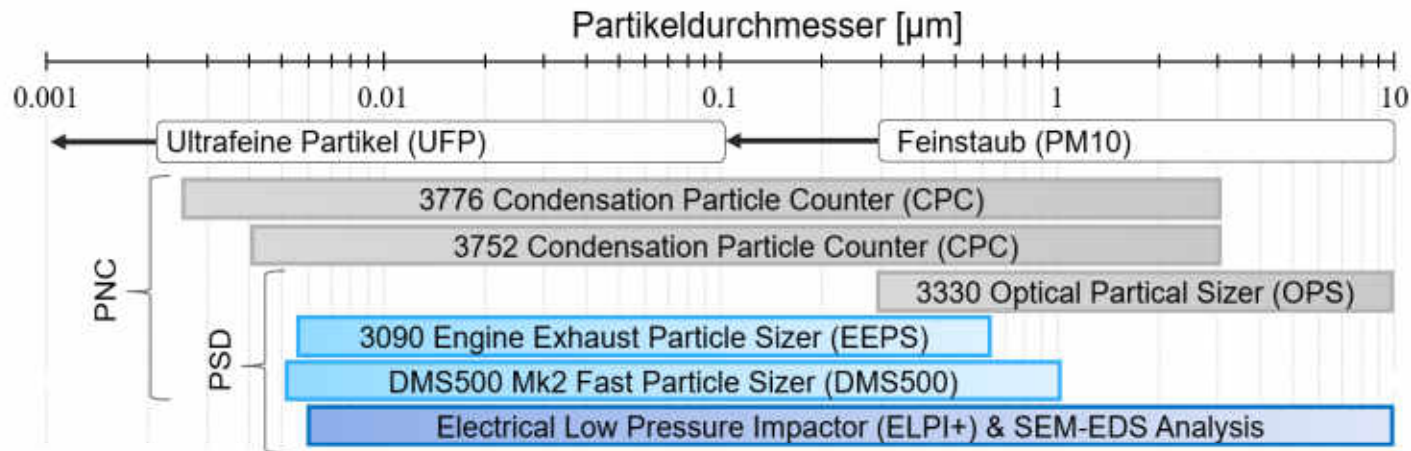
MESSKONZEPTE & SETTINGS



Messkonzept Bremse



Partikelmesstechnik



Lichtstreuung

CPC OPS

Elektromobilität

EEPS DMS500

Impaktor & Mikroskopie

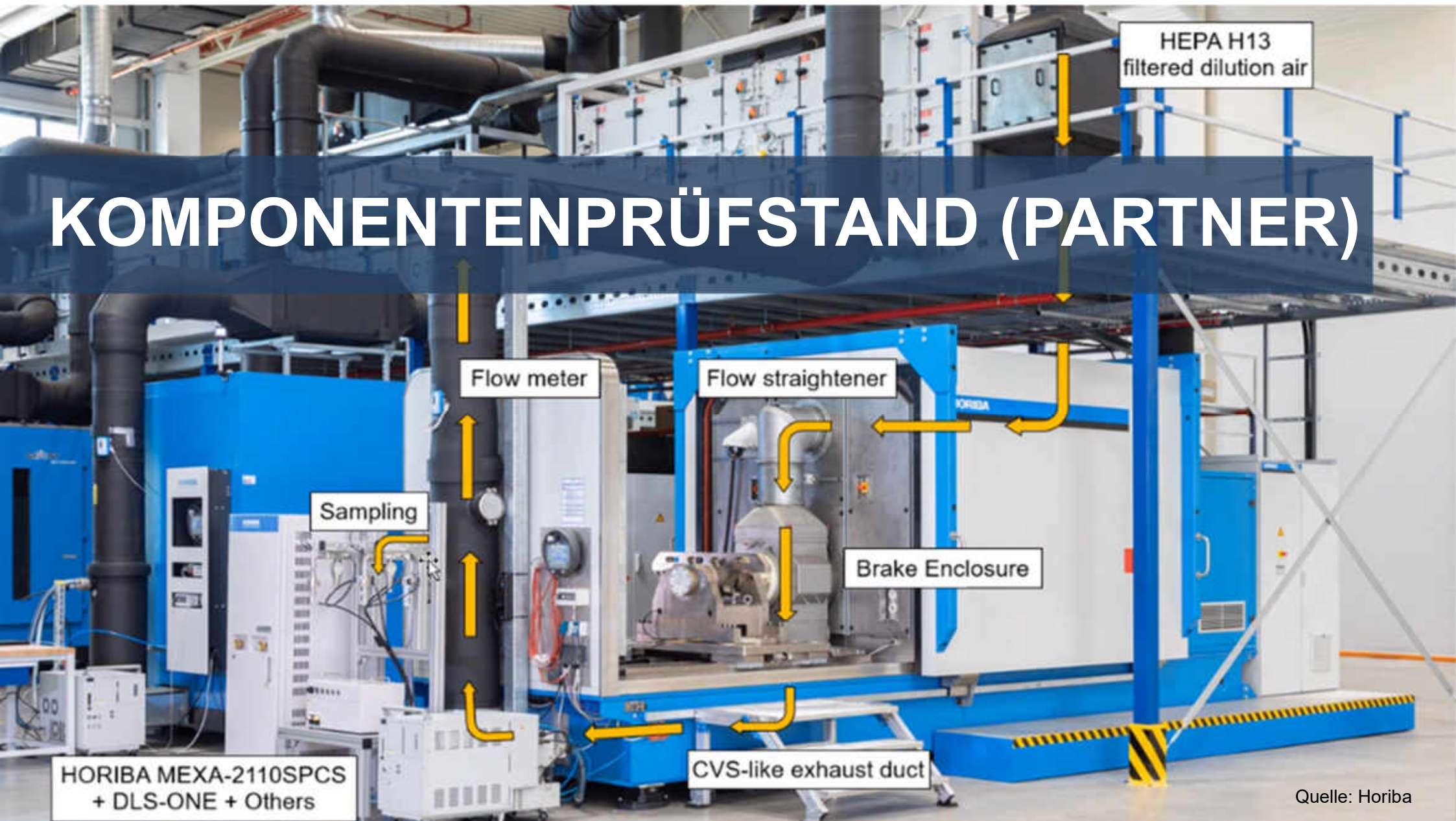
ELPI+ SEM-EDS

Charakterisierung der Emissionen:

- Partikelanzahlkonzentration
- Größenverteilung
- Morphologie
- Elementare Zusammensetzung

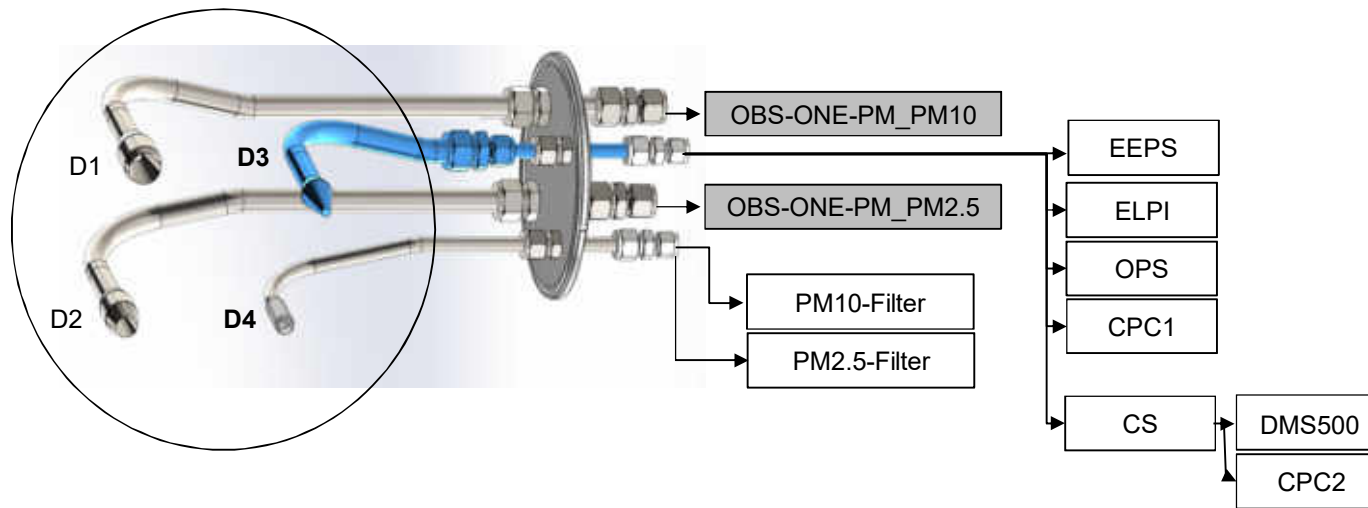


KOMPONENTENPRÜFSTAND (PARTNER)



Quelle: Horiba

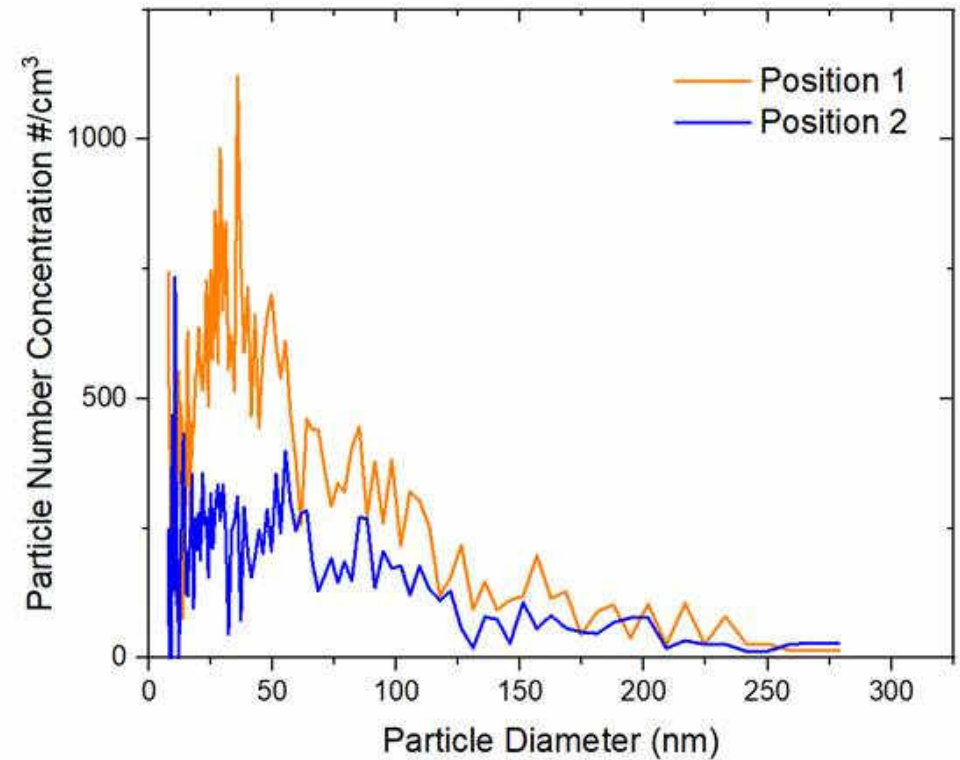
Testaufbau – Komponentenprüfstand



- Probe-Entnahmesonden D1 bis D4
- Partikelanzahlkonzentration (CPC1, CPC2)
- Partikelanzahlgrößenverteilung (EEPS, DMS500)
- Vergleich volatile und nicht-volatile Partikel
- Partikelsammlung für Offline-Analyse (ELPI, PM₁₀, PM_{2.5})
- Gravimetrische Messung durch HORIBA (Filter, PM₁₀, PM_{2.5})



Komponentenprüfstand: Verlustkalibrierung



Position 1 des Partikelgenerators (Salzpartikel) im Versuchsraum

- Position 2: Messstelle (blau)
- Verlustmessungen im Größenbereich zwischen 9 nm und 250 nm.
- Verlustmaximum: bei 30 nm.
- Verluste zwischen 50,1 % und 49,9 % im Mittel (ca. 50%)

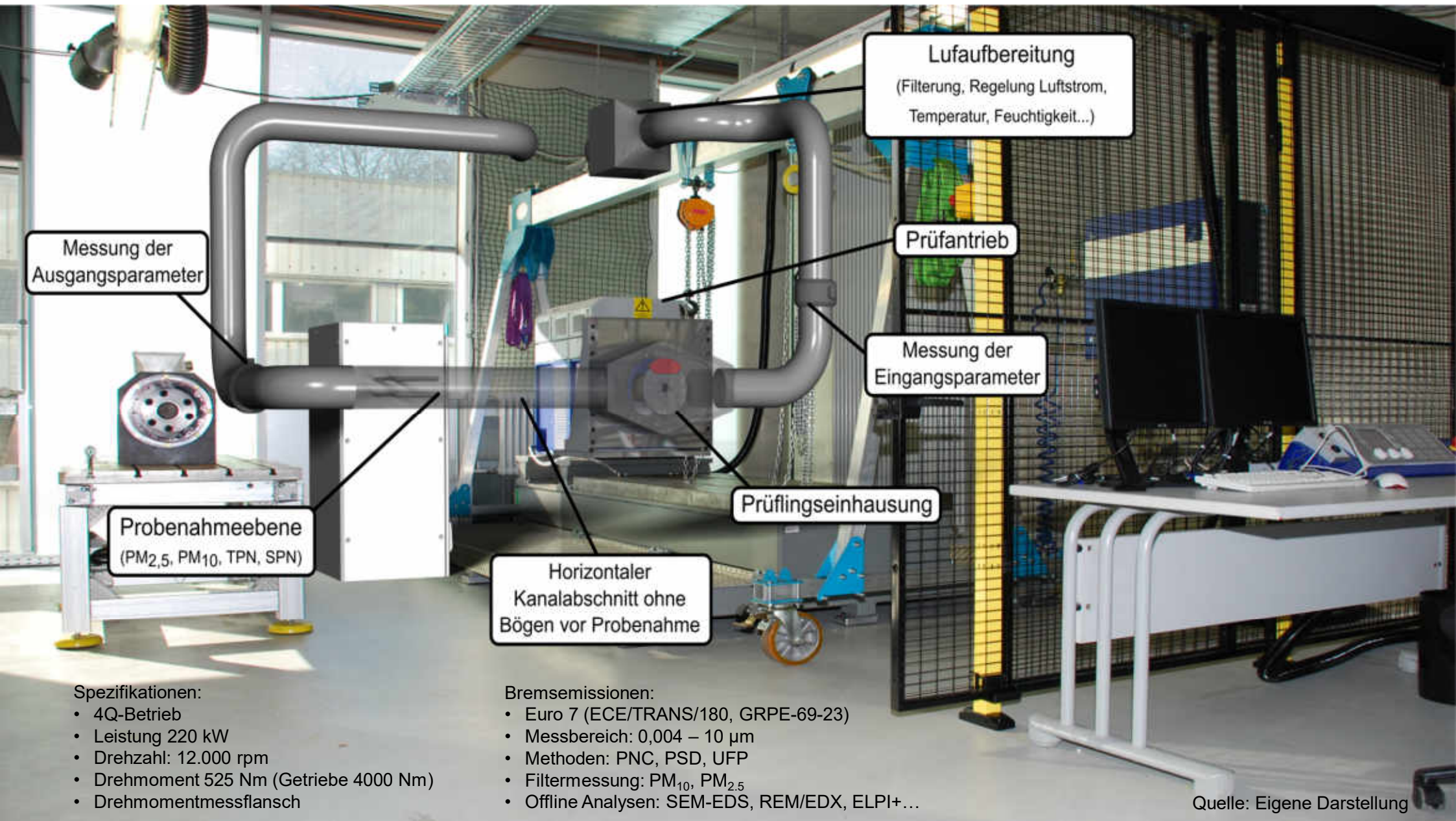




KOMPONENTENPRÜFSTAND DLR

Fertigstellung Erweiterung:
Anfang 2024

Quelle: Eigene Darstellung



Messung der Ausgangsparmeter

Luftaufbereitung
(Filterung, Regelung Luftstrom, Temperatur, Feuchtigkeit...)

Prüfantrieb

Messung der Eingangsparmeter

Prüflingseinhausung

Horizontaler Kanalabschnitt ohne Bögen vor Probenahme

Probenahmeebene
(PM_{2,5}, PM₁₀, TPN, SPN)

- Spezifikationen:
- 4Q-Betrieb
 - Leistung 220 kW
 - Drehzahl: 12.000 rpm
 - Drehmoment 525 Nm (Getriebe 4000 Nm)
 - Drehmomentmessflansch

- Bremsemissionen:
- Euro 7 (ECE/TRANS/180, GRPE-69-23)
 - Messbereich: 0,004 – 10 µm
 - Methoden: PNC, PSD, UFP
 - Filtermessung: PM₁₀, PM_{2,5}
 - Offline Analysen: SEM-EDS, REM/EDX, ELPI+...

Quelle: Eigene Darstellung

BREMSENTESTS - FAHRZEUG



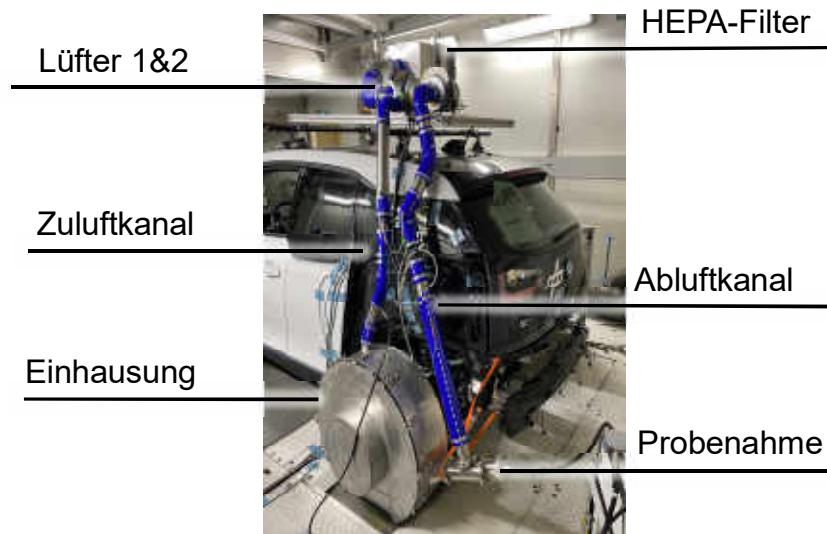
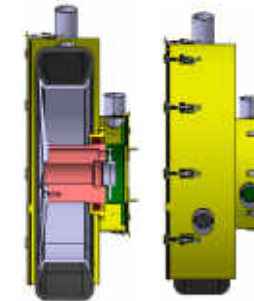
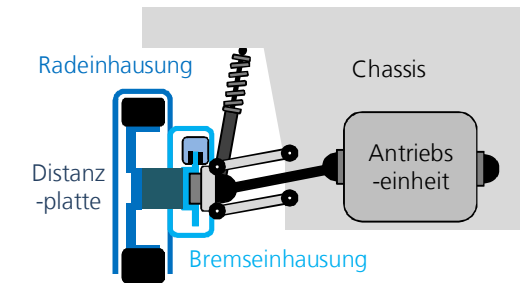
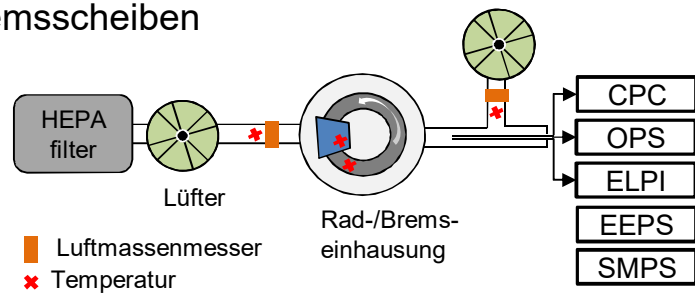
Messkonzept Referenzfahrzeug

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
- Originalbremsscheiben & beschichtete Bremsscheiben



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.

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)

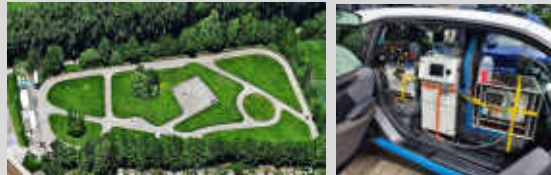


Messszenarien Referenzfahrzeug

Rollenprüfstand



Testgelände



Realfahrten (RDE, Straße)



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



MESSEERGEBNISSE (EXEMPLARISCH)



Bremsen

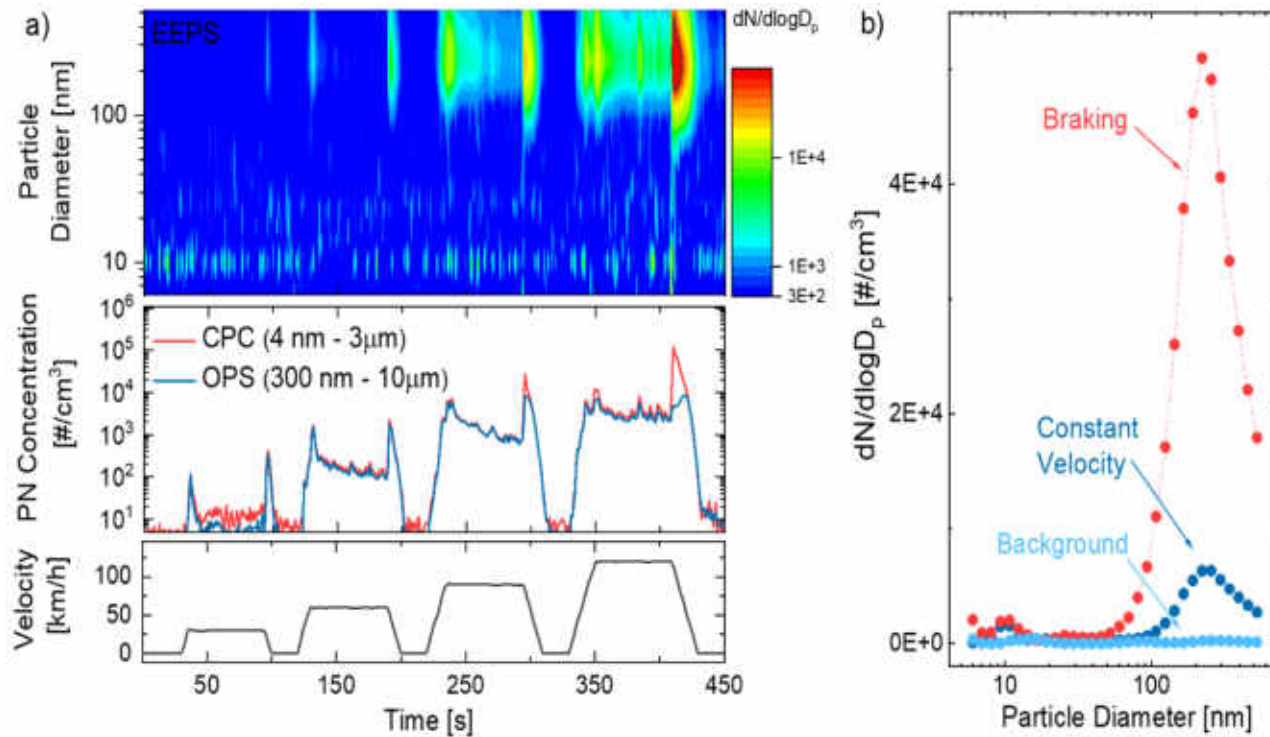
Bremse	WLTC Class 3	WLTC Brake Part 10	Realfahrt RDE/Testgelände	ZEDU-Accelerate	Rekuperation	Gewichtsbestimmung
Grauguss	✓	✓	✓	✓	✓	✓
HM-Beschichtet	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Induktion (Hybrid)				✓		
Lamellenbremse	✓		✓	✓		





KONVENTIONELLE BREMSE

Charakterisierung der Bremspartikelemissionen für Beschleunigung, konstante Geschwindigkeit und Bremsen (ZEDU Brake Zyklus)

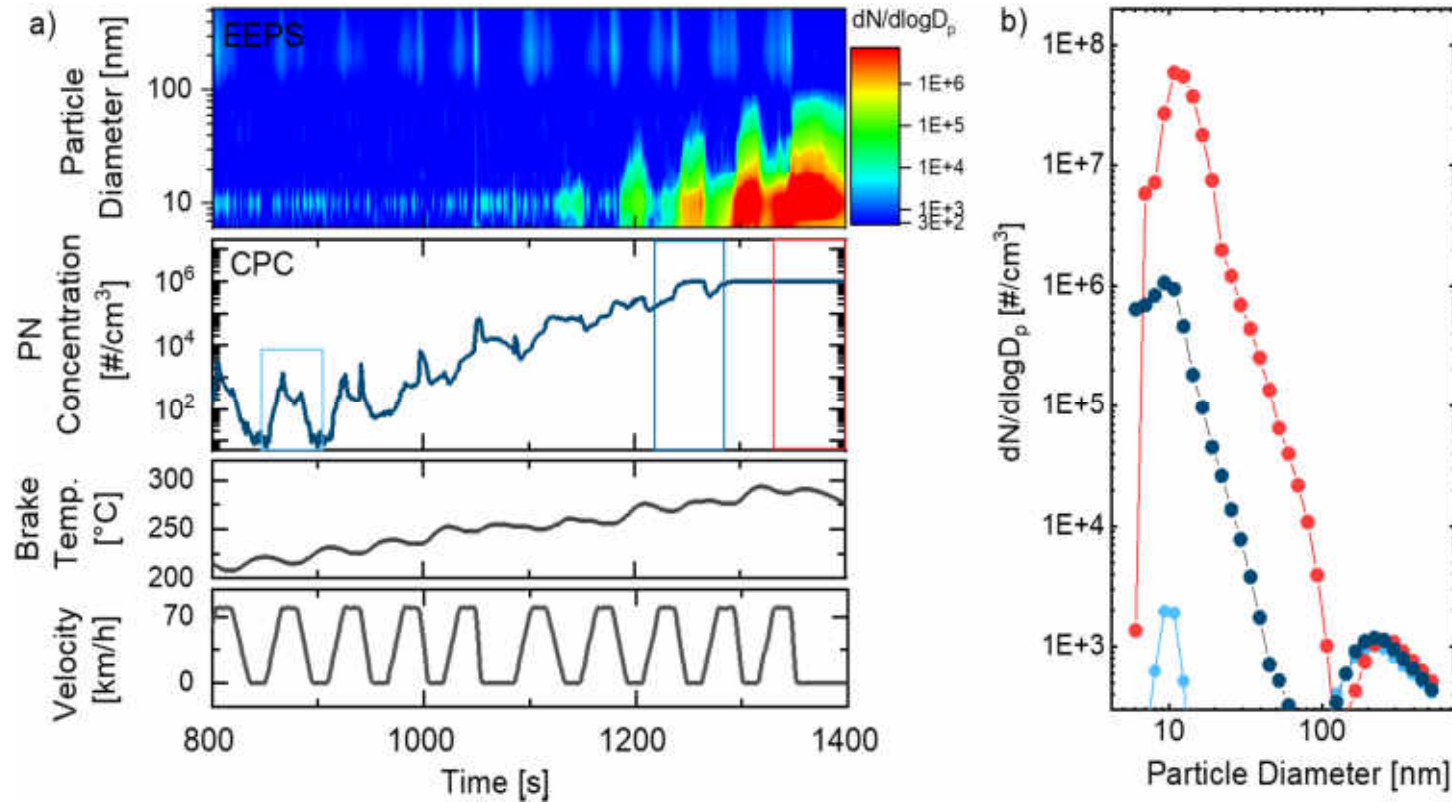


a) Partikelgrößenverteilung (EEPS) sowie die Partikelanzahlkonzentration (CPC und OPS Messung)

b) Größenverteilung der Partikelemission (EEPS) für verschiedene Fahrsituationen: konstante Geschwindigkeit von 120 km/h, Bremsvorgang und Hintergrund.



Charakterisierung der Partikelemissionen bei hohen Brems Temperaturen (ZEDU Accelerate Zyklus)

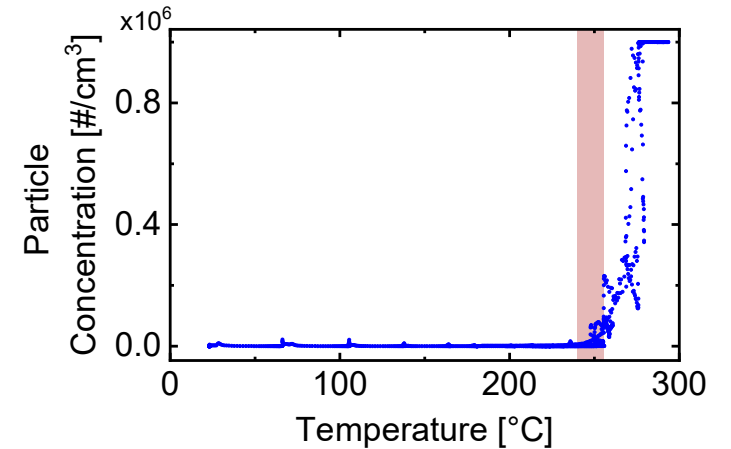
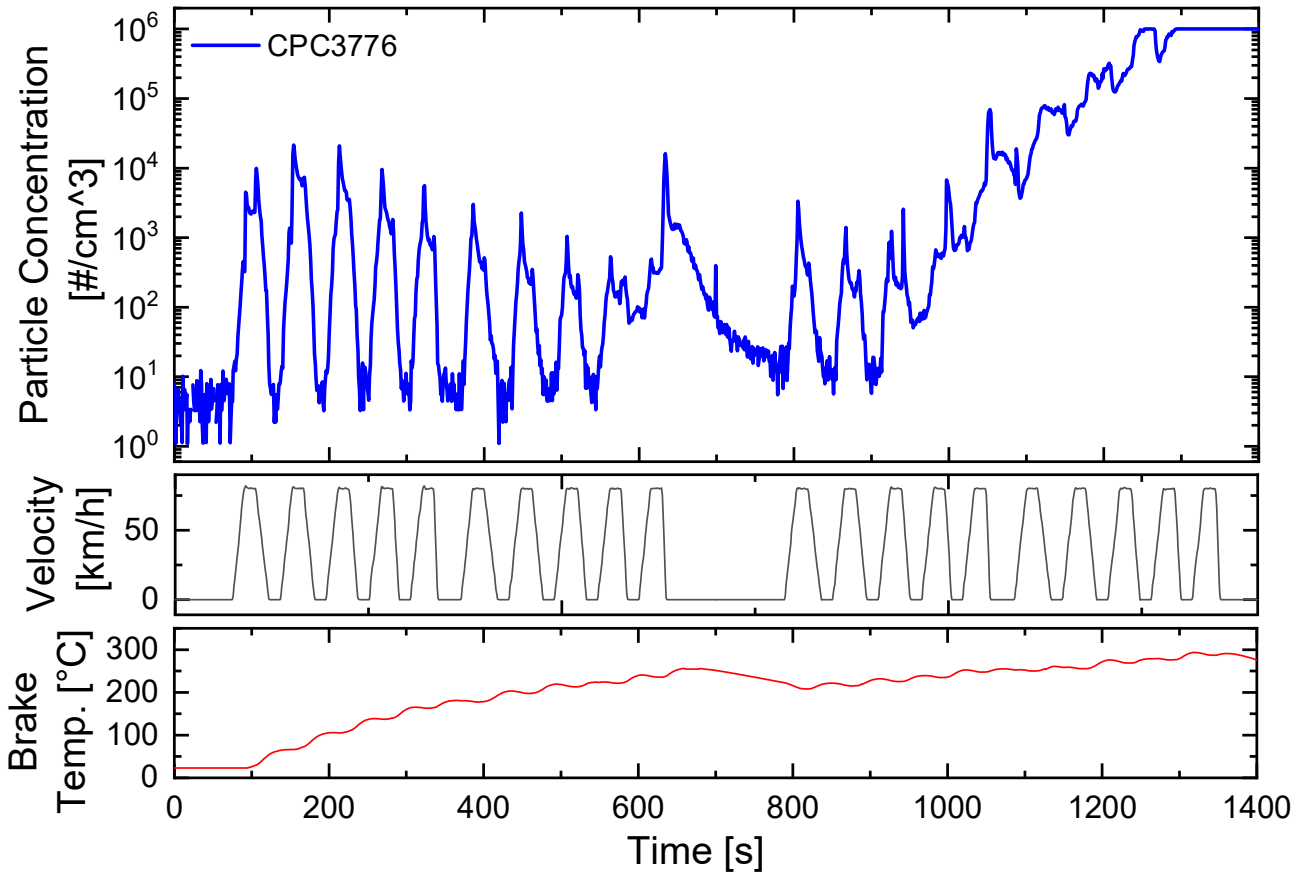


a) Partikelanzahlkonzentration und Partikelgrößenverteilung mit CPC bzw. EEPS gemessen .

b) Größenverteilung der Partikel unterschiedliche für Brems Temperaturen (EEPS). Der gemittelte Zeitraum ist farblich gekennzeichnet.



Bremsemissionen – Bremstemperaturen

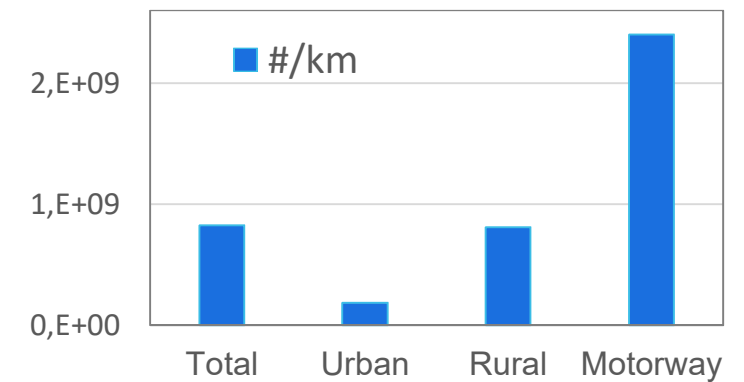
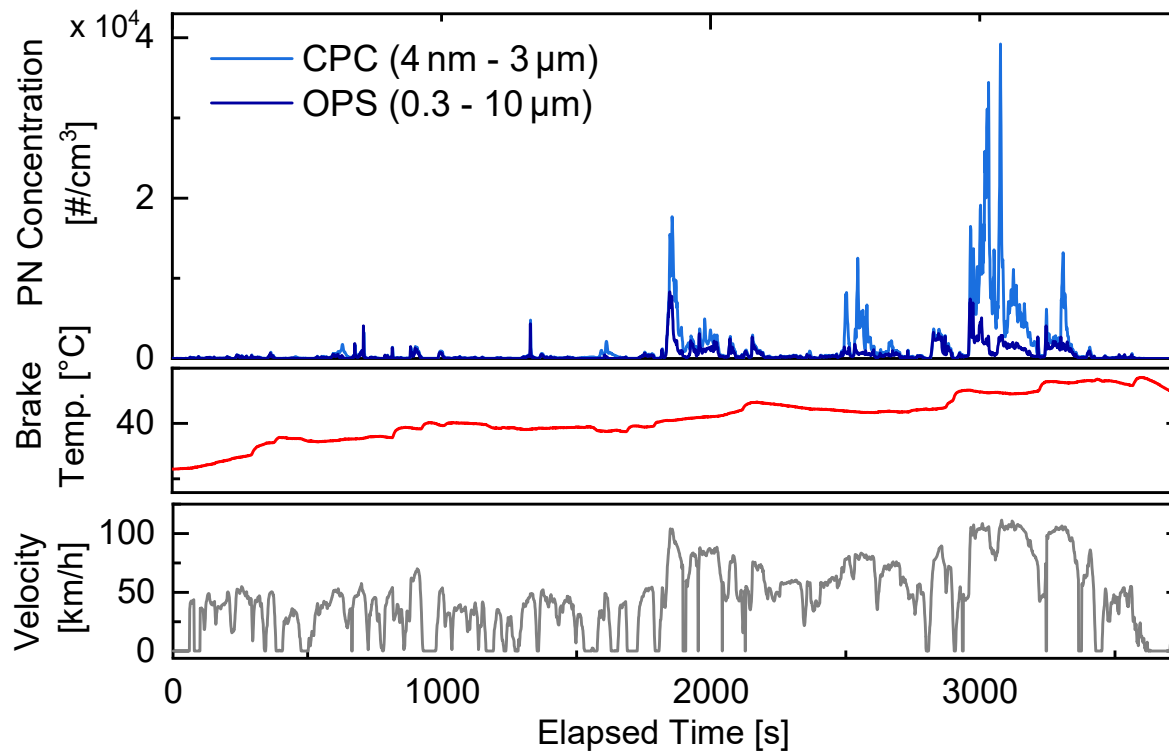


- Grenztemperatur liegt bei ca. 240°C
- Exponentieller Anstieg oberhalb der Grenztemperatur



Bremsemissionen – RDE Stuttgart

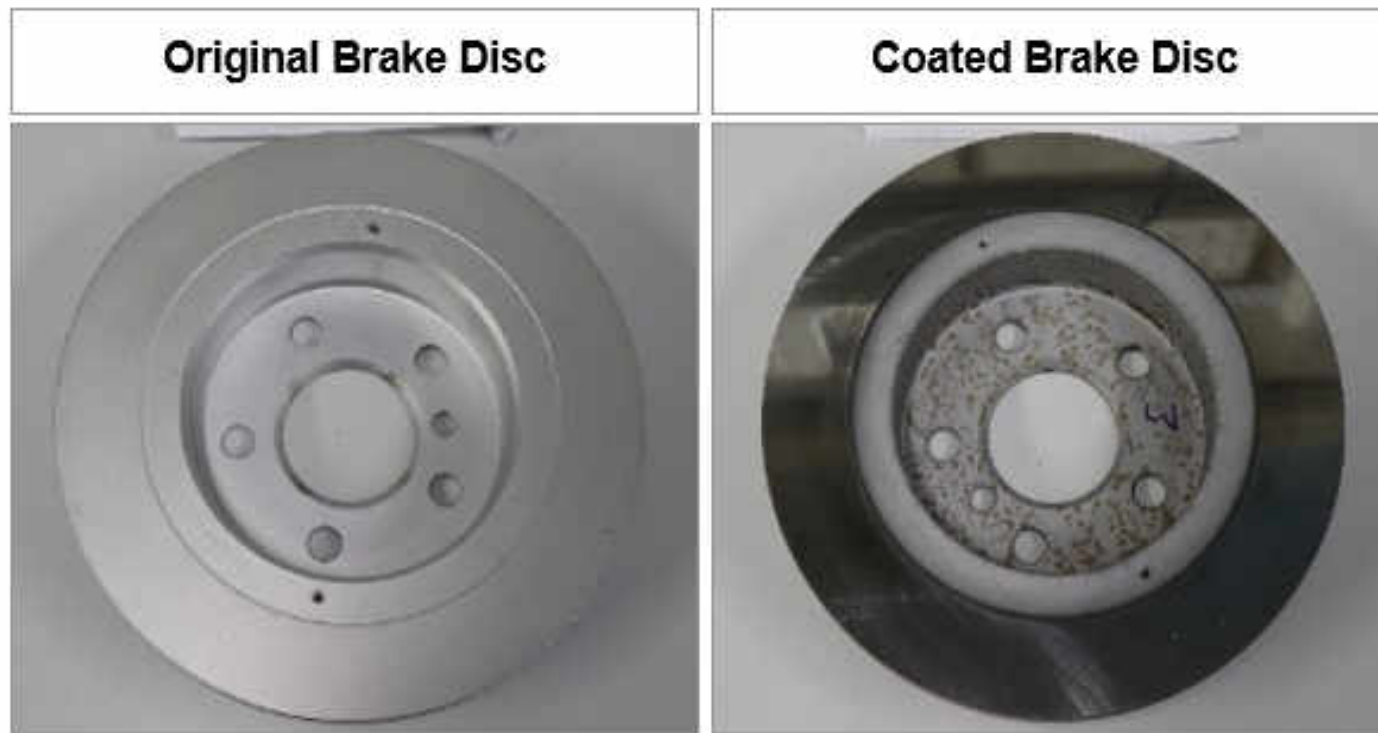
Straßenfahrt: Wie sind die Partikelemissionen unter realistischen Bedingungen?



HM-BESCHICHTETE BREMSE



Original Bremsscheibe (Guss) und Bremsscheibe mit Hartmetall Beschichtung



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

Massenverlust – Standardbremse vs. Beschichtete Bremse (diverse Profile)

Abgeriebene Masse pro 100 km:

Standardbremse:

0,77 g

Anteil Scheibe: 63 %

Beschichtete Bremse:

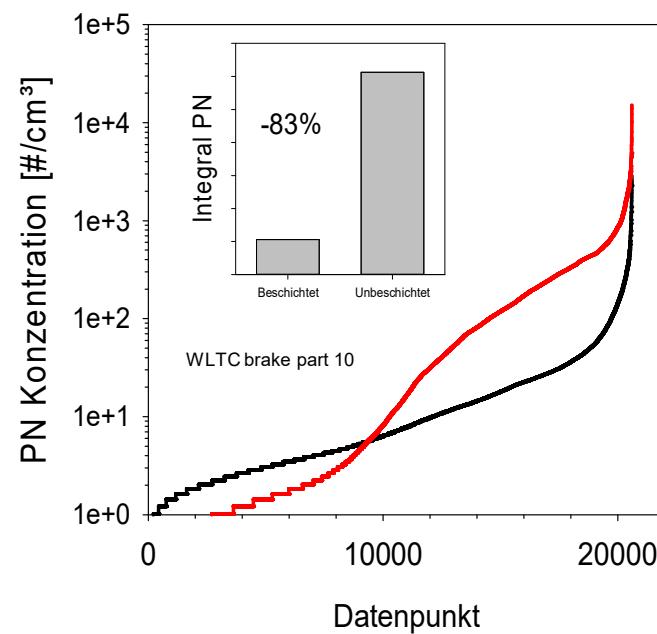
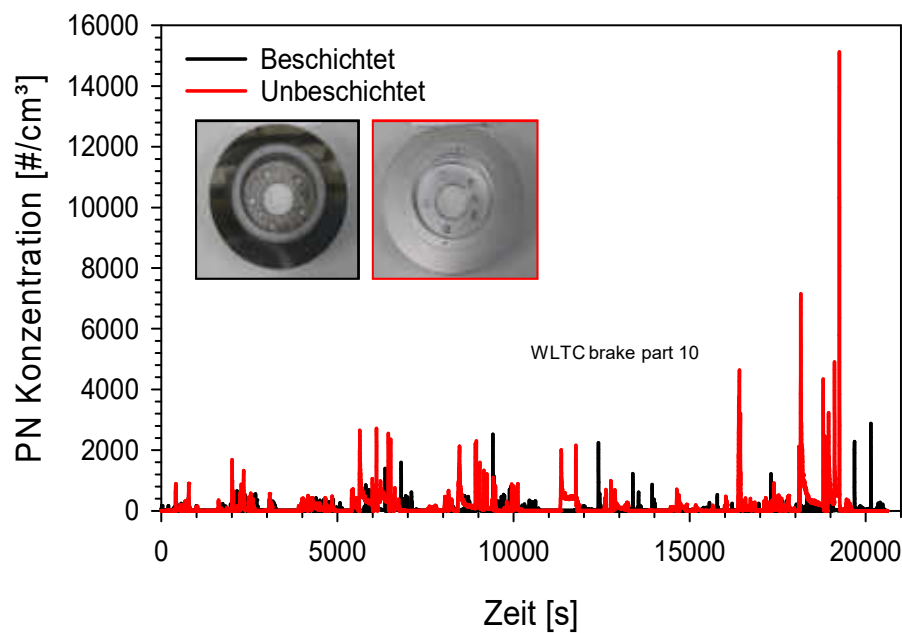
0,20 g

Anteil Scheibe: 58 %

- 74 %



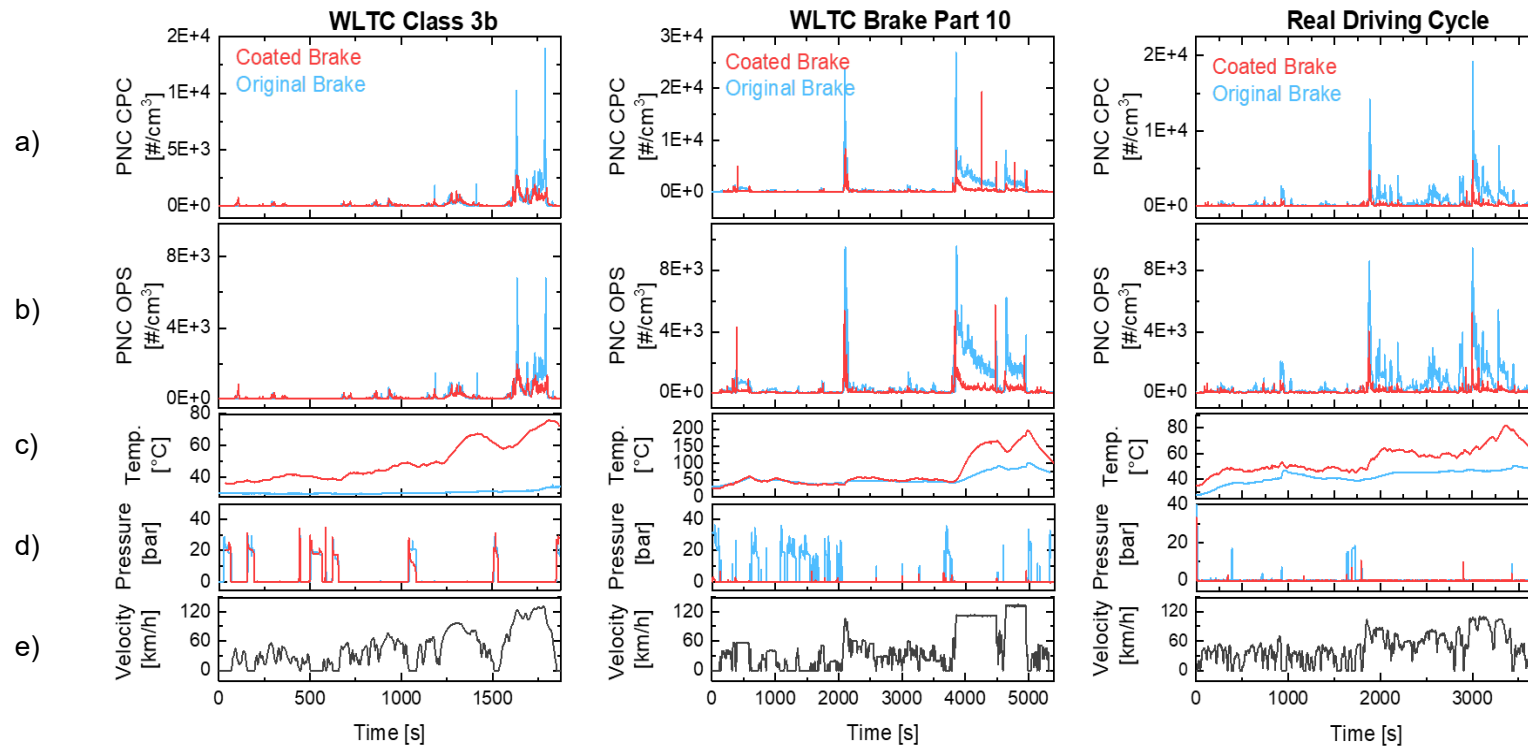
Bremsemissionen am Komponentenprüfstand: Einfluss der Beschichtung



- Beschichtung sorgt für deutliche Reduktion der Partikelemissionen (bis zu 83% WLTC brake)



Partikelemissionen Original- und beschichteten Bremsscheibe für unterschiedliche Fahrzyklen.



- a) Partikelzahlkonzentration von (Ultra-)feine Partikeln mit Durchmesser zwischen 4 nm und 3 µm (gemessen mit CPC)
- b) Konzentration größerer Partikeln zwischen 300 nm und 10 µm (gemessen mit OPS).
- c) Temperatur der Bremse
- d) Druck der hydraulischen Bremse
- e) korrelierte Geschwindigkeit des Fahrzeugs.



Bremspartikelemissionen und Emissionsreduktion durch Hardmetallbeschichtung

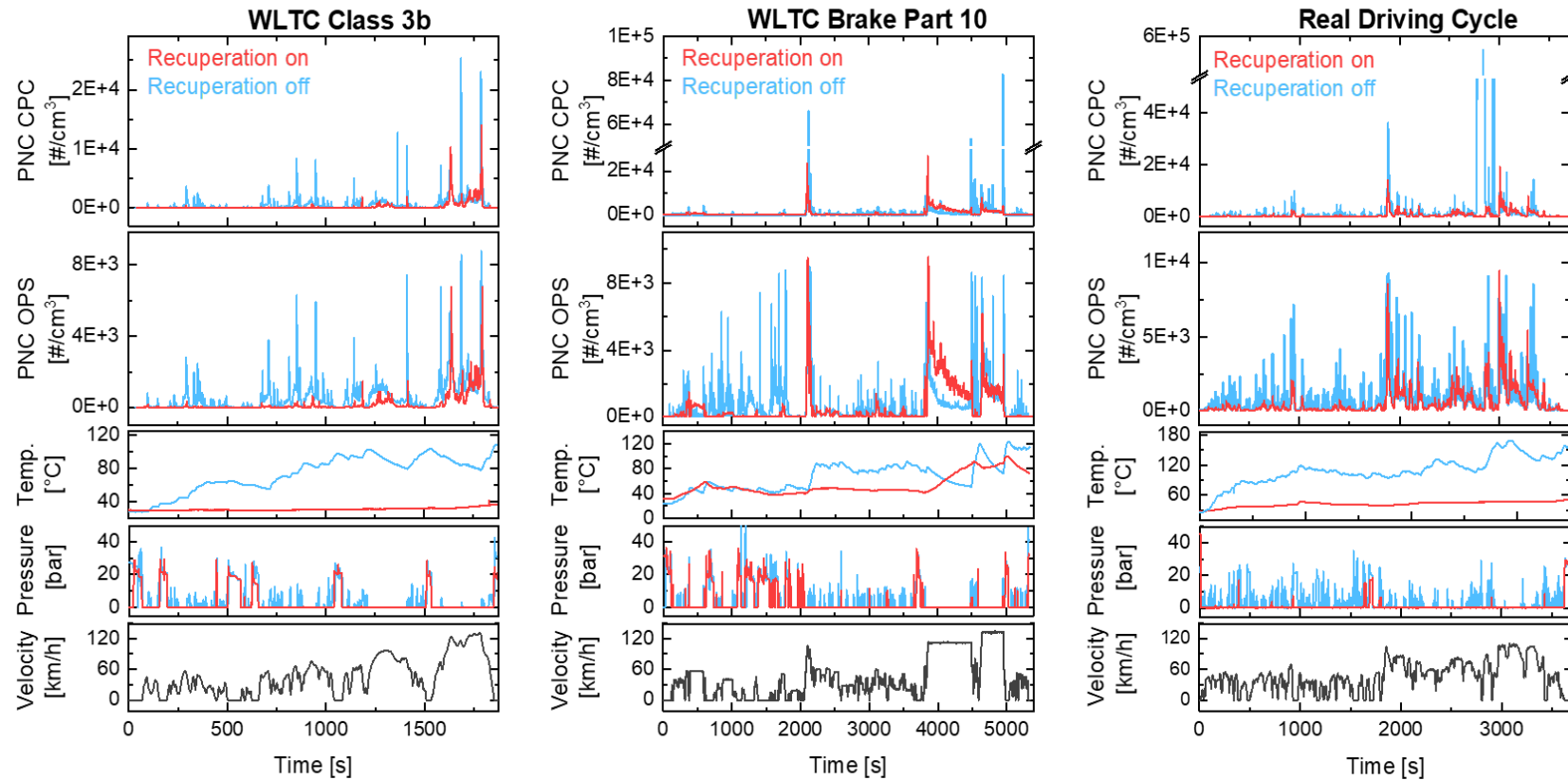
Fahrzyklus	PN-Emissionen an der HM-beschichteten Brems Scheibe [# / km]		Reduzierung der PN-Emissionen durch Beschichtung [%]	
	4 nm - 3 µm	300 nm - 10 µm	4 nm - 3 µm	300nm - 10 µm
WLTC Class 3b	1.33×10^8	8.50×10^7	18.5	33,9
WLTC Brake Part10	1.45×10^8	9.38×10^7	71.7	78
Realer Fahrzyklus (RDE)	$8,64 \times 10^7$	5.85×10^7	78.9	83





EINFLUSS REKUPERATION

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



ZEDU1

LAMELLENBREMSE (DEMONSTRATOR)



Messszenarien Demonstrator-Fahrzeug

Rollenprüfstand (DLR)

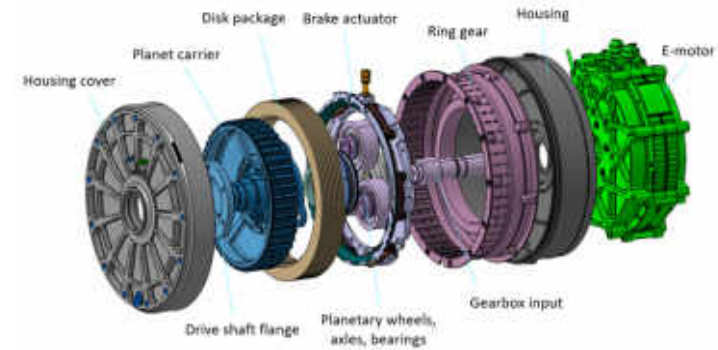
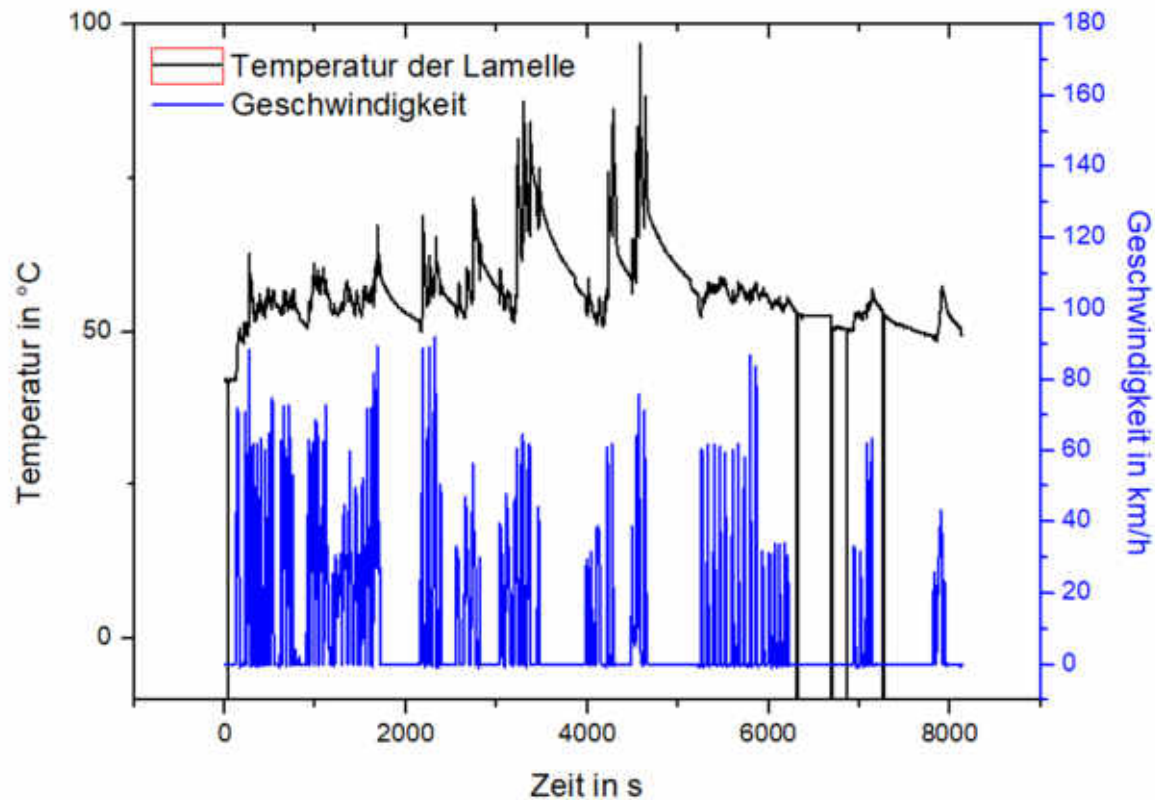


Testgelände (Boxberg)



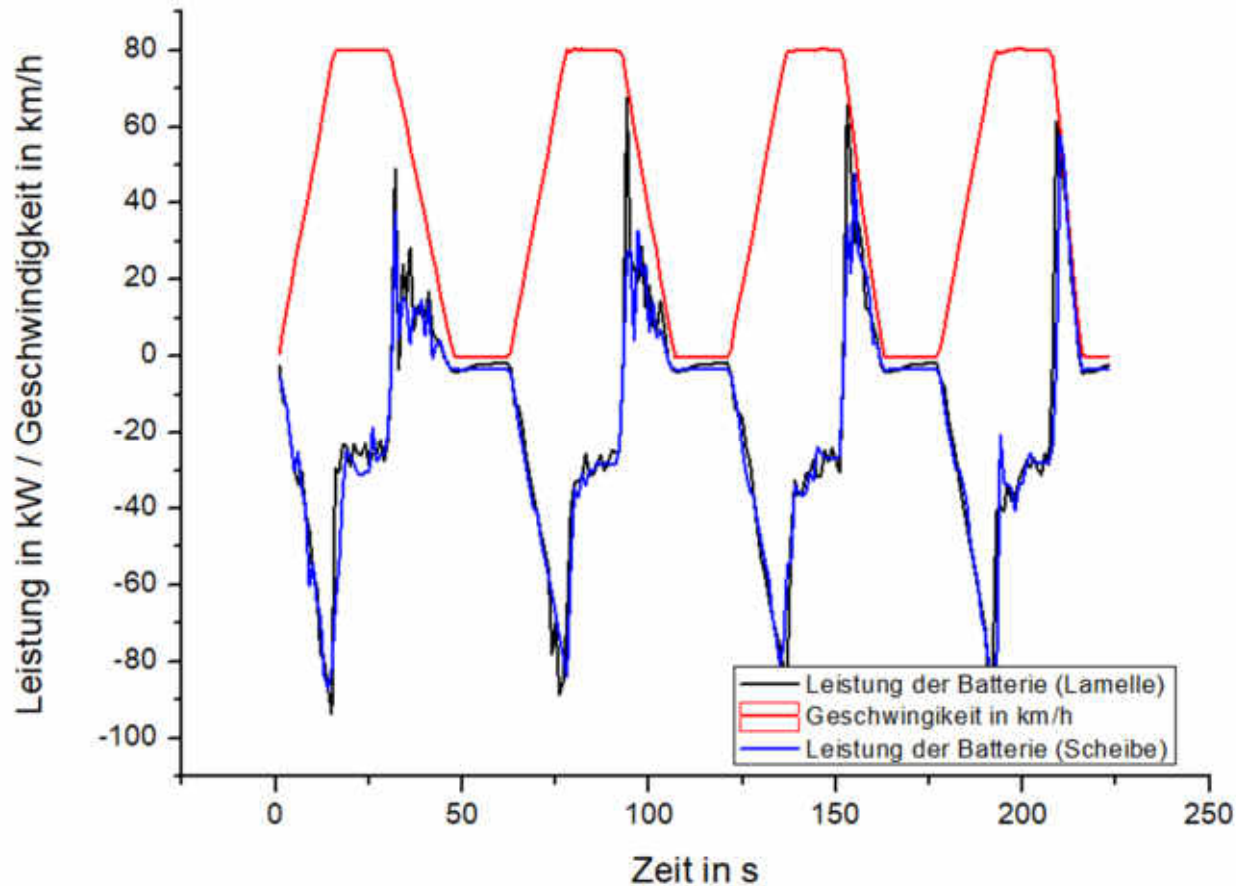
Charakterisierung der Lamellenbremse

Alternierende Beschleunigungs- und Bremstests



- Bremstemperatur $< 100\text{ °C}$ (Grenzwert 180 °C)
- Absolute Verzögerung überschreitet **Haftungs Grenze** der Reifen
- Ausreichende Verzögerung und Kühlung der neu entwickelten Lamellenbremse

Technologie-Vergleich: Scheiben- und Lamellenbremse



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



Zusammenfassung



- Abgasemissionen sinken. Gleichzeitig steigen **Brems- und Reifenemissionen** in der 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 **Brems- und Reifenabriebsemissionen** aufm Prüfstand und im **realen Betrieb**
 - => geeignetes Konzept für **zukünftige RDE-Messungen** von Nicht-Abgasemissionen
- Partikelverteilung und -konzentrationen hängt vom Fahrprofil, Temperatur ab.
- Partikelverteilung sowohl von Brems- als auch Reifenabriebsemissionen bis in den UFP Bereich gemessen (4 nm bis 10.000 nm (10 µm))
- Brems- und Reifenabriebe nicht auf grobe mechanische Abriebe beschränkt, sondern auch **Quelle** für **feine** und **ultrafeine** Partikel.
- Brems- und Reifenemissionen abhängig von Geschwindigkeit und Beschleunigung
- 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 **83%** (RDE)
- Lamellenbremse technisches Funktionsprinzip im Fahrzeugeinsatz (Demonstrator) nachgewiesen
- ZEDU-1 **Reifenabsorptionssystem** hoch effizient (η -System (v) ~ **84 % bis 94 %**)



ACKNOWLEDGEMENTS



Vielen dank für Ihre Aufmerksamkeit

ZEDU1

