

Beitrag zur experimentellen und analytischen Beschreibung partikelförmiger Bremsenemissionen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

M.Eng. David Hesse

geboren am 14. Juni 1990 in Heilbad Heiligenstadt

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Augsburg
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. mult. Prof. h. c. mult. Peter Scharff
3. Gutachter: Dr.-Ing. Sebastian Gramstat

Tag der Einreichung: 30.06.2020

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18.11.2020

Kurzfassung

Verkehrsbedingte Emissionen stehen derzeit stark in der öffentlichen Kritik, da diese zur Klimaveränderung beitragen und als gesundheitsgefährdend eingestuft werden. Verbrennungsmotorische Emissionen sind derzeit durch Grenzwerte reguliert. Durch den Einsatz effizienter Antriebsaggregate und effizienter Abgasnachbehandlungssysteme sank der Anteil dieser Emissionen am Gesamtfahrzeugausstoß in den vergangenen Jahren kontinuierlich. Für außermotorische Emissionen, zu denen auch partikelförmiger Bremsenabrieb zu zählen ist, existiert derzeit kein gesetzlicher Grenzwert bezüglich emittierter Partikelanzahl und Partikelmasse, was zu einem kontinuierlichen Anstieg des Anteils am Fahrzeuggesamtbudget führte. Da ein Teil der Verschleißpartikel den Größenklassen des Feinstaubes ($\leq 10 \mu\text{m}$) zugeordnet werden kann, ist diese Feinstaubquelle für die menschliche Gesundheit von besonderer Relevanz und steht damit im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen. Eine zielgerichtete Bewertung setzt effiziente Probenahmesysteme voraus, durch deren Anwendung eine ganzheitliche Analyse von Emissionscharakteristiken sowie der chemischen und physikalischen Eigenschaften unter Laborbedingungen und im realen Fahrversuch möglich wird.

Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag zur Beschreibung der Dynamik partikelförmiger Bremsenemissionen innerhalb eines geschlossenen Probenahmesystems dar. Im Einzelnen sind dies die Partikelinjektion und -verteilung bis hin zur Probenahme oder Abscheidung. Ein weiteres Ziel stellt die Verifizierung der Messfähigkeit der vornehmlich für die Ermittlung verbrennungsmotorischer Abgasemissionen entwickelten Messsysteme für den vorliegenden Anwendungsfall dar. Das übergeordnete Ziel besteht damit in einer ganzheitlichen Bewertung der zur Durchführung regulatorischer Messungen erforderlichen Mess- und Prüftechnik.

Den Beginn stellt die Entwicklung einer Methodik zur Analyse des Partikelinjektions- und Abscheideverhaltens dar. Darauf aufbauend werden methodische Ansätze zur experimentellen Validierung vorgestellt. Untersuchungen zur Partikelverteilung und -abscheidung ermöglichen eine allumfassende Bewertung der ablaufenden Vorgänge. Im dritten Teil werden physikalische Messprinzipien zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration (PAK), Partikelmasse (PM) bzw. -konzentration (PMK) und Größenverteilungsdichte (GVD) hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit überprüft. Die Erarbeitung von Messkonzepten ermöglicht die Durchführung vergleichender Untersuchungen zur Bewertung von Einflussgrößen und Emissionsminderungspotenzialen. Den Abschluss bilden Untersuchungen zum Emissionsverhalten an variierenden Prüfumgebungen, vom Schwungmassen-Bremsenprüfstand bis hin zum realen Fahrversuch, was eine ganzheitliche Bewertung der Wechselwirkungen und Zusammenhänge ermöglicht.

Abstract

Traffic-related emissions are currently subject to strong public criticism, as they contribute to climate change and are classified as hazardous to health. Emissions from combustion engines are currently regulated by limit values. Due to the application of efficient powertrain units and exhaust aftertreatment systems, the amount of exhaust-related emissions has decreased continuously in recent years. There is currently no legal limit for non-exhaust emissions, such as particulate brake abrasion, which has led to a continuous increase in the share of vehicle global emissions. Since some of the emitted particles can be assigned to the size classes of particulate matter ($\leq 10 \mu\text{m}$), this source is of particular relevance to human health and is therefore the focus of scientific studies. Efficient sampling systems are required for a targeted evaluation of the health risk potential. Their application enables a holistic analysis of emission characteristics as well as the chemical and physical properties of the emitted particles under laboratory conditions and in real driving tests.

The present work is a contribution to the description of brake particle emissions formation within a constant volume sampling system. In detail, this includes particle injection and particle distribution. A further objective is the evaluation of the applicability of the measurement systems developed primarily for the measurement of particulate exhaust emissions from combustion engines.

The first part is the development of a methodology for the analysis of particle injection and deposition behaviour. Based on this, methodical approaches for experimental validation are presented. Investigations on particle distribution and particle deposition allow a holistic evaluation of the processes taking place. In the third part, physical measuring principles for the determination of particle number, particle mass and particle size distribution are examined with regard to applicability. The development of measurement concepts enables the execution of investigations for the evaluation of influencing variables and emission reduction potentials. The final part is the investigation of particle emission behaviour in varying test environments, from inertia dynamometer to real driving tests, which allows a holistic evaluation of interactions and correlations.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik der Technischen Universität Ilmenau.

Ganz besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Augsburg für die Betreuung und Unterstützung über die gesamte Zeit des Promotionsverfahrens. Er begleitete mich über meine Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter als Mentor und gab mir die Gelegenheit, neue Konzepte zu entwickeln und Ideen praktisch umzusetzen. Darüber hinaus danke ich den Gutachtern, Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. mult. Prof. h. c. mult. Peter Scharff und Herrn Dr.-Ing. Sebastian Gramstat, für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Den Kollegen M.Sc. Toni Feißel, M.Sc. Felix Wenzel und M.Sc. Christopher Hamatschek danke ich für die zahlreichen Diskussionen und Anregungen sowie allen Kollegen und Mitarbeitern des Fachgebietes Kraftfahrzeugtechnik für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung.

Weiterhin bedanke ich mich recht herzlich bei den Herren Dipl.-Ing. (FH) Rasmus Leicht, Dipl.-Ing. Oliver Frank und Dipl.-Ing. (FH) Gerorg Eichner von der BMW AG sowie Dr. Athanasios Mamakos und Dr. Michael Arndt von der AVL List GmbH für die gute Zusammenarbeit während zahlreicher Projekte.

Nicht vergessen werden darf die Unterstützung, welche ich durch die Betreuung zahlreicher studentischer Arbeiten erfahren habe. Stellvertretend für alle Beteiligten möchte ich an dieser Stelle den Herren M.Sc. Julian Reinhard, M.Sc. Leonard Brand, M.Sc. Simon Probst, M.Sc. Johannes Förner, M.Sc. Robert Just, M.Sc. Jochen Sommer, M.Sc. Fabian Übel, M.Sc. Philipp Germanow, M.Sc. Moritz Luigi Popp, B.Sc. Felix Feist und B.Sc. Christopher Grafe für ihr außerordentliches Engagement und die intensiven Diskussionen danken.

Herzlich danke ich meiner Familie, welche mich während der Fertigstellung dieser Arbeit stets unterstützt und mir den notwendigen Rückhalt gegeben hat.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise entgeltlich/unentgeltlich geholfen:

1. Keine

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract	III
Vorwort	IV
Erklärung	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Partikelförmige Emissionen von Kraftfahrzeugen	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
2 Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Feinstaub und gesundheitliche Risiken	3
2.2 Kraftfahrzeugbremssysteme.....	4
2.3 Partikelförmige Bremsenemissionen	5
2.3.1 Tribologisches System, Verschleißmechanismen und Partikelbildung ...	5
2.3.2 Prüfumgebung und Probenahmesysteme.....	10
2.3.3 Messung und Klassifizierung	12
2.4 Physikalische Messprinzipien.....	15
2.5 Aerosoldynamische Beschreibung	16
2.6 Grundlagen der Strömungslehre	19
2.6.1 Strömungszustände.....	19
2.6.2 Grundgleichungen der Strömungsmechanik	20
2.6.3 Turbulenzmodellierung der Fluidphase.....	22
2.6.4 Berechnung der dispersen Phase.....	23
2.7 Präzisierung der Aufgabe	23
3 Simulative Untersuchungen.....	26
3.1 Geschlossenes Konstantvolumen-Probenahmesystem.....	26
3.2 Zieldefinition der simulativen Untersuchungen	27
3.3 Methodenentwicklung anhand eines stationären Probenahmesystems	28
3.3.1 Turbulenzmodell.....	28
3.3.2 Definition der Netzoptionen	29
3.3.3 Übertragung auf das Gesamtmodell	32
3.3.4 Partikelinjektion und Initialbedingungen.....	32
3.3.5 Partikelverteilung in einem Konstantvolumen-Probenahmesystem.....	35

3.4	Probenahmesystem für Realfahrtanwendung.....	42
3.5	Fazit zu den simulativen Untersuchungen	45
4	Methoden der experimentellen Validierung	48
4.1	Evaluierung von Emissionscharakteristiken.....	48
4.1.1	Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit und des Bremsdruckes.....	48
4.1.2	Einfluss des Bremsdruckgradienten.....	50
4.1.3	Sekundärpartikelemissionen.....	51
4.2	Partikelverteilungsprofile im Konstantvolumen-Probenahmesystem.....	55
4.2.1	Methodik und Vorgehensweise	55
4.2.2	Verifizierung der Strömungsuniformität mittels Tracergas-Verfahren	56
4.2.3	Einfluss von Geschwindigkeit und Absaugrichtung	57
4.2.4	Massebezogene Emissionsfaktoren zur Bewertung der Probenahme ..	64
4.3	Untersuchungen zur Partikelabscheidung	65
4.3.1	Methodik und Vorgehensweise.....	65
4.3.2	Untersuchung variierender Parameter	66
4.3.3	Verifizierung der Abscheidegeschwindigkeit	70
4.4	Verifizierung sektionaler Partikelabscheidungen	72
4.5	Fazit zur Verifizierung der Partikelverteilung und Partikelabscheidung.....	74
4.6	Konzeptionierung und Gestaltung eines Probenahmesystems.....	75
5	Mess- und Klassifizierbarkeit.....	78
5.1	Chemische Zusammensetzung der Reibpartner und emittierten Partikel.....	78
5.2	Bestimmung physikalischer Eigenschaften.....	84
5.2.1	Messung der Partikelanzahlkonzentration	85
5.2.2	Einfluss der Temperatur auf die Bildung nanoskaliger Partikel	93
5.2.3	Bestimmung der Partikelmassenkonzentration	101
5.2.4	Gegenüberstellung von Partikelanzahl und Partikelmasse	102
5.3	Fazit zur Mess- und Klassifizierbarkeit	105
6	Bewertung von Einflussgrößen auf das Partikelemissionsverhalten	108
6.1	Partikelemissionsverhalten über den tribologischen Einlaufvorgang.....	108
6.2	Vergleich unterschiedlicher Belag- und Scheibenkonzepte	111
6.3	Einfluss der Konditionierung auf die Emissions- und Reibwertdynamik	116
6.4	Einfluss der Belaggeometrie.....	118
6.5	Einfluss eines regenerativen Bremssystems	121
6.6	Fazit zur Bewertung von Einflussgrößen auf das Partikelemissionsverhalten...	125
7	Vergleich variierender Prüfumgebungen	128
7.1	Messungen im realen Fahrversuch	128
7.1.1	RDE-konformer Testzyklus und Definition von Zielgrößen.....	128

7.1.2	Messergebnisse und Vergleich	130
7.2	Messungen unter variierenden Prüfumgebungen	134
7.2.1	Methodenentwicklung und Vergleich der Prüfumgebungen	134
7.2.2	Vergleich zwischen stationärem und mobilem Probenahmesystem	137
7.2.3	Vergleich von Prüfumgebungen auf Basis von Testzyklen und Druckprofilen	138
7.3	Fazit zu den Messungen unter variierenden Prüfumgebungen	141
8	Zusammenfassung	145
8.1	Partikelemissionsverhalten und Messbarkeit	145
8.2	Ableitung einer Methodik zur Bestimmung von PN/PM-Emissionsfaktoren	148
9	Ausblick	156
	Quellenverzeichnis	158
	Eigene Veröffentlichungen, Vorträge und Patente	168
	Betreute studentische Arbeiten	169
	Anhang	171
	A1 – Abmessungen des stationären Konstantvolumen-Probenahmesystems	171

Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

Zeichen	Bezeichnung
AFM	Atomic Force Microscopy
APS	Aerodynamic Particle Sizer
BEV	Battery Electric Vehicle (engl.) – Batterieelektrisches Fahrzeug
BKV	Bremskraftverteilung
BLPI	Berner Low-Pressure Impactor
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol
CAST	Combustion Aerosol Standard
CFC	Carbonfaserverstärkter Kohlenstoff
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMD	Count Median Diameter
CO ₂	Carbon dioxide
CPC	Condensation Particle Counter
C/SiC	Kohlenstofffaserverstärktes Siliciumcarbid
CVS	Constant Volume Sampler
DIN	Deutsches Institut für Normung
DF	Dilution Factor
DMA	Differential Mobility Analyzer
DPM	Discrete Phase Models
DR	Druckreihe
DYN	Dynamisch
EC	Elemental Carbon
ECE (kh/kf)	Economic Commission for Europe (engl.) – Reibbelag für den europäischen Markt (low met) kupferhaltig/kupferfrei
EWG	Eurogroup Working Group
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
EEPS	Engine Exhaust Particle Sizer
EF	Emissionsfaktor
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor
Em	Mittlerer Wirkungsgrad
EN	Europäischen Normen
ET	Evaporation Tube
EU	European Union
FR	Fahrtrichtung

FS	Fingerseite
GG	Graugussscheibe
GPS	Global Positioning System
GRPE	Working Party on Pollution and Energy
GVD	Größenverteilungsdichte
HA	Hinterachse (eines Fahrzeuges)
HC	High Carbon
HEPA	High Efficiency Particulate Air filter
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HMB	Hartmetallbeschichtete Bremsscheibe
Isim	(electrical-) Inertia Simulation
ISO	International Organization for Standardization
JRC	Joint Research Centre
KS	Kolbenseite
MRF	Moving Reference Frame
MOUDI	Microorifice Uniform Deposit Impactor
MW	Moving Wall
NAO (kf/kh)	Non-Asbestos Organic (engl.) – asbestfreier, organischer Reibbelag kupferhaltig/kupferfrei
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OC	Organic Carbon
OPC	Optical Particle Counter
OPS	Optical Particle Sizer
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PAS	Photoakustische Spektroskopie
PCRF	Particle Concentration Reduction Factor
PEMS	Portable Emissions Measurement System
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
PM (10/2.5)	Particulate Matter
PMP	Particle Measurement Program
PN	Particle number
PND	Particle Number Diluter
Ra	mittlere Rauigkeit
RDE	Real Driving Emissions
REM	Rasterelektronenmikroskop

RH	Relative Humidity
RNA	(Sectional-) Relative Negative Acceleration
RPS	(4-) Rollenprüfstand, Gesamtfahrzeugprüfstand
RSM	Reynolds-Spannungs-Modell
SAE	Society of Automotive Engineers
SMP	Schwungmassen-Bremsenprüfstand
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
SOC	State of Charge
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
UN/ECE	United Nations Economic Commission for Europe
VA	Vorderachse (eines Fahrzeuges)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VPR	Volatile Particle Remover
WLTP	Worldwide harmonized Light Vehicle Test Procedure
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy

Lateinische Symbole

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	m/s ²	Beschleunigung
\bar{a}_{neg}	m/s ²	Mittlere negative Beschleunigung
\bar{a}_{pos}	m/s ²	Mittlere positive Beschleunigung
A_B	m ²	Belag-Kontaktfläche / Reibfläche
a_E	m	Elementgröße an der Wandfläche
A_{eff}	m ²	Effektive Querschnittsfläche
c_p	kJ*kg ⁻¹ *K ⁻¹	spezifische Wärmekapazität
D	-	Depositionsrate (Abscheidegrad)
d_i	m	Mittlerer Trenndurchmesser
D_i	m ² /s ³	diffusive Flüsse in der Bilanzgleichung
d_p	m	Partikeldurchmesser
d_R	m	Rohrdurchmesser
d_{50}	m	(mittlerer) 50%-Trenndurchmesser
E_{kin}	J	Kinetische Energie
f	Hz	Frequenz
F_N	N	Normalkraft
g	m/s ²	Gravitationskonstante
h_S	m	Höhe der ersten Schicht

h	$\sim 6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js}$	Plancksches Wirkungsquantum
i	s	Zeitschritt
J	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$	Trägheitsmoment
k	m^2/s^2	turbulente kinetische Energie
k_i	-	Intervall
m_F	kg	Masse
M_k		Anzahl der Stichproben innerhalb einer Sektion
m_P	kg	Partikelmasse
N	-	Anzahl der Schichten
N_k	-	Gesamtanzahl der gefahrenen Anteile
p	MPa	Druck
P	-	Penetrationsrate (Durchdringungsgrad)
P_{ij}	m^2/s^3	Produktionsterm der turbulenten kinetischen Energie
Q	m^3/h	(Evakuierungs-) Volumenstrom
r	M	Radius
Re	-	Reynoldszahl
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
s	m	Weg
Stk	-	Stokeszahl
T	K	Temperatur
t	s	Zeit
\bar{t}	s	Verweilzeit
u, v, w	m/s	momentane Geschwindigkeiten
U_{kr}	m/s	kritische Geschwindigkeit
v	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
\bar{v}	m/s	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
v_d	m/s	Depositionsgeschwindigkeit
v_r	m/s	radiale Geschwindigkeitskomponente
W	J	Arbeit
x, y, z	m	Ortskoordinaten
y^+	-	dimensionslosen Wandabstand

Griechische Symbole

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
δ_v	m	Dicke (der viskosen Grenzschicht)
ε	m^2/s^3	Dissipationsrate
Φ_{ij}	m^2/s^3	Umverteilungsterm

$\Phi_{\text{Spektrometer}}$	J	Austrittsarbeit des Spektrometers
η	Pa*s	dynamische Viskosität
φ	°	(Krümmungs-) Winkel
λ	m	mittlere freie Weglänge
μ	m ² /s	Turbulente Viskosität
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
ρ / ρ_p	kg/m ³	Dichte / Partikeldichte
τ_p	s	Partikelrelaxationszeit
ω	-	Wachstumsrate

Kennzahlen

Reynoldszahl
$$\text{Re} = \frac{\rho_p \cdot \bar{v} \cdot d_p}{\eta} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot \nu \cdot d}$$

Stokeszahl
$$\text{Stk} = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot \bar{v}}{18 \cdot \eta \cdot \frac{d_R}{2}}$$

1 Einleitung

Das Kraftfahrzeug stellt derzeit die Grundlage der individuellen Mobilität dar. Vor dem Hintergrund derzeitiger als auch zukünftiger Antriebskonzepte stehen Kernthemen wie der Energieverbrauch, die Schadstoffemissionen und der Klimaschutz im Fokus öffentlicher Diskussionen. Automobile Emissionen sind in verbrennungsmotorische und außermotorische Emissionen als wesentliche Hauptgruppen zu unterteilen. Letztere können in Bremsen-, Reifen- und Straßenabrieb sowie in Resuspension infolge verkehrsbedingter Aufwirbelungen unterteilt werden.

1.1 Partikelförmige Emissionen von Kraftfahrzeugen

Als Folge verschärfter gesetzlicher Grenzwerte lag der Fokus der Automobilindustrie in der Vergangenheit in der Entwicklung effizienter Antriebskonzepte und Filtersysteme. Dadurch sank der Anteil verbrennungsmotorischer Emissionen am Gesamtfahrzeugausstoß kontinuierlich (vgl. Abbildung 1-1), wohingegen die Anteile von Bremsen (vgl. Abbildung 1-2)- und Reifenabrieb stiegen. Partikelförmige Bremsenemissionen entstehen infolge tribologischer Verschleißprozesse durch den Reibkontakt zwischen Reibbelag und metallischem Grundkörper (Bremsscheibe) und können teils dem Größenspektrum des Feinstaubes ($\leq 10 \mu\text{m}$) zugeordnet werden. Der übergeordnete Anteil der Verschleißpartikel ist als supermikrone Partikel zu deklarieren ($> 1 \mu\text{m}$), wohingegen unter bestimmten thermischen Szenarien auch nanoskalige Partikel nachgewiesen werden können [NOS16]. Da die Eindringtiefe in den menschlichen Atemtrakt und damit das Gefährdungspotenzial mit der Abnahme der Partikelgröße steigt, stellen insbesondere nanoskalige Partikel eine besondere Problematik dar.

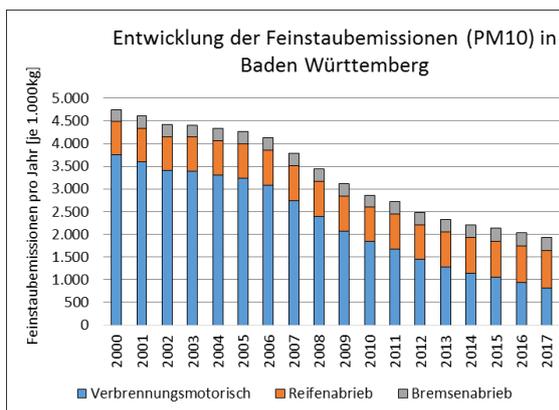


Abbildung 1-1: Entwicklung der PM10-Emissionen in Baden-Württemberg 2000–2017 [STA19]

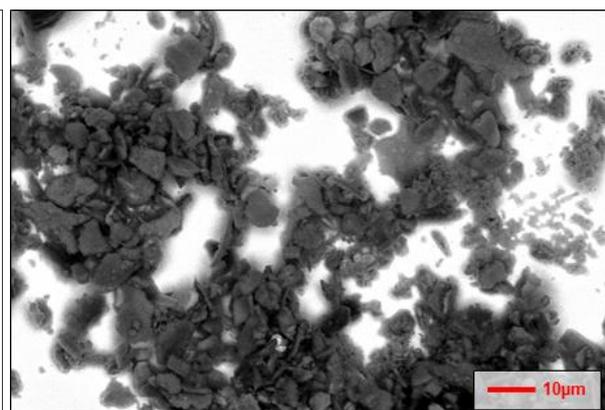


Abbildung 1-2: Partikelförmige Bremsenemissionen eines ECE-Belages (größenfraktioniert)

Neben dem breiten Größenspektrum sowie abweichenden Partikelformen sind die Verschleißpartikel im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Emissionen durch abweichende physiochemische Eigenschaften charakterisiert. Die Vielfalt an Belagmixturen resultiert zudem in einer hohen Streuung der chemischen und physikalischen Eigenschaften. Hinzu kommen dynamische Fahrbedingungen im realen Fahrversuch, was zu einer hohen Varianz der Verschleißrate und der damit korrelierenden Emissionsfaktoren (Maß zur Quantifizierung) führt [MOS04,

WAH10a]. Als primäre Einflussgrößen auf die Verschleißrate sind neben den chemisch-physikalischen Eigenschaften der Reibpartner die Fahrgeschwindigkeit, der Bremsdruck und die Temperatur zu nennen. Zusammenfassend stellen die partikelförmigen Bremsenemissionen infolge von Größenspektrum, Zusammensetzung, Oberfläche, Struktur und Löslichkeit als auch die Nähe des Emittenten zum Menschen ein gesundheitliches Gefährdungspotenzial dar und stehen daher im Fokus wissenschaftlicher Studien [GRA14, GON19, GER19].

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Für partikelförmige Bremsenemissionen als auch für das gesamte Spektrum außermotorischer Abgasemissionen existieren derzeit keine gesetzlichen Beschränkungen. Entsprechend vielfältig sind die in der Literatur (vgl. Abschnitt 2.3) existierenden Ansätze, Methoden und Konzepte zur Charakterisierung und Klassifizierung. Die unter Koordination des Joint Research Centers (JRC) arbeitenden informellen Arbeitsgruppen PMP-Task Forces I/II beschäftigen sich derzeit mit der Entwicklung eines einheitlichen Messverfahrens. Dazu sind wissenschaftliche Erkenntnisse über das Partikelemissionsverhalten und die wirkenden Mechanismen, Anforderungen an ein Probenahmesystem sowie die Messfähigkeit differenzierter physikalischer Messprinzipien erforderlich, welche derzeit weitestgehend fehlen. Neben Untersuchungen zum Emissionsverhalten im Straßenverkehr wurden bislang Messungen am Gesamtfahrzeugprüfstand, Schwungmassen-Bremsenprüfstand oder Tribometer bei jeweils differenzierten Testbedingungen vorgestellt. Die verwendeten Messsysteme weisen unterschiedliche Konfigurationen und Eigenschaften wie der messbare Partikelgrößenbereich, der Konzentrationsbereich oder die Aerosol-Vorbehandlung auf. Untersuchungen zum Vertrauensbereich der Messdaten liegen in kaum nennenswerter Anzahl vor. Infolge abweichender Konzepte an Probenahmesystemen bei teils hochgradig turbulenten Strömungsbedingungen sind der Partikeltransport supermikroner Partikel, die Partikelverteilung und die Repräsentativität der entnommenen Probe durch signifikante Unterschiede gekennzeichnet. Aufgrund des Einflusses der Rotationsgeschwindigkeit ist das Partikelemissionsverhalten weiterhin als hochdynamisch zu beschreiben. Strategien zur Bewertung der Messqualität sind der Literatur nur in Ansätzen zu entnehmen. Typischerweise erfolgt die Charakterisierung der Strömung ohne Direktbezug zur Partikeluniformität oder die Bewertung der Transporteffizienz auf Grundlage empirischer Modelle, wobei z. B. eine Kopplung mit den komplexen Injektionsmechanismen ausbleibt.

In der vorliegenden Arbeit wird daher eine Methodik präsentiert, durch deren Anwendung erstmals die dynamischen Vorgänge innerhalb eines Konstantvolumen-Probenahmesystems, von der Partikelinjektion bis zur Partikelabscheidung, modelliert und bewertet werden können. Weitere Schwerpunkte stellen die Verifizierung der Mess- und Klassifizierbarkeit partikelförmiger Bremsenemissionen anhand variierender Partikelmessprinzipien und die Bewertung von Einflussgrößen dar. Dies ermöglicht die Umsetzung eines Messkonzeptes zur Analyse von Emissionscharakteristiken unter Laborbedingungen und im realen Fahrversuch.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In dem vorliegenden Abschnitt erfolgt eine Vorstellung der Grundlagen zum Thema Feinstaub, zur Entstehung von Verschleißpartikeln am Beispiel der Reibungsbremse sowie zu den relevanten Transportmechanismen. Darauf aufbauend folgen die Vorstellung bekannter Konzepte zur Probenahme von Bremsstaub, physikalische Messprinzipien sowie die strömungstechnischen Grundlagen.

2.1 Feinstaub und gesundheitliche Risiken

Die Luftqualität wird neben Luftschadstoffen vor allem durch die Feinstaubbelastung bestimmt. Als Feinstaub gelten sowohl feste als auch flüssige Partikel, welche sich fein verteilt in der Luft befinden. Eine Möglichkeit zur Unterteilung der Partikel erfolgt entsprechend DIN ISO 7708 nach der Eindringtiefe in den menschlichen Atemtrakt (vgl. Tabelle 2-1). Partikel in einem Bereich zwischen 2,5 und 10 μm verbleiben bereits im Nasen- und Rachenraum oder dringen bis in den oberen Bereich der Bronchien vor. Etwa 20 % der Partikel zwischen 0,1 und 2,5 μm gelangen bis in die Region der stärker und feiner verästelten Bronchien und können dort auch nach mehreren Wochen nachgewiesen werden. Ultrafeine Partikel ($< 0,1 \mu\text{m}$) strömen bis in die Lungenperipherie (Gasaustauschbereich) vor [HLU07]. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung können durch Partikel der ultrafeinen Fraktion Reizwirkungen oder entzündliche Prozesse an Gewebe oder Zellen ausgelöst werden. Weiterhin können Partikel über die Alveolen bis in die Blutbahn vordringen und zu unterschiedlichen Organen des menschlichen Organismus transportiert werden. In der Literatur wird keine Konzentrationsschwelle für eine Feinstaubexposition genannt, unterhalb derer keine gesundheitliche Wirkung zu erwarten ist. Vielmehr sind bereits bei niedrigen Konzentrationen gesundheitliche Effekte nachweisbar.

Tabelle 2-1: Einteilung der Partikelgröße gemäß Eindringtiefe in den Atemtrakt nach ISO 7708, 1995 [SCH10, HLU07]

Größenfraktion	Beschreibung
PM ₁₀	aerodynamischer Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$ (inhalierbarer Feinstaub – coarse fraction)
PM _{2,5}	aerodynamischer Durchmesser $< 2,5 \mu\text{m}$ (lungengängiger Feinstaub – fine fraction)
PM _{0,1}	aerodynamischer Durchmesser $< 0,1 \mu\text{m}$ (tieflungengängige Partikel – ultrafine fraction)

Infolge variierender Formen und Dichten der zu klassifizierenden Partikel erfolgt die Beschreibung anhand des Äquivalentdurchmessers. Per Definition entspricht dieser dem geometrischen Durchmesser einer Kugel, welche bezüglich des jeweiligen Messverfahrens das gleiche Verhalten wie das zu beschreibende Partikel aufweist [BER08]. Zu unterscheiden ist zwischen aerodynamischem, Elektromobilitäts- und optischem Durchmesser. Bei der Klassifizierung in die oben beschriebenen Feinstaubklassen entspricht die obere Grenze je Größenklasse dem aerodynamischen Durchmesser. Dieser ist definiert als der Durchmesser einer Kugel mit der Dichte $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$, welche dieselbe Endsinkgeschwindigkeit wie das zu betrachtende Partikel

aufweist [STI08]. Feinstaubquellen lassen sich in primäre und in sekundäre Quellen unterteilen. Primäre Quellen emittieren den Feinstaub direkt, Emissionen aus sekundären Quellen entstehen während des Transports in der Atmosphäre durch Gas- und Flüssigphasenprozesse. Zudem erfolgt eine Unterteilung in Emissionen mit natürlichem und anthropogenem Ursprung. Emissionen des Straßenverkehrs zählen zu den anthropogenen Emissionen und unterscheiden sich in verbrennungsmotorische Abgasemissionen sowie Bremsen-, Reifen- und Straßenabrieb sowie Resuspension (außermotorisch) [SCH10].

2.2 Kraftfahrzeugbremsssysteme

Zur Bremskraftgenerierung an Kraftfahrzeugen kommen typischerweise Scheibenbremssysteme zur Anwendung (vgl. Abbildung 2-1; Schwimmsattelbremssystem). Zur Umsetzung des Verzögerungswunsches erfolgt eine Umwandlung von kinetischer in thermische Energie. Wesentliche Elemente eines Bremssystems sind die Bremsscheibe und die Reibbeläge, wobei letztere vom Sattelgehäuse und Halter geführt werden [HEI12].

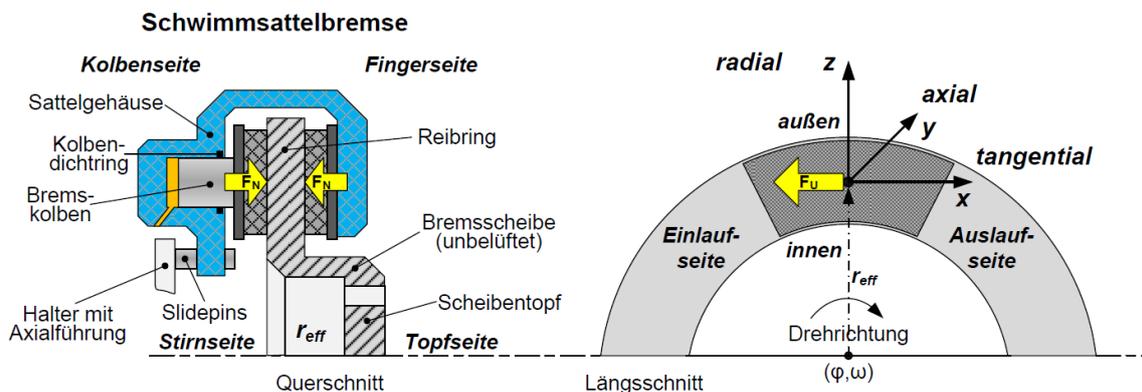


Abbildung 2-1: Komponenten und geometrische Größen einer Scheibenbremse [HEI12, BRE04]

Von Bedeutung für die Funktionsweise sind die in der Kontaktfläche ablaufenden Reibkraftübertragungsmechanismen, welche besonders durch chemisch-physikalische Ereignisse infolge ablaufender Reaktionen zwischen den Reibpartnern wie Adhäsion, Abrasion und Oxidation bestimmt werden. Aus diesen Ereignissen resultieren Materialänderungen und eine Beeinflussung des Reibverhaltens [LOE06]. Als Werkstoff für Bremsscheiben kommt typischerweise perlitischer Grauguss zum Einsatz [BRE04]. Die Reibbeläge bestehen im Allgemeinen aus den Hauptkomponenten Bindemittel, Fasern, Füllstoffe, Reibungsadditive oder Gleitmittel und Abrasivstoffe (Reibwertmodifizierer) [BOU06, CHA04, KUK11, THO08, WAH09, WAH11]. Typische Ausführungen von Reibbelägen sind NAO- und ECE-Beläge (United Nations Economic Commission for Europe; auch als Low-Steel-Belag bezeichnet). ECE-Beläge bieten durch Bestandteile wie organische und anorganische Fasern sowie Abrasivstoffe und Metalle ein verbessertes Reibverhalten bei einem gleichzeitig erhöhten Reibwert und Verschleiß gegenüber NAO-Belägen. NAO-Beläge (Non-Asbestos Organic) enthalten keine Stahlwolle oder Abrasivstoffe mit hoher Härte und zeichnen sich durch ein gutes Komfortverhalten aus [BRE04].

2.3 Partikelförmige Bremsenemissionen

2.3.1 Tribologisches System, Verschleißmechanismen und Partikelbildung

Historisch gesehen erfolgte die Trennung von Haft- und Gleitreibung durch Euler, die mathematische Beschreibung durch Coulomb. Demnach muss eine kritische Kraft überwunden werden, um einen ruhenden Körper in Bewegung zu versetzen. Prandtl betrachtete eine eindimensionale Bewegung eines Massenpunktes in einem periodischen Potenzial und einer geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung unter Einwirkung einer äußeren Kraft [POP15]. Darauf aufbauend stellt das Prandtl-Tomlinson-Modell einen ersten Ansatz zur Interpretation der tribologischen Vorgänge von zwei in Kontakt stehenden Festkörpern dar. Dieses minimalistische Modell beschreibt einen Körper unter der Wirkung einer periodischen, konservativen Kraft mit einer geschwindigkeitsproportionalen, dissipativen Kraft [GRA14, POP15]. Die Modellierung der makroskopischen Reibungskraft ist die Zielstellung, die bei der Anwendung des Prandtl-Tomlinson-Modells berücksichtigt wird.

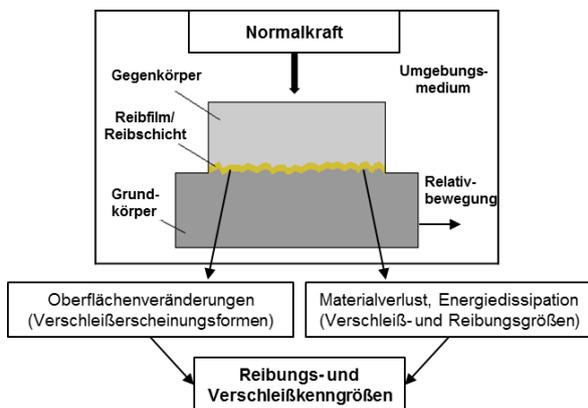


Abbildung 2-2: Grundlegende Zusammenhänge eines tribologischen Systems [GRA14]

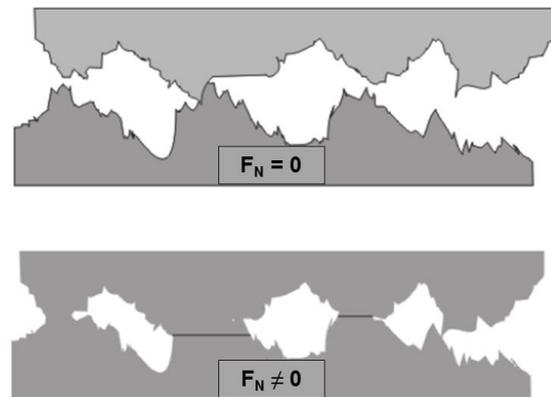


Abbildung 2-3: Einfluss der Normalkraft F_N auf die reale Kontaktfläche [NAN03]

Darauf aufbauend dient das Bowden-Tabor-Modell zur Erklärung der Gleitreibung zwischen rein metallischen Oberflächen infolge ausgebildeter Schweißbrücken. Durch den Reibkontakt kann es zu Wechselwirkungen zwischen den Atomen beider Reibpartner kommen, wobei die Summe der in Kontakt stehenden Bereiche die reale Kontaktfläche repräsentiert. Dieses Modell zeichnet die plastische Verformung von Rauigkeitsspitzen für die während der Reibung auftretenden Energieverluste verantwortlich. Die Oberflächenrauheiten werden als Spitzen und Täler beschrieben. Während der Reibung treten durch inhomogene Oberflächenstrukturen hohe mechanische Spannungen auf, die zu Oberflächenschädigungen und zum partikelförmigen Verschleiß gemäß Abbildung 2-2 führen [BOW86, GRA14, POP10]. Auch im Greenwood-Williamson-Modell wird zur Beschreibung des Reibkontaktes die Annahme von Spitzen und Tälern berücksichtigt. Die reale Kontaktfläche steigt dabei unter Zunahme der Anzahl an Mikrokontakten und ist proportional zur Normalkraft (vgl. Abbildung 2-3). Zudem erfolgt unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften eine Unterscheidung in plastische und elastische Kontaktsituationen. Die vorgestellten Modelle erlauben eine allgemeine Beschreibung des

Reib- und Verschleißverhaltens im Falle von Festkörperreibung. Im Falle von Reibungsbrem- sen ist die Modellierung von Reibung und Verschleiß infolge komplexer Materialzusammen- setzungen (vgl. Abbildung 2-4), Materialeigenschaften sowie dynamischer Beanspruchungs- parameter als Herausforderung zu betrachten. [MUS94] greift diese Herausforderung auf und beschreibt anhand von Pin-on-disc-Versuchen grundlegende Zusammenhänge zur Ausbil- dung von Reibfilm und Reibschicht. Die durch den Reibprozess entstehenden Oxidschichten sind demnach ursächlich für die Ausbildung des nur geringfügig mechanisch stabilen Reibfilms bzw. selbiger Reaktionsschicht (vgl. Abbildung 2-5). Die Bestandteile können beiden Reibpart- nern zugeordnet werden. Es wird weiterhin beschrieben, dass der Reibfilm die Reibmatrix bis zu einem gewissen Grad vor thermischer und mechanischer Belastung schützt.

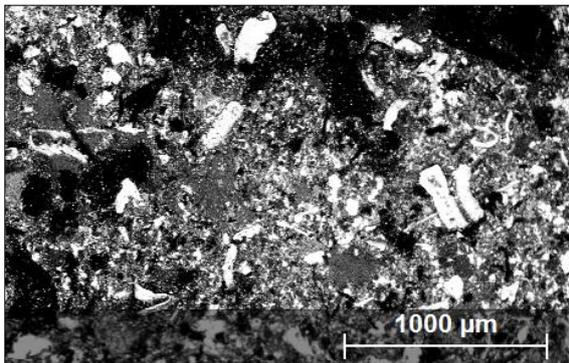


Abbildung 2-4: Materialmischung/Belagmatrix eines kupfer- freien ECE-Belages (ECE-kf)

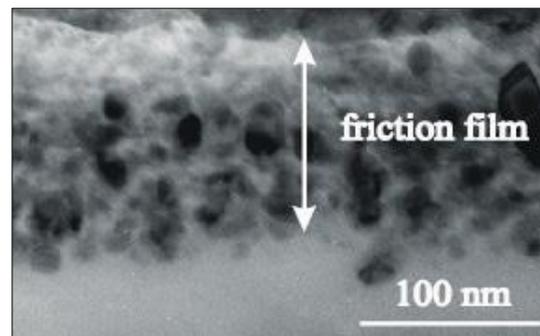


Abbildung 2-5: TEM-Aufnahme eines Reibfilms auf ei- nem organischen Reibbelag [OES06]

Durch die Ausbildung der Reibschicht resultiert neben einem konstanten Reibwert ein Abfall der Verschleißrate aufgrund eines reduzierten abrasiven Verschleißes. Gemäß [MUS94] ist die Verschleißrate während des Einlaufvorganges maximal und fällt während der Einlaufphase bis auf ein Minimum ab. Der Reibwert steigt hingegen bis zu einem Maximum an. Zu gleichem Ergebnis kommen die in [LOE06, POE05, SCH06, SEV95] beschriebenen Untersuchungen. Als Erklärungsansatz werden die inhomogenen Kontaktbedingungen bzw. die noch fehlende Reibschicht (vgl. Abbildung 2-6, links) sowie ein signifikanter Einfluss der Oberflächentopogra- fie genannt. Im Falle inhomogener Kontaktbedingungen sind die realen mikroskopischen Kon- taktdrücke gegenüber den nominellen Kontaktdrücken deutlich erhöht. Hinzu kommen dyna- mische Oberflächenänderungen, was zu sich kontinuierlich ändernden, lokalen Reibwerten, Temperaturen und Verschleißraten führt. Der tribologische Einlaufvorgang ist nach [GRA14, POE05] abgeschlossen, sobald in der eingelaufenen Reibschicht das Gleichgewicht zwischen den eingewanderten und den durch Verschleiß abgetragenen Partikeln aus dem metallischen Reibpartner erreicht ist bzw. sich die Geschwindigkeit der bildenden Reibflächen zu den ab- bauenden Schichten gleich verhält. Gemäß Abbildung 2-6 (rechts) sind im Falle des eingelaufenen Zustandes deutlich homogenere und flachere Plateaus nachweisbar. Inhomogene Oberflächenstrukturen, welche beim ECE-Belag deutlich stärker im Vergleich zum NAO-Belag ausgeprägt sind, werden durch Verschleißpartikel (Reibfilm) geglättet. Die Reibpaarung arbei- tet nach Abschluss des tribologischen Einlaufvorganges bei sonst konstanter Beanspruchung

in einem quasistationären Zustand. Wird die Beanspruchung durch Flächenpressung, Reibgeschwindigkeit oder Temperatur verändert, ändern sich die Kontaktbedingungen bzw. die Zusammensetzung der Grenzschicht und damit auch der Reibwert und die Verschleißrate.

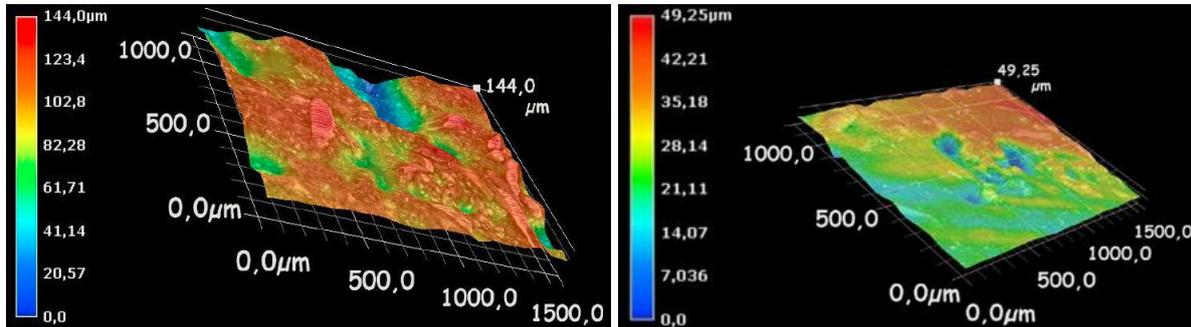


Abbildung 2-6: 3D-Topografie eines ECE-kf (links: grün; rechts: eingelaufen) [GRA14]

In [SEV95] wurde zudem beschrieben, dass der Einlaufvorgang nach einer zeitlichen Unterbrechung (Stillstand) oder durch Umwelteinflüsse (z. B. Feuchtigkeit) erneut auftreten kann. In [LOE06, MUS94] wird beschrieben, dass große thermische Beanspruchungen ($> 200\text{ °C}$) zu einer Überlastung einzelner Ringsegmente führen können, woraus ein Abtrag der Reibschicht in Form von Partikeln und eine Verschiebung der tragenden Bereiche in radialer Richtung folgen. Es wurde auch nachgewiesen, dass die thermische Überlastung periodisch erfolgt. Zudem wurde auf die hohe Dynamik oberflächennaher Spitzentemperaturen in Bezug auf die zeitliche und lokale Ausprägung hingewiesen. Auch in [POE05] wird beschrieben, dass tribochemische Reaktionen zur Bildung von Oxidschichten im Reibkontakt führen können, die den adhäsiven Verschleiß reduzieren. Als Verschleißmechanismus der Tribooxidation, wobei Temperaturen $> 200\text{ °C}$ genannt werden, können gelöste Oxidschichten abrasiv wirken und die Verschleißrate erhöhen. Es wird weiterhin beschrieben, dass im ersten Kontakt weiche Anteile des Reibbelages herausgerissen werden, wobei die Bildung der Reibschicht stark an die abrasiv wirkenden Anteile gebunden ist. Diese werden angehäuft und komprimiert, wodurch es zur Bildung eines Komponenten-Mixes des Reibbelages kommt, welcher den Kontakt zur Bremsscheibe herstellt. Der Abrieb ist ein Produkt aus den zerstörten plattenförmigen Reibschichten, welche der Autor mit Durchmessern zwischen 50 und 100 µm angibt. Darunter fallen auch Ausbrüche aus dem Reibbelag infolge von adhäsivem Verschleiß. Die Zusammensetzung der Reibschicht wird demnach primär von den Belagbestandteilen beeinflusst. Zu ähnlicher Aussage kommt [SEV95]. Demnach baut sich die Reibschicht unter geringer thermischer Beanspruchung ungestört auf, wobei sich die Konzentration der eingewanderten Eisenpartikel stetig vergrößert. Dadurch verstärkt sich der Anteil der abrasiven Reibung, was den Anstieg der Reibungszahl erklärt [GRA14]. In [ERI00, ERI01] wird erstmals die dynamische Ausprägung von Primär- und Sekundärpatches (vgl. Abbildung 2-7) mithilfe von In-situ-Visualisierungsversuchen beschrieben. Dadurch konnte eine Unterteilung in die Phasen der Entstehung, des Wachstums bzw. Verweilens und des Zerfalls erfolgen. Für die Untersuchungen wurde ein organischer Reibbelag gegen eine rotierende Glasscheibe gepresst und dadurch

ein optischer Zugang gewährt. Primärpatches sind definiert als harte, robuste Bestandteile der Reibmatrix. Sekundärpatches bestehen aus komprimierten Verschleißpartikeln, welche sich an die Primärpatches anlagern, verdichtet werden und die reale Kontaktfläche (Kraftübertragung) repräsentieren. Sekundärpatches sind weniger mechanisch robust als Primärpatches.

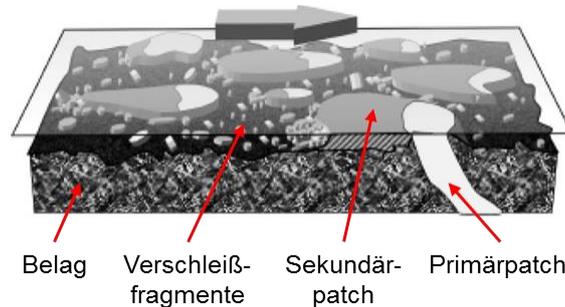


Abbildung 2-7: Primär- und Sekundärpatch eines organischen Reibbelages und Scheibe [ERI00]

Es konnten Ausdehnungen der Patches zwischen 50 und 500 μm und ein Anteil an der nominellen Kontaktfläche zwischen 10 und 30 % bestimmt werden. Infolge eines dynamischen Patchwachstums und Patchzerfalls konnten weiterhin sich kontinuierlich ändernde reale Kontaktflächen, lokale Reibwerte und lokale Verschleißraten nachgewiesen werden. Die Notwendigkeit zur mikroskopischen und lokalen Analyse der Vorgänge im Reibkontakt (Grenzschicht) wird auch in [OST09, OST10] gefordert. Die Autoren stellen ein dynamisches Reibgesetz zur Beschreibung von zeitvarianten Reibmodellen vor, welche als Basis die in [ERI00, ERI01] beschriebene Plateau-Theorie aufgreift. Aus den Phasen der Entstehung, des Wachstums bzw. Verweilens und des Zerfalls wird ein Kreislauf zur Beschreibung der Reibleistung als Funktion von Patchwachstum und Patchzerfall definiert. Das Patchwachstum resultiert durch die auf den Patch wirkende mittlere Temperatur und die Wachstumsrate, wohingegen der Patchzerfall aus der Reibkraft und dem Verhältnis der Summe der Patchfläche und der nominellen Reibfläche beschrieben wird. Im Falle des Patchzerfalls wird zudem der Einfluss der Reibleistung berücksichtigt, welche sich aus dem Produkt der Flächenpressung, Patchfläche, Reibwert und Relativgeschwindigkeit zusammensetzt. Eine Analyse des Patchverhaltens während des Reibprozesses bleibt aus [BOD12, MUE09, OST09, OST10].

In [GRA14] wird darauf aufgebaut, indem die Vorgänge in der Reibschicht mittels In-situ-Visualisierungsversuchen für ECE- und NAO-Beläge analysiert werden. Als Reibpartner (Scheibe) wurde auf mechanisch und thermisch beständiges Borosilikatglas (ähnlich zu [ERI00, ERI01]) zurückgegriffen. Für den verwendeten ECE-Belag konnten teils geradlinige, überwiegend jedoch verzweigte Partikelbahnen (vgl. Abbildung 2-8) infolge zahlreicher Hindernisse, sogenannte Patches (erhabene Bereiche), beobachtet werden, welche die Partikelgeschwindigkeit beeinflussen. Durch die stärkere Anbindung an die erhabenen Bereiche (vgl. Abbildung 2-9) können im Vergleich zum NAO kaum Verlagerungen, jedoch Agglomerationen beobachtet werden. Für den verwendeten NAO-Belag konnten homogene und geradlinige Partikelbahnen beobachtet werden, wobei die Sekundärpatchbildung an Inhomogenitäten in Form von Agglomeration und Kompaktierung, jedoch nicht zwangsweise an robusten Primärpatches erfolgt.

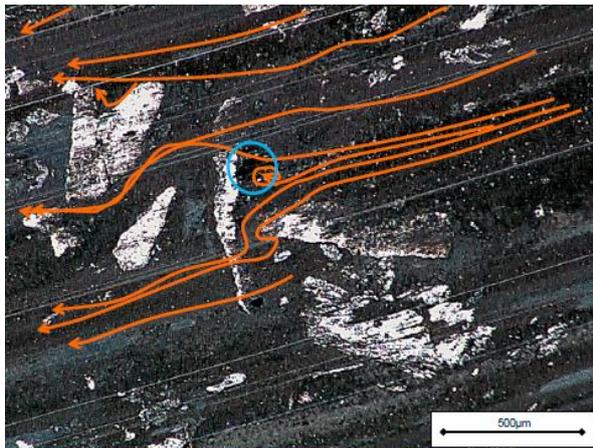


Abbildung 2-8: Partikelstauung und Sekundärpatchbildung (blaue Markierung) [GRA14]

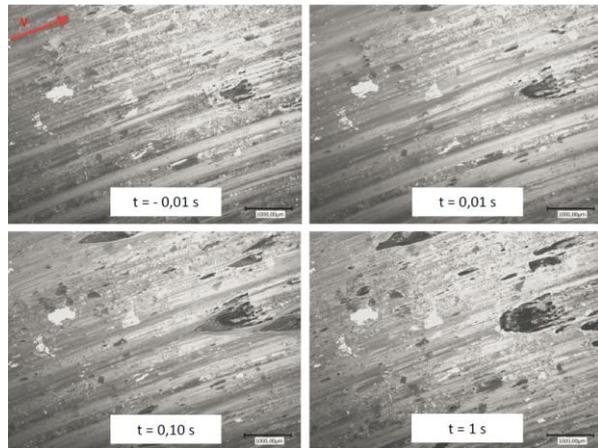


Abbildung 2-9: Reibzone für die Initialphase einer Stopbremsung (NAO) [GRA14]

Die Partikelgeschwindigkeiten sind im Vergleich zum ECE-Belag erhöht, wobei ein zur Relativgeschwindigkeit der Scheibe und Bremsmomentenverlauf proportionales Verhalten beobachtet werden konnte. Insgesamt fallen die Partikelgeschwindigkeiten geringer gegenüber der Relativgeschwindigkeit der Scheibe aus, wobei die Geschwindigkeiten grober ($> 31 \mu\text{m}$) und feiner Partikel ($\leq 5 \mu\text{m}$) nur geringfügig voneinander abweichen. Sekundärpatches, gespeist durch grobe und feine Partikel bilden sich dort aus, wo die Flächenpressung hoch ist. Zu Überspülungen durch einzelne, in der Regel feinere Partikel kommt es dort, wo die Flächenpressung niedriger ausfällt. Der Autor bestätigt die Erkenntnisse aus [ERI00, ERI01] zur Kompaktierung, Verfestigung und chemischen Zusammensetzung, beschreibt aber auch eine Zerstörung des Patches im Falle eines Drehzahlhochlaufes (z. B. zur Einstellung einer Initialgeschwindigkeit). In [GRA14] werden zudem unterschiedliche Arten von Sekundärpatches beschrieben, welche sich in Abhängigkeit von der Belagzusammensetzung bzw. der Oberflächenstruktur unterschiedlich ausbilden und dadurch auch die Ausbildung von Reibwert und partikelförmigem Verschleiß beeinflussen. Neben einer Glättung der Oberflächenstruktur (vgl. Abbildung 2-3) wird der eingelaufene Zustand durch die Ausbildung „breiartiger Partikelströme“ charakterisiert. Zudem konnte je nach Einlaufzustand und Belagzusammensetzung eine Änderung der Partikelgrößenverteilung und der Partikelanzahl festgestellt werden. Durch die noch fehlende Reibschicht kommt es zu Beginn der Einlaufprozedur zu einer Erhöhung des abrasiven Verschleißes, was zu einem Anstieg der Partikelgröße führt. Durch den Autor konnten die bereits beschriebenen Charakteristiken des eingelaufenen Zustandes, die allgemein homogenere Oberflächenstruktur durch die ausgebildete Reibschicht, geradlinigere Partikelbahnen und eine Reduktion der Partikeldurchmesser, bestätigt werden. Auch wurde beschrieben, dass unter Verwendung eines NAO-Belages typischerweise niedrigere Partikeldurchmesser in der Reibschicht vorkommen, was durch einen reduzierten Eisenanteil sowie homogenere Oberflächenstrukturen/-topografien erklärt wird. Für den verwendeten NAO-Belag konnte weiterhin eine Zunahme des Konzentrationsniveaus mit fortschreitendem Einlaufzustand nachgewiesen werden, was einem entgegengesetzten Verhalten zum kupferfreien

ECE-Belag darstellt. Untersuchungen zu periodischen Temperaturschwankungen in radialer Richtung des Reibringes, welche in Form von Hotbands oder Hotspots vorkommen, sind in [BRU98, DOE04, KLE06, MUS94, SAR09, SEV01, SEV03] enthalten. Thermoelastische Instabilitäten beeinflussen das Reib- und Verschleißverhalten und können zur Schädigung von Bremsscheibe und Reibbelag führen. Globale Reibeigenschaften in Form von Reibleistung oder Temperatur wirken gleichzeitig mit lokalen mikroskopischen Mechanismen und werden u. a. anhand des Reibwertes oder der Rauheit der Scheibenoberfläche spezifiziert. Das lokale Reibverhalten wird hingegen durch konzentrische und sich in ihrer Position periodisch-ändernde Ringe unterschiedlicher Temperatur bestimmt. Damit wird, wie bereits durch [ERI00, ERI01] beschrieben, die Momentenübertragung als ungleichförmig und als dynamische Größe klassifiziert. Es wurde zudem gezeigt, dass die Ausbildung der Temperaturen der Reibringe signifikant durch die Zusammensetzung des Reibbelages bestimmt wird. Schnell ablaufende, lokale Kraftübertragungen haben reduzierte Temperaturamplituden zur Folge. Als Ursache der in radialer Richtung periodisch oszillierenden Hotbands wird die Agglomeration von Verschleißpartikeln und einem daraus resultierenden Anstieg der Lastübertragung aufgeführt, indem sich tragende Elemente aufheizen und ausdehnen. Dem folgt ein Anstieg der Temperatur und des Verschleißes. Im Falle von Hotspots, welche durch eine in Umfangsrichtung ungleichförmige Temperaturverteilung charakterisiert sind und sich auf Wellenbergen des Reibringes ausbilden, können Temperaturunterscheide $> 300\text{ °C}$ zu den umgebenden Bereichen des Reibringes auftreten. Die kraftübertragenden, insbesondere welligen Bereiche sind durch eine erhöhte Flächenpressung und einen daraus resultierenden erhöhten Energieumsatz bzw. Wärmeeintrag gekennzeichnet. Infolge von thermischer Ausdehnung steigt die Flächenpressung weiter an und resultiert in einem deutlich erhöhten Verschleiß und einer zunehmenden Kraftübertragung durch benachbarte Bereiche [BOD12, GRA14].

Analysen chemischer- und physikalischer Eigenschaften der Reibpartner und der Reibschicht sowie oberflächenanalytische Untersuchungen mittels Lichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop (REM) mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) sind in [GRA14, OES01, OES06, OES07] beschrieben. Oberflächenanalysen ermöglichen die Untersuchung nanoskaliger Reibfilme, welche gemäß der Autoren eine Dicke von 50–100 nm aufweisen sowie Primär- und Sekundärplateaus bedecken. Die Dicke ist inhomogen und von der Oberflächenstruktur abhängig. Die im Reibfilm nachgewiesenen Elementkonzentrationen fallen für Reibbelag und Scheibe differenziert aus. Insgesamt überwiegt der Einfluss der Belagbestandteile auf die Zusammensetzung des Reibfilms, was auch durch [POE05, DES09] bestätigt wird.

2.3.2 Prüfumgebung und Probenahmesysteme

Aufbauend auf den vorgestellten Grundlagen zu den Vorgängen innerhalb der Reibzone, den Verschleißmechanismen und Verschleißprodukten (vgl. Abbildung 2-10) folgt eine Vorstellung unterschiedlicher Methoden der Probenahme unter variierenden Prüfumgebungen. Eine

grundsätzliche Unterscheidung der Prüfumgebungen erfolgt nach den in Tabelle 2-2 aufgeführten Merkmalen.

Tabelle 2-2: Unterscheidung von Prüfumgebungen

Prüfumgebung	Merkmale
Labor (Tribometer, Schwungmassen-Bremsenprüfstand)	Kontrollierbare und reproduzierbare Test- und Prüfbedingungen (z. B. Parametervorgabe/Testzyklus, Temperatur und Luftfeuchtigkeit); Anwendung realer Bremsenkomponenten, eingeschränkte Fahrwiderstandssimulation; Probenahme- und Partikelmesssystem für stationäre und mobile Anwendung
4-Rollenprüfstand / Gesamtfahrzeug	Kontrollierbare und reproduzierbare Test- und Prüfbedingungen (vgl. Labormessung); Messungen am Gesamt- oder Viertelfahrzeug (Corner Modul); Fahrwiderstandssimulation über Fahrwiderstandskennlinie; Probenahmesystem für mobile Anwendung, Partikelmesssystem für stationäre und mobile Anwendung
Realer Fahrversuch	Kaum kontrollierbare und ständig wechselnde Prüfbedingungen und Verkehrssituationen (geringe Reproduzierbarkeit); Probenahme- und Partikelmesssystem für mobile Anwendung

Bei allen Untersuchungen zur Bestimmung bremseninduzierter Emissionen besteht die Herausforderung darin, den Einfluss von Emissionen externer Quellen zu minimieren. Im Falle des realen Fahrversuches sind Einflüsse durch verbrennungsmotorische oder reifeninduzierte Emissionen vorausfahrender Fahrzeuge, Resuspension oder aus Quellen außerhalb des Verkehrssektors möglich. Zudem sind realitätsnahe Betriebsbedingungen bezüglich Temperaturverhalten und Kühlungsbedingungen, Rotationsgeschwindigkeit, Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten sowie der Geometrie der Reibpartner umzusetzen. Erst dadurch wird die Bestimmung repräsentativer chemisch-physikalischer Partikeleigenschaften und Emissionsfaktoren (Maß für die Quantifizierung der Emissionen einer Quelle) möglich.

Da bislang kein standardisiertes Verfahren zur Probenahme oder Messung existiert, sind in der Literatur zahlreiche, teils stark voneinander abweichende Konzepte zu finden. Als wesentliche Herausforderung der Probenahme ist die Gewährleistung eines effizienten Transportes supermikroner Partikel ($> 1 \mu\text{m}$) bis zur Probenahme-position sowie die Bereitstellung einer repräsentativen Probe, da signifikante Einflüsse durch Impaktion oder Sedimentation zu erwarten sind (vgl. Abschnitt 2.5) [SAN03]. Darüber hinaus resultiert aus unterschiedlichen geometrischen Gestaltungsweisen der Bremsenkomponenten und den instationären Strömungsbedingungen ein hochgradig inhomogenes Konzentrationsprofil, was die Erfassung einer repräsentativen Probe, insbesondere über den Verlauf eines Prüfzyklus mit variierenden Geschwindigkeiten und Verzögerungen, zur Herausforderung macht. Die in [ALE18, FED18, LYU19, VER16, WAH17] aufgeführten Studien wurden anhand einer Tribometer-Konfiguration durchgeführt. Die Prüfbedingungen weichen jedoch von der Realität ab und besitzen für Grundlagenuntersuchungen zu Reibung und Verschleiß, nicht jedoch für repräsentative Messungen von Bremsstaubpartikeln, Gültigkeit. Die in [AGU17, FAR19b, GAR00, GRA17, HAG15, HAG16, HAS09, IJ07, KUK11, MAT17, PER18, SAN03, WAH10b] beschriebenen

Untersuchungen an einem Schwungmassen-Bremsenprüfstand (SMP) erfolgen unter Nutzung eines Probenahmesystems, welches dem aus der Verbrennungsmotorik bekannten Prinzip eines Konstantvolumen-Probenahmesystems (CVS) naheliegt. Das Bremssystem wird durch ein offenes oder geschlossenes System umgeben, aus dem das partikelbeladene Aerosol über einen konstanten Volumenstrom zu einer Probenahme-position transportiert wird. Der Einfluss externer Emissionsquellen wird teilweise durch eine vorgeschaltete Filterstufe reduziert.

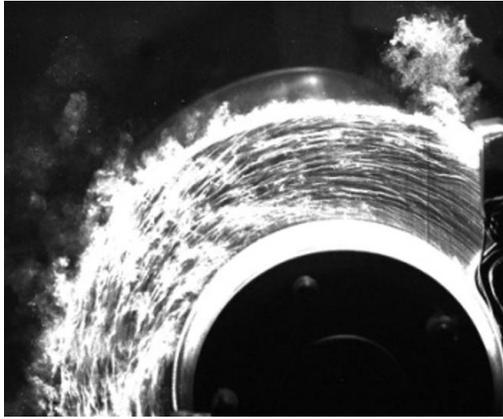


Abbildung 2-10: Partikelverteilung über den Verlauf des Reibringes [AUG19b]

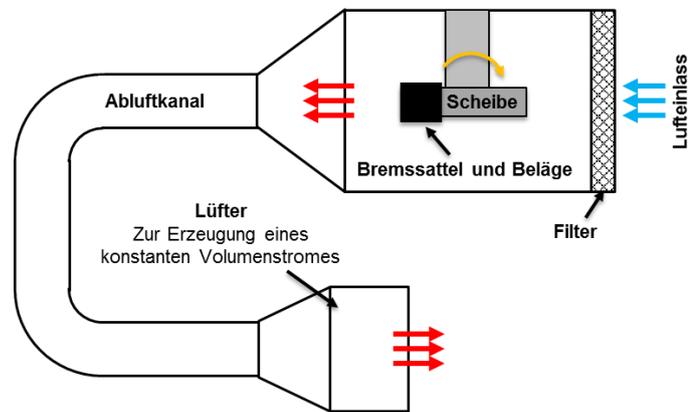


Abbildung 2-11: Funktionsprinzip eines Konstantvolumen-Probenahmesystems [HES19a]

Die beschriebenen Konstantvolumen-Probenahmesysteme bestehen aus einer Umhüllung mit Filter, einem Absaugrohr mit integrierter Probenahmesonde und einem Ventilator zur Einstellung eines Druckgefälles [AUG19a, AUG20]. In [CHA18, MAT19] werden Gesamtfahrzeug-Untersuchungen auf einem 4-Rollenprüfstand vorgestellt. Dabei kommen offene Probenahmesysteme ohne adaptierte Filtereinheit zur Anwendung. Unter Simulation realitätsnaher Fahrwiderstände und Testzyklen wird die Bestimmung realitätsnaher Emissionsfaktoren möglich. Als Herausforderung der vorgestellten offenen Konzepte sind Einflüsse durch externe Emissionsquellen (z. B. verbrennungsmotorische Emissionen, Abrieb aus dem Reifen-Rollen-Kontakt) und eine Beeinflussung der Strömungs- und Kühlungsbedingungen zu nennen. In [MAT19] wurden Temperaturabweichungen von bis zu 109 °C zwischen Bremse mit und ohne Umhüllung nachgewiesen, die zur Partikelbildung < 100 nm beitragen und das Messergebnis signifikant beeinflussen. In [KWA13, MAT11, MAT12a, MAT12b, WAH08, WAH10a, WAH14] werden unterschiedliche Konzepte zur Partikelerfassung im realen Fahrversuch vorgestellt. Als nachteilig bei der Anwendung stellt sich die Wirkung von Umgebungseinflüssen sowie die begrenzte Transporteffizienz und Repräsentativität der Probenahme heraus.

2.3.3 Messung und Klassifizierung

Gemäß Abschnitt 2.3.1 fällt die Verschleißrate je nach Reibmaterial differenziert aus. Zudem werden die chemisch-physikalischen Partikeleigenschaften (z. B. Größe und Form) sowie die daraus resultierenden Emissionsfaktoren signifikant von den Fahrparametern (z. B. Geschwindigkeit und Bremsdruck) oder der thermischen Beanspruchung infolge von Energiedissipation

beeinflusst. Letztlich ist auch durch den Konditionierungszustand oder den Einfluss von Korrosion eine Abhängigkeit zu erwarten. Aus zahlreichen Studien geht hervor, dass nur ein Teil des Verschleißes als luftgetragene Partikel an die Umgebung emittiert wird. Gemäß [BAR07, GAR00, KUK11, SAN03] sind etwa 50 % der emittierten Partikel einem Größenbereich $< 20 \mu\text{m}$ zuzuordnen, wobei nach [GAR00, HAR12, KUM13, KUK11, MOS04, SAN03, WIK09] etwa 40 % einen Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$ aufweisen. Die überbleibenden Anteile werden auf Teilen des Fahrzeuges oder der Straße abgeschieden. Die höchsten Konzentrationen können nach [KEN02] auch mit zeitlichem Versatz im Bereich vielbefahrener Kreuzungen, Ampeln, Fußgängerüberwegen oder Kurven nachgewiesen werden. Die in [BUK09, GAS09, HAR12, LAW13, RIE08] vorgestellten Studien, die auf Messungen im städtischen Umfeld basieren, präsentieren einen durch die Bremse verursachten Anteil von bis zu 55 % am Gesamtbudget außermotorischer PM₁₀-Emissionen und bis zu 21 % am Gesamtbudget verkehrsbedingter PM₁₀-Emissionen. In der Sektion Autobahn können nach [ABU03, BUK09] infolge einer reduzierten Anzahl an Bremsmanövern geringere Anteile gegenüber den Sektionen Stadt und Landstraße nachgewiesen werden. Infolge der zunehmenden Reduktion verbrennungsmotorischer Emissionen durch effizientere Antriebs- und Abgasnachbehandlungssysteme sowie alternativer Antriebskonzepte (z. B. Hybrid- und Elektroantrieb) werden die genannten Anteile zukünftig weiter steigen [AMA14, DEN13, PAN13, WIK09].

In Tabelle 2-3 sind Literaturangaben zur anzahl- und massebezogenen Partikelgrößenverteilung gegenübergestellt. Allgemein geht aus den Angaben für die Partikelanzahl und -masse eine monomodale Größenverteilung mit einem Anzahlpeak zwischen 1 und 3 μm sowie einem Massenpeak zwischen 2 und 6 μm hervor. Durch [IJJ07, KUK11, RIE08, SAC16, SAN03, VON05, WAH10b] konnten jedoch auch Anteile des ultrafeinen Spektrums ($< 100 \text{ nm}$) bei einer anzahlbezogenen bimodalen Verteilung nachgewiesen werden. Die Bildung resultiert nach [KUK11, SAC16] aus einer erhöhten thermischen Beanspruchung während der Bremsung, wobei sich die angegebenen kritischen Temperaturschwellen unterscheiden. Insgesamt wird von einer anzahlbezogenen monomodalen Verteilung unter moderaten Beanspruchungen und von einer bimodalen Verteilung unter hohen Beanspruchungen, d. h. insbesondere unter Temperatureinfluss, berichtet. Von den aufgeführten Größenbereichen abweichende Messwerte resultieren einerseits aus der Verwendung einer Vielzahl von Reibmaterialien sowie unterschiedlicher Probenahmesysteme mit jeweils charakteristischen und voneinander abweichenden Transporteffizienzen, die keine direkte Vergleichbarkeit ermöglichen. Weiterhin erfolgt keine Unterscheidung zwischen lokal auftretenden Spitzentemperaturen und globalen Reibringtemperaturen. Verzögerungen mit hohen Energiedichten finden dabei kaum Berücksichtigung. Im Besonderen sind jedoch die unterschiedlichen physikalischen Partikelmessprinzipien mit direkter oder indirekter Bestimmung der Messgröße sowie voneinander abweichenden Partikelgrößenbereichen (primär zur Analyse des submikronen Spektrums: $< 1 \mu\text{m}$) und

Arten der Aerosolvorbereitung als Einflussgrößen zu nennen. Besondere Beachtung ist unter Verwendung von Messsystemen mit indirekter Bestimmung der Messgröße, wie z. B. bei differenziellen Mobilitätsanalysatoren zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration oder größen aufgelösten Anzahlkonzentration zu legen. Hinsichtlich der Feinstaubklassen (vgl. Abschnitt 2.1) ist daher im Rahmen dieser Arbeit ein Vergleich unterschiedlicher physikalischer Partikelmessprinzipien anzustreben, welche sich bezüglich der direkten und indirekten Bestimmung der Messgröße unterscheiden. Dadurch können Einflüsse des Messprinzips zur Analyse partikelförmiger Bremsenemissionen verifiziert werden. Die Bestimmung von Emissionsfaktoren erfolgt unter Laborbedingungen durch die direkte Messung, wobei typischerweise ein Teilvolumen analysiert wird. Aus [DEN18, GAR00, GRI15, IJ08, SAN03] können Messwerte für Personenkraftwagen (PKW) mit teils hohen Streuungen nachgewiesen werden. Massenbezogene Emissionsfaktoren (Gesamtfahrzeug) werden mit 2–8,1 mg/km (PM10) bzw. 1–5,5 mg/km (PM2.5) angegeben. Nach [WAK17] teilen sich diese in sektionale Emissionsfaktoren (PM10) von 11,7 mg/km (Stadt), 5,5 mg/km (Land) und 1,4 mg/km (Autobahn) auf. Anzahlbezogene Emissionsfaktoren sind kaum veröffentlicht. Verfügbare Werte variieren je nach Temperaturprofil zwischen $1,5E+09$ und $3,0E+12$ #/km je Bremse [ALE17, MAT19].

Tabelle 2-3: Gegenüberstellung von Literaturangaben zur anzahl- und massebezogenen Partikelgrößenverteilung

Quelle	Reibbelag	Partikelgrößenverteilung	Messmethode
GAR00	Semimetallisch / NAO	Massenpeak: 0,1–1 μm (monomodal) bei Anteilen von 86 % (PM10) und 63 % (PM2.5)	MOUDI (0,056–18 μm) am SMP
SAN03	Semimetallisch, ECE und NAO	Anzahlpeak: 0,05–0,3 und 1 μm (bimodal); Massenpeak: 4–5 μm (Monomodal) bei Massenanteilen von 63–85 % (PM10)	MOUDI (0,056–8 μm) und ELPI (0,029–10,12 μm) am SMP
VON05	Scheibe, Trommel	Anzahlpeak: 0,5–1 μm (monomodal); Massenpeak: 2–3 μm (monomodal)	OPC (0,3–10 μm) am SMP
IJ07, IJ08	NAO	Anzahlpeak: 0,8–1 μm und 1–2 μm (bimodal); Massenpeak: 2 μm und 3–6 μm (monomodal) bei 95–98 % (PM10) bzw. 56–70 % (PM2.5)	APS (0,5–20 μm) am SMP
WAH10b	ECE und NAO	Anzahlpeak: 0,28 μm , 0,35 μm und 3–4 μm (multimodal)	OPC (0,25–32 μm), SMPS (0,1–10 μm) für pin-on-disc-Versuche
KUK11	ECE	Anzahlpeak: 0,1–0,3 μm und 1–2 μm (bimodal); Massenpeak: 2–4 μm (monomodal)	APS (0,5–20 μm), SMPS (0,01–0,445 μm) und BLPI (0,037–9,5 μm) am SMP
MAT11	ECE	Anzahlpeak: 0,01 μm und 0,04 μm (bimodal)	EEPS (0,0056–0,56 μm) im realen Fahrversuch
KWA13	ECE	Massenpeak: 1–10 μm (monomodal)	DustTrak (0,3–20 μm) und APS (0,5–20 μm) im Fahrversuch und 4-Rollenprüfstand
SAC16	ECE	Anzahlpeak: 0,01 μm und 0,2 μm (bimodal)	DMA (0,005–1 μm) am SMP

2.4 Physikalische Messprinzipien

In der in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Literatur kommen Messsysteme mit unterschiedlichsten physikalischen Messprinzipien zur Bestimmung von Partikelanzahl, Partikelmasse und Größenverteilungsdichte zur Anwendung. Mit dem Kondensationspartikelzähler (Partikelanzahlkonzentration), dem Photoakustiksensor (Partikelmassenkonzentration) oder dem gravimetrischen Verfahren (Massezuwachs eines Filters) kommen im Rahmen dieser Arbeit Partikelmessprinzipien zum Einsatz, welche insbesondere für die gesetzeskonforme Bestimmung anzahl- und massebezogener Emissionsfaktoren verbrennungsmotorischer Abgasemissionen konzipiert sind. Mithilfe eines elektrischen Niederdruck-Kaskadenimpaktors zur indirekten Bestimmung einer größen aufgelösten Anzahlkonzentration in Bezug auf die Feinstaubklassen wird zusätzlich der Einfluss elektrisch-basierter Messsysteme bewertet.

Kondensationspartikelzähler (CPC)

Das einströmende Aerosol wird durch eine Zone gesättigten Butanol- oder Isopropanoldampfes (Saturator) geleitet. Als Kondensationskerne vergrößern sich vorwiegend kleinere Partikel, was eine optische Erfassung mittels Streulichtdetektors ermöglicht. Nach dem Auftreffen des Laserstrahls auf dem Partikel wird das gestreute oder abgeschwächte Licht von Photodioden erfasst und in elektrische Impulse umgewandelt. CPCs messen die im Aerosol befindlichen Partikel in einem spezifischen Niederkonzentrationsbereich im Single-Count-Mode. Im mittleren Konzentrationsbereich wird das Signal korrigiert und im Hochkonzentrationsbereich wechselt der Zähler in den Photometric Mode. Hierbei werden keine Einzelstreusignale detektiert, sondern ein Summensignal ausgewertet. Zur Anwendung kommen im Rahmen dieser Arbeit CPCs mit unterschiedlicher Zähleffizienz D50 (2,5, 10 und 23 nm) sowie eine mobile 10 nm-Version (PN-PEMS) [BAR13, BER08]. Aufgrund der direkten Messung der Anzahlkonzentration stellt das beschriebene physikalische Partikelmessprinzip die Referenz zur Bestimmung anzahlbezogener Emissionsfaktoren dar.

Gravimetrische Filtermessungen

Aus der gesetzlich vorgeschriebenen Prozedur zur Bestimmung der je Testzyklus emittierten Partikelmasse verbrennungsmotorischer Abgasemissionen (Emissionsfaktor: mg/km) abgeleitet, erfolgt die Verwendung von teflonbeschichteten 47 mm-Glasfaserfiltern (Pallflex TX40 HI20WW) in einem Filterhalter mit vorgeschaltetem Vorabscheider und nachgeschalteter Vakuumpumpe. Durch die direkte Bestimmung des Massenzuwachses (Gravimetrie) stellt dieses Messprinzip die Referenz zur Bestimmung massebezogener Emissionsfaktoren dar.

Photoakustische Spektroskopie (PAS)

Der Photoakustiksensor basiert auf dem photoakustischen Effekt und ermöglicht die dynamische Messung der Massenkonzentration von Kohlenstoffpartikeln (carbon black). Die Probe

wird mittels moduliertem Laserstrahl beleuchtet. Rußpartikel absorbieren den periodisch modulierten Laserstrahl, woraus eine periodische Erwärmung und Abkühlung der Partikel bei einer Ausdehnung und Kontraktion des Trägergases resultiert. Die dabei entstehenden Schallwellen werden mittels Mikrofonen erfasst und in eine Massenkonzentration umgerechnet (bis zu $5,0E-05 \text{ mg/cm}^3$) [SCH04]. Aufgrund der komplexen chemischen Zusammensetzung von Reibbelag und Bremsscheibe ist eine eingeschränkte Messfähigkeit zu erwarten.

Elektrischer Niederdruck-Kaskadenimpaktor (ELPI)

Die Partikel werden durch eine beschleunigende Düse geführt. Das Aerosol wird durch nachfolgend angeordnete Impaktorplatten zu einer Richtungsänderung gezwungen. Infolge von Trägheit können Partikel eines spezifischen Trenndurchmessers (aerodynamische Durchmesser) der Richtungsänderung nicht folgen und scheiden ab. Durch die serielle Anordnung von Impaktorplatten mit abnehmendem Düsendurchmesser (Kaskadenimpaktor) werden die Partikel größenfraktioniert selektiert. Die Partikel werden vor Eintritt in den Impaktor elektrisch geladen. Zum Zeitpunkt der Abscheidung auf den voneinander isolierten Impaktorstufen erfolgt ein Ladungsaustausch, welcher mittels Elektrometern in Echtzeit detektiert wird [BAR13]. Damit ermöglicht der elektrische Niederdruck-Kaskadenimpaktor die Bestimmung einer größen aufgelösten Anzahlkonzentration über einen Größenbereich von $0,006\text{--}10 \mu\text{m}$.

2.5 Aerosoldynamische Beschreibung

Als Aerosol wird ein disperses System von sub- oder supermikronen Partikeln in einer Gasphase definiert, wobei die Partikel in fester und/oder flüssiger Form auftreten können. Submikrone Partikel sind einem Größenbereich $< 1 \mu\text{m}$ zuzuordnen, wobei supermikrone Partikel einen Durchmesser $> 1 \mu\text{m}$ aufweisen [SAG07, SCH01]. Unter Partikelverlust wird die Abscheidung auf den Innenwänden einer betrachteten Geometrie verstanden. Die Bewertung der Deposition in durchströmten Geometrien erfolgt nach folgendem Zusammenhang:

$$D = 1 - P \quad (2.1)$$

Dabei entspricht P der Penetrationsrate (Durchdringungsgrad) und D der Depositionsrate. Optimale Durchdringung liegt vor, wenn ein Minimum an Partikelabscheidung vorliegt [MCF89, WON96]. Als aerosoldynamischer Prozess wird die Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Aerosols bezeichnet. Der aerosoldynamische Prozess ist nie vollständig abgeschlossen und dauert kontinuierlich an. Zu unterscheiden ist zwischen internen und externen Prozessen [FRI77]. Interne Prozesse beeinflussen in erster Linie den Zustand der Partikel, d. h. die Größe und/oder die Form. Als Beispiele hierfür sind Kondensation oder Koagulation zu nennen. Infolge der geringeren Relevanz der internen Prozesse auf den vorliegenden Anwendungsfall werden diese nachfolgend nicht weiterführend beschrieben. Bei externen Prozessen erfolgt nach [SAG07] die Beeinflussung der Partikel durch externe Kräfte.

Entsprechend dem in Abschnitt 2.3.3 präsentierten Stand der Forschung zeichnen sich Bremsenemissionen unter Annahme realer Fahrbedingungen (z. B. WLTC) und einem Temperaturbereich $< 200\text{ °C}$ (monomodale Verteilung) durch mittlere Partikeldurchmesser aus, die dem supermikronen Partikelspektrum zuzuordnen sind. Besondere Berücksichtigung finden in teils hochgradig turbulenten Strömungen damit die Mechanismen Wirbelträgheit, Impaktion (Trägheitsabscheidung) sowie teils Sedimentation [AUG20, AUG19a, AUG19b, SCH01].

Wirbelträgheit

Partikel mit einem kritischen Durchmesser d_p können Turbulenzschwankungen der sie tragenden Strömung häufig nicht folgen und sich an der Innenwand der durchströmten Geometrie abscheiden. Der in [LIU74] beschriebene Ansatz zur Berechnung eignet sich insbesondere zur Modellierung der Depositionsgeschwindigkeit v_d supermikroner Partikel und stellt in die dimensionsbehaftete Form überführt den folgenden Zusammenhang dar [SAG07, LIU74]:

$$v_d = \frac{0,0001}{54} \cdot \frac{d_p^4 \cdot \rho_p^2}{\eta^2 \cdot v^2} \cdot \left(\bar{v} \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \right)^5 \quad (2.2)$$

Neben Einflüssen von der Partikeldichte ρ , der mittleren Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} und der dynamischen Viskosität η erfolgt die Berücksichtigung der vierten Potenz des Partikeldurchmessers d_p , wodurch der Wirbelträgheit eine der maßgeblichen Abscheidemechanismen in turbulent durchströmten Rohrgeometrien zuteilwird. Zur Reduktion des Einflusses der Wirbelträgheit in turbulenten Strömungen ist eine Laminarisierung der Strömung durch einen erhöhten Rohrdurchmesser d_R bzw. einer Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit anzustreben sowie Kurven mit kleinen Radien und abrupte Querschnittsübergänge zu vermeiden. Speziell die erste Forderung geht für den vorliegenden Anwendungsfall bei konstantem Volumenstrom mit einer Reduktion der messbaren Partikelanzahl- oder Massenkonzentration bei Teilstromentnahme sowie mit einer reduzierten Evakuierungszeit bzw. erhöhten Partikelverweilzeit (Zeit der betrachteten Partikel innerhalb eines Kontrollvolumens) und einer erhöhten Beeinflussung durch Sedimentation einher, sodass dynamische Fahrscenarien nur ansatzweise abgebildet werden können. Im vorliegenden Anwendungsfall sind zusätzliche Einflüsse auf das innerhalb der Umhausung gegebene Strömungsprofil und den Einfluss der Wirbelträgheit durch die Geometrie von Scheibe, Bremssattel und Radträger sowie durch eine überlagerte Strömung infolge des Einflusses der Scheibenventilation zu erwarten. Letztere ist besonders als Funktion von der Rotationsgeschwindigkeit zu bewerten. Zudem ist für unterschiedliche Bremsengeometrien eine differenzierte Beeinflussung zu erwarten, wodurch die innerhalb eines Probenahmesystems vorliegenden Strömungsbedingungen, insbesondere auch infolge differenzierter Sattelgeometrien, nur schwer vergleichbar sind.

Impaktion (Trägheitsabscheidung)

Die Trägheitsabscheidung ist wie die Gravitation nicht rotationssymmetrisch, weshalb der Einfluss, insbesondere bei Richtungsänderungen der Strömung (vgl. Abbildung 2-12), d. h. in Form von Trägheitsabscheidung in Krümmungen wirkt. Hierbei verlassen die Partikel infolge ihrer Trägheit die Stromlinien. Entscheidend dafür, dass sich der Partikel auf den neuen Bewegungszustand einstellt, ist die Partikelmasse m_p . Die durch Trägheit hervorgerufene radiale Geschwindigkeit v_r , die zur Partikelabscheidung führt, kann unter Beachtung der mittleren Verweilzeit \bar{t} vereinfachend angenommen werden als [SAG07]:

$$v_r = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot \bar{v} \cdot \sin\varphi}{18 \cdot \eta \cdot \bar{t}} \quad (2.3)$$

Ein Zusammenhang zwischen Reynoldszahl und Partikelabscheidung ist in [SAG07] beschrieben. Demnach steigt die Abscheidewahrscheinlichkeit eines Partikels unter Zunahme der Reynoldszahl (für den Fall konstanter Rohrgeometrien unter Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit) infolge erhöhter Auslenkung im Rohrbogen.

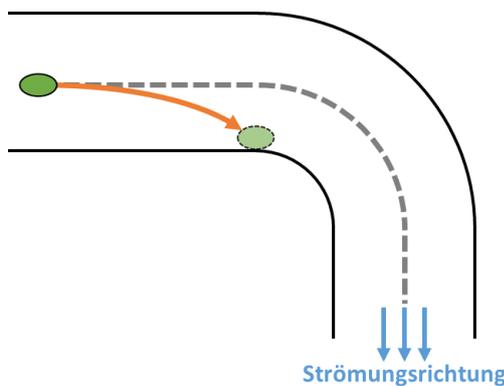


Abbildung 2-12: Einfluss der Impaktion auf die Partikelbewegung im durchströmten Rohr

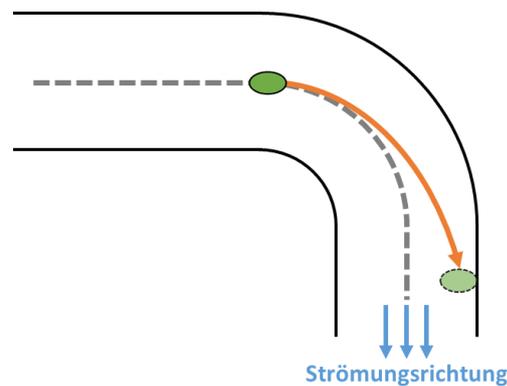


Abbildung 2-13: Einfluss der Sedimentation auf die Partikelbewegung im durchströmten Rohr

Entsprechend steigt die kritische Reynoldszahl unter Zunahme des Rohrbogenradius und des Rohrdurchmessers. Nach [LIU74] sind Radien des Rohrbogens derart auszuwählen, dass abrupte Richtungsänderungen vermieden werden (DIN 25423). Als geeignet wird ein Krümmungsradius gefordert, der das 30-fache des Rohrradius beträgt, was in modernen und kompakten Partikelmesssystemen zum Transport supermikroner Partikel (typischerweise bis $2,5 \mu\text{m}$) kaum umsetzbar ist [SCH01]. Entsprechend ist für Partikel $> 5 \mu\text{m}$ bereits bei vergleichsweise niedrigen Reynoldszahlen (< 10.000) mit signifikanten Partikelabscheidungen zu rechnen. Ein erhöhter Rohrdurchmesser innerhalb eines Probenahmesystems geht mit den bereits beschriebenen Nachteilen (z. B. reduzierter Konzentration) einher.

Sedimentation

Die am Partikel angreifende Kraft setzt sich unter Berücksichtigung des Schwerfeldes der Erde aus der Summe von Schwerkraft und Auftriebskraft zusammen (vgl. Abbildung 2-13) [SCH01]. In turbulenten Strömungen kann die Auswirkung der Gravitation in Rohrbögen (die

Abscheidung ist definiert als Sedimentation) vernachlässigt werden. Die Wirkung ist in Abhängigkeit von der Reynoldszahl (beeinflusst durch Strömungsgeschwindigkeit und Rohrgeometrie) für Partikeldurchmesser $> 2\text{--}5\ \mu\text{m}$ nachweisbar, für den vorliegenden Anwendungsfall jedoch als klein einzustufen [SAG07, SCH01]. Die Berechnung der resultierenden Depositionsgeschwindigkeit infolge der Schwerkraft erfolgt gemäß des folgenden Zusammenhanges, wobei ein signifikanter Einfluss dem Partikeldurchmesser zuzuweisen ist [SAG07]:

$$v_d = \frac{\rho_p \cdot g \cdot d_p^2}{18 \cdot \eta} \quad (2.4)$$

Zur Reduktion der Partikeldeposition infolge der Gravitation sind kleine Rohrdurchmesser auszuwählen, was zur Reduktion der Partikelverweilzeit führt. Nachteilig kann bei entsprechender geometrischer Gestaltung des Probenahmesystems die Zunahme weiterer Transportmechanismen (z. B. Impaktion in Rohrbögen) sein. Darüber hinaus ist der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit zur Gewährleistung isokinetischer Probenahmebedingungen essentiell.

Damit ist festzuhalten, dass die bei der Probenahme partikelförmiger Bremsenemissionen einflussreichen Mechanismen für die weite Spanne an Partikeldurchmessern, Partikeldichten sowie Initial- und Strömungsgeschwindigkeiten vielfältig sind und in ihrer Wirkung differenziert auftreten können. Besondere Beachtung gilt dabei der Bestimmung der Partikelmasse bis hin zu einem Partikeldurchmesser von $10\ \mu\text{m}$ (PM₁₀). Bereits geringe Anteile von Partikelverlusten $> 5\ \mu\text{m}$ können einen signifikanten Einfluss auf den massebezogenen Emissionsfaktor ausüben, wohingegen der Einfluss auf den anzahlbezogenen Emissionsfaktor kaum aufgelöst werden kann. Im Vergleich zur Probenahme verbrennungsmotorischer Emissionen sind damit neue Ansätze zur Entwicklung effizienter Probenahmesysteme zu definieren. Durch die vielfältigen Anforderungen an die Probenahme (z. B. Transporteffizienz, Uniformität, Partikelverweilzeit und messbare Konzentration infolge des Verdünnungsgrades) ist die Festlegung der geometrischen Gestaltung von Umhausung und Abluftkanal insgesamt als Kompromissentscheidung zu betrachten. Eine Zusammenfassung von Anforderungen zum geometrischen Design eines Probenahmesystems erfolgt in Abschnitt 4.6.

2.6 Grundlagen der Strömungslehre

Die Modellierung der komplexen Vorgänge des Partikelinjektions- und Partikelaußbreitungsverhaltens am Beispiel trockenlaufender Radbremsen erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit unter Anwendung der numerischen Strömungssimulation (CFD). Dazu werden im Rahmen dieses Abschnittes die Grundlagen der Strömungslehre beschrieben.

2.6.1 Strömungszustände

Grundlegend lassen sich Strömungen in laminar und turbulent unterteilen, wobei im Übergangsbereich auch Mischformen vorliegen können. Der für die Strömungsform maßgebende

Parameter ist die Reynoldszahl Re , welche als Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften wie folgt definiert ist [LAU09, ZIE15]:

$$Re = \frac{\rho_p \cdot \bar{v} \cdot d_p}{\eta} \quad (2.5)$$

Strömungen mit $Re < 2300$ sind stets laminar. Turbulenz setzt ein, wenn die destabilisierenden Trägheitskräfte über die stabilisierenden Reibungskräfte überwiegen, d. h. wenn $Re > 2300$ ist. Turbulente Strömungen sind grundsätzlich instationär, nichtperiodisch und weisen dreidimensional fluktuierende Wirbelstrukturen auf. Die Turbulenz verändert das Geschwindigkeits- und Temperaturfeld und wirkt sich maßgeblich auf den Stofftransport aus. Für den in dieser Arbeit vorliegenden Anwendungsfall ist von einem hohen Grad an Turbulenz ($Re \gg 2300$) auszugehen. Dies resultiert aus der Forderung nach schneller Evakuierung zur Abbildung des Konzentrationsverlaufes einzelner, in schneller Sequenz aufeinanderfolgender Verzögerungen (Zyklus) und nach reduziertem Einfluss der oben beschriebenen Transportmechanismen.

2.6.2 Grundgleichungen der Strömungsmechanik

Die Beschreibung einer Strömung ist an jedem Punkt und zu jeder Zeit anhand der Größen der Geschwindigkeit $\vec{v} = (u, v, w)$, des Druckes p , der Dichte ρ und der Temperatur T möglich. Die Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung), Energiegleichung (Energieerhaltung) und das Kräftegleichgewicht (Impulssatz oder auch Navier-Stokes-Gleichungen) stellen die Basis der numerischen Strömungsberechnung dar. Diese Grundgleichungen beziehen sich auf ein infinitesimal kleines Volumenelement im Fluidraum mit parallel verlaufenden Kanten zu den Koordinatenachsen x, y, z [OER15]. Die zeitliche Änderung der Masse in einem Volumenelement mit den Kantenlängen dx, dy und dz entspricht der Differenz aus einströmenden und ausströmenden Massenströmen (vgl. Abbildung 2-14) [BRA18].

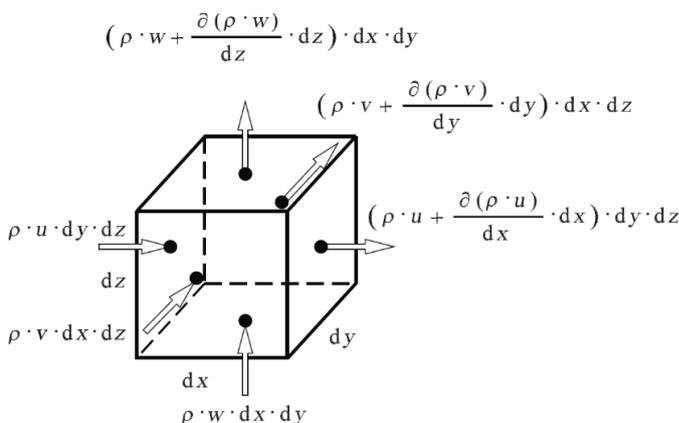


Abbildung 2-14: Ein- und ausströmende Massenströme [OER15]

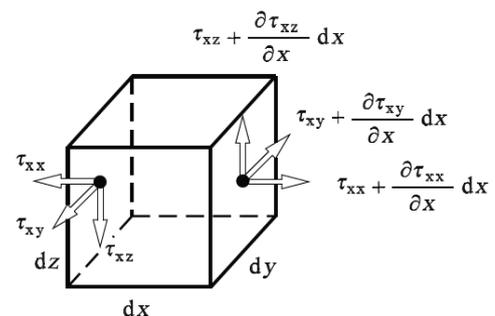


Abbildung 2-15: Normal- und Schubspannungen in x-Richtung [OER15]

Für ein inkompressibles Fluid ergibt sich die vereinfachte Kontinuitätsgleichung zu [OER15]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

Die Navier-Stokes-Gleichung beschreibt, in analoger Weise zur Massenerhaltung, die Erhaltung des Impulses im zuvor betrachteten Volumenelement. Als Ursache für die Impulsänderung innerhalb des Volumenelements werden Volumenkräfte sowie Normal- und Schubspannungen (vgl. Abbildung 2-15) genannt. Volumenkräfte wirken hierbei direkt auf die im Volumen befindliche Masse (z. B. Schwerkraft, elektrische und magnetische Kräfte). Normalspannungen setzen sich aus einem Druckanteil und einem reibungsabhängigen Geschwindigkeitsanteil zusammen [OER15, ZIE15]. Für inkompressible Strömungen vereinfacht sich die Navier-Stokes-Gleichung in koordinatenfreier Schreibweise der Vektoranalysis zu:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = \vec{k} - \nabla p + \mu \cdot \Delta \vec{v} \quad (2.7)$$

Dabei entspricht \vec{k} den Volumenkräften. Die Beschreibung der zeitlichen Änderung von innerer und kinetischer Energie eines Volumenelements erfolgt anhand der Energiegleichung. Die Beeinflussung der Gesamtenergie resultiert aus dem Transport von innerer und kinetischer Energie, durch Wärmeleitung, durch die Arbeit, die durch Druck-, Normalspannungs- und Schubspannungskräfte geleistet wird, oder auch infolge der oben beschriebenen Volumenkräfte [ZIE15, BRA18]. Im Falle perfekter kalorischer Gase und mittels der Boussinesq-Approximation folgt die vereinfachte Energiegleichung:

$$\rho \cdot c_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \lambda \cdot \Delta T \quad (2.8)$$

Die Lösung des momentanen Fluidgeschwindigkeitsfeldes gibt im Falle von Turbulenzerscheinungen nicht mehr das allgemeine Erscheinungsbild des Strömungsfeldes wieder. Hierzu werden Daten über die turbulenten Eigenschaften des Strömungsfeldes benötigt, weshalb die Turbulenz mit einem statistischen Ansatz beschrieben wird. Unter Annahme der turbulenten Strömung als eine Überlagerung der Grundströmung durch eine ungeordnete, stochastische Bewegung resultiert daraus eine Aufspaltung der turbulenten Strömungsgrößen. Diese Reynoldssche Zerlegung in Mittelwert und Schwankungsgröße wird in die Transportgleichung implementiert, woraus die Aufstellung der Grundgleichungen für die Eulersche Berechnung anhand zeitgemittelter Erhaltungsgleichungen folgt [ZIE15, LAU09]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + S_u \quad (2.10)$$

Der in der Impulstransportgleichung enthaltene Tensor 2. Ordnung, welcher als Reynoldsspannungstensor bezeichnet wird, stellt die Korrelation der Schwankungsbewegungen dar. Anhand dieses Tensors erfolgt die Beschreibung des Transportes des mittleren Impulses durch die turbulenten Fluktuationen. Durch den unbekanntem Reynoldsspannungstensor ist

das Gleichungssystem jedoch nicht geschlossen lösbar, d. h. die Zahl der unbekanntes übersteigt die Zahl der verfügbaren Gleichungen, weshalb die Modellierung des Reynolds-Spannungstensors im Falle des sogenannten Schließproblems erforderlich wird [ANH04, OER15].

2.6.3 Turbulenzmodellierung der Fluidphase

Turbulenzmodelle werden anhand der Anzahl der enthaltenen partiellen Differentialgleichungen geordnet, welche zur Beschreibung der turbulenten Viskosität μ berücksichtigt werden. Modelle der Schließung erster Ordnung sind das algebraische Turbulenzmodell, Ein-Gleichungsmodell und κ - ε -Turbulenzmodell. Modelle der Schließung zweiter Ordnung sind das Reynoldsspannungs-Transportmodell und das algebraische Reynoldsspannungsmodell. Das meistgenutzte Turbulenzmodell zur Schließung der Erhaltungsgleichungen ist das κ - ε -Turbulenzmodell, wobei die Reynoldsspannungen anhand der Wirbelviskosität beschrieben werden. Die turbulente Wirbelviskosität steht im Zusammenhang mit der turbulenten kinetischen Energie und ihrer Dissipationsrate. Für viele Strömungsprobleme ergeben sich dadurch akzeptable Übereinstimmungen mit experimentellen Untersuchungen. Die Anwendung bei komplexeren Strömungsproblemen zeigt jedoch Nachteile, was infolge der linear vorgegebenen Spannungs-Deformationsrate-Beziehung sowie den damit einhergehenden Herausforderungen bei der Beschreibung von Strömungen, welche keinen spektralen Gleichgewichtszustand aufweisen, resultiert. Nachteilig ist weiterhin die Unempfindlichkeit bezüglich der Orientierung der turbulenten Strukturen und der Anisotropie der Normalspannung [ANH04].

Mithilfe des Reynoldsspannungs-Transportmodells wird die Reynoldsspannung aus den modellierten Transportgleichungen bestimmt. Die Transportgleichungen werden für die sechs Reynoldsschen Spannungskomponenten in kartesischen Koordinaten wie folgt definiert:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i u_j})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_k \overline{u_i u_j})}{\partial x_k} = P_{ij} + \Phi_{ij} + D_{ij} - \rho \varepsilon_{ij} \quad (2.11)$$

Dabei entspricht P_{ij} dem Produktionsterm und D_{ij} dem Term, welcher die turbulente Diffusion repräsentiert. Letzterer stellt den Vorgang des Turbulenztransportes durch die turbulenten Fluktuationen, Druckschwankungen und viskosen Kräfte dar. Φ_{ij} entspricht dem Umverteilungsterm oder auch Druck-Scher-Korrelationsterm, wobei infolge der Druck-Spannungs-Wechselwirkung das Turbulenzfeld beeinflusst wird und sich das Strömungsverhalten der isotropen Turbulenz annähert. Die Bestimmung der Reynoldsspannung aus der Transportgleichung erfolgt aus der Modellierung der Druck-Scher-Korrelation. Letztlich wird die Dissipationsrate ε_{ij} berücksichtigt. Die Beschreibung des Geschwindigkeitsprofils im logarithmischen Bereich der turbulenten Grenzschicht erfolgt anhand des universellen Wandgesetzes mit der mittleren Geschwindigkeit \bar{v} parallel zur Wand und der Schergeschwindigkeit $u_\tau = \sqrt{\tau/\rho}$ zu:

$$u^+ = \frac{\bar{v}}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (2.12)$$

Dabei entspricht y^+ dem dimensionslosen Wandabstand (mit $y^+ = y \cdot u_\tau / \nu$) und B einer empirischen Konstante. Die Geschwindigkeit ändert sich in der viskosen Unterschicht linear zum Abstand von der Wand. Das Reynoldsspannungs-Transportmodell erlaubt insgesamt eine verbesserte Auflösung von Effekten wie der Stromlinienkrümmung, den Wirbeln und Rotationen, eine genauere Modellierung komplexer Strömungen und die Abbildung von spannungsinduzierten Sekundärströmungen innerhalb durchströmter Querschnitte. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Variante des Stress-Omega-Modells basiert auf den Gleichungen des ω -Modells und des Launder-Reece-Rodi-Modells und eignet sich besonders für gekrümmte Oberflächen und verwirbelte Strömungen [PRO18].

2.6.4 Berechnung der dispersen Phase

Die im Rahmen dieser Arbeit zu berücksichtigende Zweiphasenströmung beinhaltet Strömungen mit Festpartikeln, d. h. eine kontinuierliche Phase und eine diskontinuierliche, disperse Phase. Die Simulation von Zweiphasenströmungen, bei denen die Festpartikel inhomogen verteilt sind und eine Relativgeschwindigkeit zwischen der kontinuierlichen und dispersen Phase vorliegt, erfolgt anhand der Euler-Lagrange-Methode. Bei diesem Verfahren wird die kontinuierliche Phase durch Lösung der Reynolds-gemittelten Erhaltungsgleichungen in Verbindung mit einem geeigneten Turbulenzmodell berechnet. Die disperse Phase wird simuliert, indem eine Vielzahl von Partikeln (engl. Discrete Phase Models – DPM) mit vordefinierten Eigenschaften unter Beachtung der auf sie wirkenden Kräfte durch das zuvor berechnete Strömungsfeld verfolgt werden. Die Eigenschaften der dispersen Phase werden durch Anzahlmittelung erhalten. Dem Einfluss der dispersen Phase auf die Fluidströmung wird durch geeignete Quellterme in den Erhaltungsgleichungen der kontinuierlichen Phase Rechnung getragen. Das Euler-Lagrange-Verfahren ermöglicht eine einfache Berücksichtigung der Partikelgrößenverteilung, der für die Partikelbewegung relevanten Kräfte entsprechend dem Newtonschen Axiom sowie eine Modellierung physikalischer Effekte wie Partikel-Wand-Kollisionen [ANH04].

2.7 Präzisierung der Aufgabe

Die in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Grundlagen ermöglichen ein tiefgehendes Verständnis über die Vorgänge innerhalb der Reibzone und die Mechanismen zur Partikelbildung. Offen bleiben hingegen Erkenntnisse zur Beschreibung oder Modellierung der Vorgänge der Partikelinjektion, Partikelverteilung und Partikelabscheidung innerhalb eines Probenahmesystems. Dazu ist in einem ersten Teil (vgl. Abschnitt 3) eine Methodik zur Analyse der Grenzschichtdynamik am Beispiel eines Bremssystems mit rotierender Scheibe und Innenbelüftung zu entwickeln und in einem weiteren Schritt um die Peripherie der Umhausung (Probenahmesystem) zu erweitern. Dies ermöglicht erstmals die Bewertung der Transporteffizienz eines Probenahmesystems unter dem Einfluss variierender Fahrparameter und Betriebsbedingungen. Darauf

aufbauend werden in Abschnitt 4 methodische Ansätze zur experimentellen Validierung vorgestellt und Einflussgrößen auf die Partikelverteilung und Partikelabscheidung bewertet.

Ferner sind aus der Literatur kein Konzept und keine Methode zu entnehmen, welche die Durchführung von Messungen im realen Fahrversuch unter Ausschluss des Einflusses externer Emissionsquellen ermöglichen. Dazu wird ein Konzept vorgestellt, welches den Anforderungen an eine hohe Qualität der Probenahme (vgl. Abschnitt 3.1, Tabelle 3-1) entspricht und individuell eingesetzt werden kann. Dies ermöglicht wiederum die Bewertung und den Vergleich von Einflussgrößen auf das Partikelemissionsverhalten unter variierenden Prüfumgebungen.

Neben konzeptionellen Unterschieden der in der Literatur beschriebenen Setups zur Probenahme (Transporteffizienz, Uniformität und Verdünnungsgrad) weisen auch die Partikelmesssysteme (vgl. Abschnitt 2.3.3) konzeptionelle Unterschiede auf, wodurch die globale Vergleichbarkeit von Messdaten insgesamt als Herausforderung anzusehen ist. Auch blieben Rückwirkungen zwischen den konzeptionellen Ausführungen der Probenahmesysteme und der Partikelmesssysteme bislang weitgehend unberücksichtigt. Der zweite Teil der vorliegenden Arbeit (vgl. Abschnitt 5) umfasst demnach die Verifizierung der Mess- und Klassifizierbarkeit anhand der vorrangig für den Anwendungsfall verbrennungsmotorischer Emissionen entwickelten Partikelmesssysteme sowie die Ausarbeitung von Messkonzepten. Berücksichtigt werden physikalische Messprinzipien zur Bestimmung der Partikelanzahl (PN), Partikelmasse (PM) und Größenverteilungsdichte (GVD). Die Referenz stellen Messsysteme dar, welche den Standard bei der Messung verbrennungsmotorischer Abgasemissionen (PN/PM) bilden und damit einen Direktvergleich zwischen unterschiedlichen Emissionsquellen ermöglichen. Anhand eines abgeleiteten Setups sind für unterschiedlichste Belag-Scheibenkonzepte anzahl- und massebezogene Emissionsfaktoren zu bestimmen und die Anzahl-Massekorrelationen am Beispiel variierender Fahrparameter zu bewerten.

Auch offen blieben bislang Untersuchungen zum Emissionsverhalten und zur Partikelgrößenverteilung über den tribologischen Einlaufvorgang sowie eine Bewertung zum Einfluss der thermischen und mechanischen Vorkonditionierung (vgl. Abschnitt 6). Ebenso Untersuchungen zum Emissionsverhalten alternativer Reibmaterialien wie beschichteter Bremscheiben sowie zum Einfluss der geometrischen Gestaltung der Reibpartner stellen Forschungsschwerpunkte dar. Daran anknüpfend erfolgt eine Bewertung zum Emissionsminderungspotenzial unter Simulation eines regenerativen Bremssystems.

Den Abschluss der Arbeit (vgl. Abschnitt 7) bilden Untersuchungen zum Partikelemissionsverhalten unter variierenden Prüfumgebungen. Ein Vergleich dieser Prüfumgebungen ermöglicht die Identifizierung und Bewertung charakteristischer Größen. Messungen im realen Fahrversuch anhand eines RDE-konformen Testzyklus ermöglichen zudem eine Bewertung des Einflusses der Streckenführung, unterteilt in sektionale Anteile (Stadt, Land und Autobahn), des Fahrmanövers oder der fahrenden Person sowie die Bestimmung realer Emissionsfaktoren.

Aufgrund der geschlossenen Geometrie des entwickelten Konstantvolumen-Probenahmesystems für mobile Anwendungen wird besonderer Wert auf die Analyse der Kühlungsbedingungen bzw. der Temperaturverteilung gelegt. Aus dem abgeleiteten Forschungsbedarf erfolgt die Aufstellung von Hypothesen, die im Ergebnis der vorliegenden Arbeit als Thesen bestätigt oder widerlegt werden:

Hypothese 1.1: Die Modellierung der Partikelinjektion und Partikelverteilung innerhalb eines Konstantvolumen-Probenahmesystems ist auch unter Variation von Prüfparametern und Betriebsbedingungen realisierbar.

Hypothese 1.2: Aus der Konstruktion bzw. dem Design eines Probenahmesystems als auch unter Variation von Betriebsbedingungen (z. B. Volumenstrom) sind keine Einflüsse auf die Transporteffizienz und Partikelverteilung im Abluftkanal zu erwarten.

Hypothese 1.3: Die Transporteffizienz und Partikelverteilung sind über den Verlauf eines Testzyklus, welcher durch variierende Geschwindigkeitsbereiche gekennzeichnet ist, konstant.

Hypothese 2.1: Die Messfähigkeit eines Partikelmesssystems zur Bestimmung von Anzahl, Masse oder Größenverteilungsdichte wird durch das physikalische Partikelmessprinzip und die Systemkonfigurationen (z. B. messbarer Größenbereich/kalibrierter Cut-off, thermische Vorkonditionierung) bestimmt.

Hypothese 2.2: Eine erhöhte thermische Belastung der in Kontakt stehenden Reibpartner resultiert in der Bildung nanoskaliger Partikel, deren Messbarkeit signifikant vom kalibrierten Cut-off (z. B. 2,5, 10 oder 23 nm) beeinflusst wird.

Hypothese 2.3: Unter Variation der Beanspruchungsintensität ist eine Beeinflussung der Linearität zwischen Partikelanzahl und Partikelmasse zu erwarten.

Hypothese 2.4: Die Applikation der aus der Messung verbrennungsmotorischer Abgasemissionen bekannten Partikelmesstechnik zur Bestimmung anzahl- und massebezogener Emissionsfaktoren ist uneingeschränkt möglich.

Hypothese 2.5: Durch die Anwendung alternativer Reibmaterialien und die Wirkung des regenerativen Bremsens können signifikante Emissionsminderungspotenziale generiert werden.

Hypothese 3.1: Die Einflüsse der fahrenden Person und der Streckenführung auf das Partikelemissionsverhalten sind unter Einhaltung der RDE-Konformität (Verordnung (EU) 2018/1832; verbrennungsmotorische Abgasemissionen) insgesamt als hoch zu bewerten.

Hypothese 3.2: Eine repräsentative und reproduzierbare Probenahme ist mithilfe eines Konstantvolumen-Probenahmesystems unter variierenden Prüfumgebungen (SMP, RPS und RDE) nicht möglich.

3 Simulative Untersuchungen

Dieser Abschnitt dient zur Vorstellung einer eigens entwickelten Methodik zur simulativen Beschreibung partikelförmiger Bremsenemissionen innerhalb eines Konstantvolumen-Probenahmesystems. Das Ziel besteht darin, die Vorgänge der Partikelinjektion, Partikelverteilung und Partikelabscheidung erstmals vollständig abzubilden und Einflüsse zu bewerten.

3.1 Geschlossenes Konstantvolumen-Probenahmesystem

Voraussetzung einer qualitativ hochwertigen Messung partikelförmiger Bremsenemissionen ist eine repräsentative Probenahme, zu deren Erfüllung die in Tabelle 3-1 aufgeführten Anforderungen zu gewährleisten sind. Zur Umsetzung dieser Anforderungen kommen geschlossene Konstantvolumen-Probenahmesysteme zur Anwendung, wobei die emittierten Bremsenpartikel durch einen konstanten Volumenstrom aus einer geschlossenen Umhausung evakuiert und einem Messkanal mit darin integrierter Probenahmesonde zugeführt werden.

Tabelle 3-1: Hauptanforderungen an ein Probenahmesystem

Nr.	Anforderungsbeschreibung
1	Maximale Transporteffizienz ($\leq 10 \mu\text{m}$)
2	Maximale Uniformität ($\leq 10 \mu\text{m}$)
3	Maximale Reproduzierbarkeit
4	Minimale Partikelverweilzeit (Zeit im Kontrollvolumen) zur Erfassung dynamischer Vorgänge
5	Minimale Beeinflussung durch die Umgebung (z. B. Kontamination durch Fremdpartikel)
6	Eine „akzeptable“ Verdünnung zur Auflösung niedrigster Konzentrationen (z. B. innerstädtisch)

Bedingt durch den Einfluss von Transportmechanismen ergeben sich Konsequenzen für den Partikeltransport innerhalb eines Probenahmesystems, die anhand der Transporteffizienz und Uniformität bewertet werden können. Die Transporteffizienz beschreibt das Verhältnis zwischen der Anzahl der durch die Reibungsbremse emittierten Partikel und der Anzahl der Partikel, die den Querschnitt der Probenahme passieren. Beeinflusst wird die Transporteffizienz durch die Wirksamkeit der in Abschnitt 2.5 beschriebenen Mechanismen. Zusätzlich wird die Uniformität der Partikelanzahlkonzentration über den Querschnitt der Probenahme zur Bewertung der Gleichförmigkeit der Partikelverteilung verwendet. Ein hoher Grad an Uniformität resultiert aus einer homogenen Partikelverteilung und ermöglicht auch bei Teilstromentnahme (punktuelle Entnahme eines Teilvolumens) eine repräsentative Probenahme. Die Probenahme und Vorabscheidung (z. B. mittels Zyklon) erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nach isokinetischen (geschwindigkeitsgleich) und isoaxialen (zentrische Ausrichtung der Probenahmesonde gegen den Hauptgasstrom) Bedingungen [GRP07]. Die in Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 dargestellten Ausführungsformen für den stationären und mobilen Anwendungsfall dienen der Beschreibung methodischer Ansätze der numerischen Simulation und experimentellen Validierung. Berücksichtigt wurden grundsätzlich die in GRPE-53-03 aufgeführten Spezifikationen

bzw. Anforderungen (z. B. die Einstellung einer turbulenten Strömung mit einer Reynoldszahl > 4.000 und eine ausreichende Kanallänge zur Gewährleistung einer hinreichenden Strömungsuniformität), wobei teils bauraumbedingte Anpassungen wie z. B. die Geometrie des Abluftkanals vorgenommen wurden. Die geometrischen Abmessungen des Probenahmesystems für den stationären Anwendungsfall sind Anhang A1 zu entnehmen. Das stationäre Probenahmesystem zur Montage am Schwungmassen-Bremsenprüfstand weist eine insgesamt großvolumige Umhausung zur Adaption unterschiedlichster Bremsendimensionen mit originalem Radträger und Bremsattel (Sattelbefestigung gemäß Abbildung 3-1 auf 284° im Uhrzeigersinn) sowie einen Abluftkanal mit zwei 90° -Umlenkungen mit daran angeschlossener Ventilator zur Erzeugung eines Druckgefälles auf. Die Umhausung kann in ihrer Ausrichtung angepasst werden, d. h. in Evakuierung in oder entgegen Fahrtrichtung.

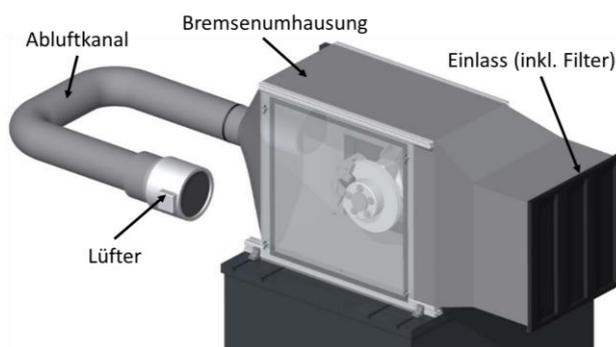


Abbildung 3-1: Konstantvolumen-Probenahmesystem für die stationäre Anwendung [AUG19]

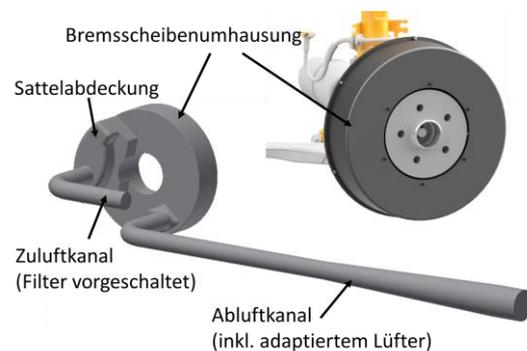


Abbildung 3-2: Konstantvolumen-Probenahmesystem zur mobilen Anwendung [HES19a, HES19c, AUG19c]

Auch im Falle des Probenahmesystems für mobile Anwendungen (vgl. Abbildung 3-2) wird zur Reduktion des Einflusses von Totwassergebieten auf scharfe Kanten, abrupte Querschnittsübergänge (z. B. der Übergang Umhausung \rightarrow Abluftkanal) sowie inhomogene Oberflächen verzichtet. Zur Gewährleistung der Rotationsbewegung bei gleichzeitiger Dichtigkeit des Systems ist ein Dünnringlager integrativer Bestandteil. Zudem sind die aus der Felge sowie den Fahrwerkskomponenten resultierenden Bauraumbedingungen vordefiniert und ermöglichen die Umsetzung eines Probenahmesystems, welches im Vergleich zum stationären Probenahmesystem ein deutlich kleineres Gehäusevolumen aufweist. Der konstruktive Aufbau des Probenahmesystems sieht ein Bremsscheibengehäuse sowie eine Sattelabdeckung vor. An das Bremsscheibengehäuse angeschlossen ist ein Abluftkanal, welcher aus einem flexiblen Teilstück, einem Diffusor mit daran angeschlossener geradlinigen Kanal, besteht.

3.2 Zieldefinition der simulativen Untersuchungen

Das Design von Umhausung und Abluftkanal sowie die Festlegung des Evakuierungsvolumenstromes beeinflussen die Partikelverteilung und die Repräsentativität der Probenahme an einer vordefinierten Probenahme position. Die Transporteffizienz bzw. die Wirkung der Transportmechanismen (vgl. Abschnitt 2.5) wird in Abhängigkeit der Partikeleigenschaften durch die geometrischen Randbedingungen und komplexen Strömungszustände beeinflusst. Damit liegt

das Ziel der simulativen Untersuchung in der Nachbildung der komplexen Vorgänge innerhalb eines Probenahmesystems und der Bewertung von Einflussgrößen. Zur Betrachtung der Vorgänge innerhalb der Grenzschicht wird eine Methodik ausgearbeitet, auf deren Grundlage die Erstellung eines Volumennetzes erfolgt. Dies ermöglicht die Nachbildung der Strömung sowie eine realitätsnahe Betrachtung der Partikelinjektion. Weiterhin erfolgen eine Modellierung des Partikelverhaltens innerhalb der Strömung und der Interaktion mit der Wand. Die Betrachtung grenzt sich von den Vorgängen innerhalb der Reibzone ab. Die Initialbedingungen werden durch die Injektion von Modellpartikeln variierender Durchmesser über eine Injektionsfläche repräsentiert, wodurch das reale Injektionsverhalten, verifiziert durch Validierungsversuche, gewährleistet wird. Die Zielerreichung setzt die Verifizierung von Modelleinflüssen sowie die Ableitung von Parametereinstellungen voraus. Grundlegende Definitionen zur Vernetzung und zur Auflösung der Randschicht erfolgen auf Basis vereinfachter Geometrien ohne Berücksichtigung der Bremse. Vor dem Hintergrund einer vereinfachten Geometrie ist das in Abbildung 3-3 dargestellte Ersatzmodell (rechts) vor der Rotationsachse der Scheibe getrennt, wobei ein Teil der Umhausung (inkl. trichterförmigen Übergang) sowie der Abluftkanal verbleiben.

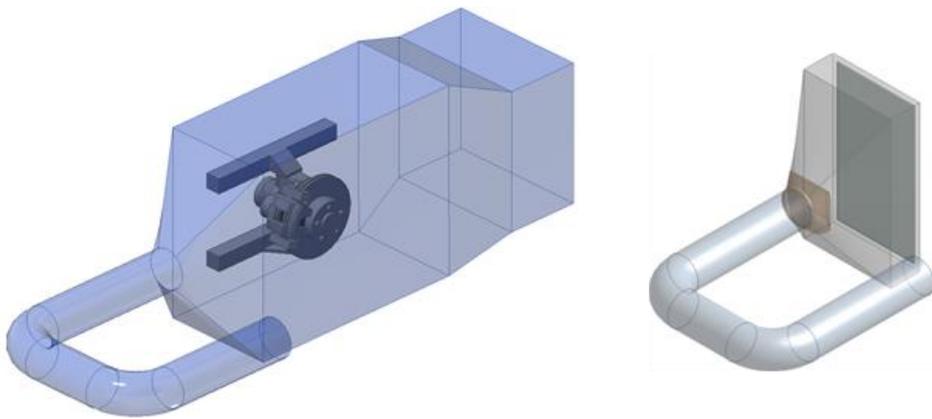


Abbildung 3-3: Vollmodell (links) und Ersatzmodell (rechts) [SOM19a]

Anschließend wird das Modell um Teile der Geometrie bis zum Gesamtmodell (Probenahmesystem inkl. Bremse; links) erweitert und die Methodik auf ein Probenahmesystem für die mobile Anwendung überführt. Mit diesem Stand ist die Analyse von Einflussgrößen wie der Rotationsgeschwindigkeit oder des Volumenstromes möglich. Einflüsse durch Diffusion und Koagulation bleiben im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt, was durch die unter Realfahrtbedingungen typischen Durchmesser $> 0,1 \mu\text{m}$ (vgl. Abschnitt 5.2) sowie die mittleren Konzentrationen $\leq 1\text{E}+03 \text{ \#/cm}^3$ für den Fall einer effizienten Filterung der Zu- bzw. Verdünnungsluft (HEPA-Filter nach EN 1822) zu erklären ist (temporäre Peak-Konzentrationen $\leq 1\text{E}+05 \text{ \#/cm}^3$).

3.3 Methodenentwicklung anhand eines stationären Probenahmesystems

3.3.1 Turbulenzmodell

Für den in dieser Arbeit behandelten Anwendungsfall bietet sich gemäß Abschnitt 2.6.3 die Anwendung des Reynoldsspannungs-Modell (RSM) - Stress Omega an. Dies ermöglicht eine

direkte Modellierung der einzelnen Komponenten des Reynoldsschen Spannungstensors. Es stellt nicht nur eine einzelne skalare Größe die Verbindung zwischen dem Geschwindigkeitsfeld und dem Spannungstensor dar, was infolge der direkten Modellierung der Bilanzgleichungen für die Komponenten des Reynoldsschen Spannungstensors aus den Navier-Stokes-Gleichungen resultiert [PRO18, SOM19a]. Vorteile liegen in der verbesserten Darstellung von Stromlinienkrümmungen, Wirbeln oder Rotationen und in einer erhöhten Ergebnisqualität bei komplexen Strömungen. Dieser Ansatz ermöglicht damit die Beschreibung der Vorgänge innerhalb einer ausgeprägten Strömung und die Untersuchung der ablaufenden Mechanismen.

3.3.2 Definition der Netzoptionen

Dieser Abschnitt dient zur Beschreibung eines Ansatzes zur Volumennetzerstellung, wodurch die Vorgänge innerhalb der Grenzschicht analysiert werden können. Darauf aufbauend erfolgt die Anwendung des erstellten Modells zur Untersuchung der Partikelinjektion. Die Bewertung der Netzoptionen erfolgt anhand der Transporteffizienz, da diese auch durch Änderungen beeinflusst wird, welche keine Auswirkung auf die Strömungsgeschwindigkeit besitzen. Bei großen Geschwindigkeitsgradienten, welche typischerweise in der Grenzschicht oder in Wirbeln auftreten, ist zur Lösung ein hohes Maß an Diskretisierung erforderlich. Unter Verwendung des Reynolds-Stress-Modells wird ein y^+ -Wert ≤ 1 sowie die Auflösung der Grenzschicht über ≥ 10 Schichten vordefiniert [SOM19a]. Zur Verifizierung des Einflusses der Vernetzung auf die Strömung und die Partikelabscheidung dient das in Abbildung 3-3 dargestellte Ersatzmodell. Die Bewertung der Transporteffizienz erfolgt für Partikel eines Größenbereiches zwischen 10 nm und 10 μm , welche über die in Abbildung 3-4 gekennzeichnete Fläche injiziert werden.

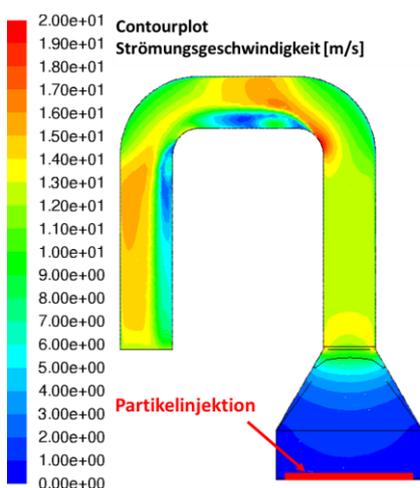


Abbildung 3-4: Strömungsgeschwindigkeit in der Kanalmittellebene

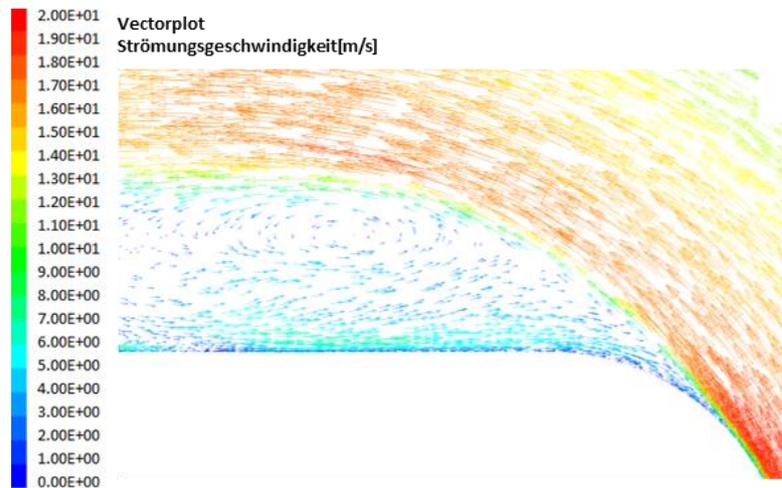


Abbildung 3-5: Geschwindigkeitsvektoren hinter der ersten Umlenkung

Damit ein Bezug zu den Feinstaubklassen und eine universelle Vergleichbarkeit gewährleistet wird, erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die Festlegung einer Partikeldichte gemäß des aerodynamischen Durchmessers (Dichte $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$). Das in Abbildung 3-4 dargestellte Profil der Strömungsgeschwindigkeit verdeutlicht einen turbulenten Strömungsabriss mit Umkehr der

Strömungsrichtung in der Grenzschicht infolge der ersten bzw. zweiten Umlenkung des Kanals. Der gebildete Wirbel (vgl. Abbildung 3-5) weist Bahnen erhöhter Radien mit starken Geschwindigkeitsanstiegen auf. Damit geht eine Beeinflussung der Partikelverteilung innerhalb des Rohrquerschnittes (vgl. Abbildung 3-6; rot markierter Bereich) in Form erhöhter Massenkonzentrationen einher. Die Bewertung variierender Elementgrößen der Wandfläche a folgt für $a_{E1} = 1$, $a_{E2} = 2$, $a_{E3} = 4$ und $a_{E4} = 8$ mm. Als Netzeinstellungen werden eine Höhe der ersten Schicht h_1 von $4,0E-5$ m und eine Wachstumsrate von 1,4 bei 12 Schichten vordefiniert. Zur Bewertung des Einflusses der Elementgröße wird eine Änderung der Wachstumsrate und der Höhe der ersten Schicht h_1 vorgenommen. Zu beachten ist, dass durch eine feinere Vernetzung die Strömung im wandnahen Bereich realitätsnaher abgebildet werden kann. Aus der in Abbildung 3-7 gegenübergestellten Transporteffizienz je Elementgröße ist eine deutliche Sensitivität abzuleiten, wobei Änderungen der Wachstumsrate und der Höhe der ersten Schicht klein ausfallen. Für Partikel bis zu einem Durchmesser von $5 \mu\text{m}$ ist eine Reduktion der Transporteffizienz unter Zunahme der Elementgröße zu beobachten. Für eine Elementgröße von 1 mm liegt ein erhöhter Anteil der Massenkonzentration innerhalb des Wirbels vor, wobei dieser Effekt für eine Elementgröße von 8 mm deutlich reduziert ist. Als Erklärung ist anzunehmen, dass Partikel $\geq 5 \mu\text{m}$ sich infolge der Trägheit primär auf Bahnen großer Radien bewegen und weniger der turbulenten Trägheitsabscheidung ausgesetzt sind.

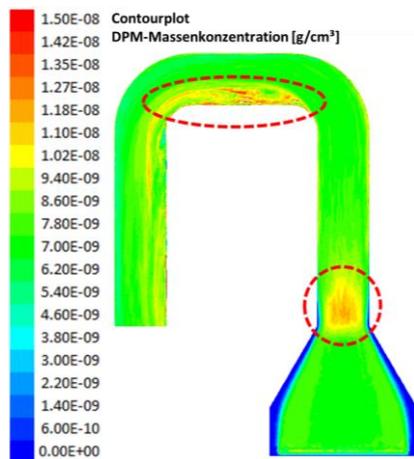


Abbildung 3-6: Partikelmassenkonzentration für $1 \mu\text{m}$ -Partikel $[\text{kg}/\text{m}^3]$

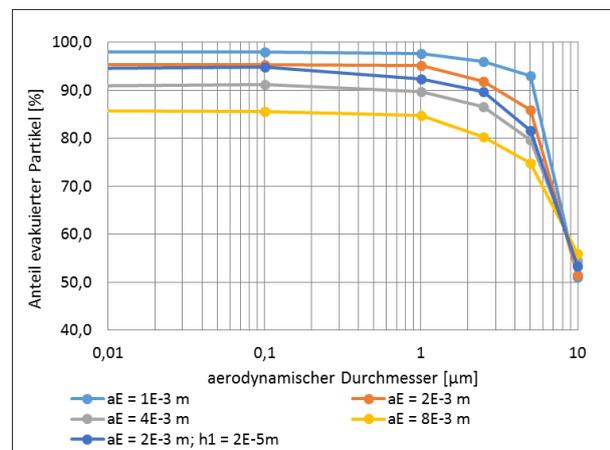


Abbildung 3-7: Transporteffizienz unter Variation der Elementgröße an der Wandfläche a_E

Unter Berücksichtigung eines y^+ -Wertes < 1 wird sichergestellt, dass sich die erste Netzschicht vollständig in der laminaren Grenzschicht befindet. Die darüber liegende Grenzschicht ist entsprechend fein aufzulösen. Aufbauend auf den vorgestellten Netzoptionen folgt eine Parametervariation für die Höhe der ersten Schicht h_1 ($1,0E-5$ m; $2,0E-5$ m; $4,0E-5$ m und $8,0E-5$ m) gemäß Abbildung 3-8, wobei die Anzahl der Schichten N (16, 14, 12 und 10) zur Gewährleistung einer etwa konstanten Höhe der Wandvernetzung angepasst wird. Eine Vernetzung mit großer Höhe h_1 ermöglicht eine hinreichende Auflösung der laminaren Grenzschicht. Zur Abdeckung der gesamten Grenzschicht in Bereichen, in denen diese besonders hoch ist, erfordert dieser Ansatz eine hohe Schichtanzahl. Für kleine Höhen überschreitet y^+ an keiner Stelle

den Wert 1. Für große Höhen (insb. $8,0E-5$ m) ist eine punktuelle Überschreitung ($y^+ > 1$) und damit eine Beeinflussung der Transporteffizienz nachweisbar (vgl. Abbildung 3-9). $10\ \mu\text{m}$ -Partikel sind den Einflüssen der Wandschicht innerhalb der Umlenkungen weniger ausgesetzt.

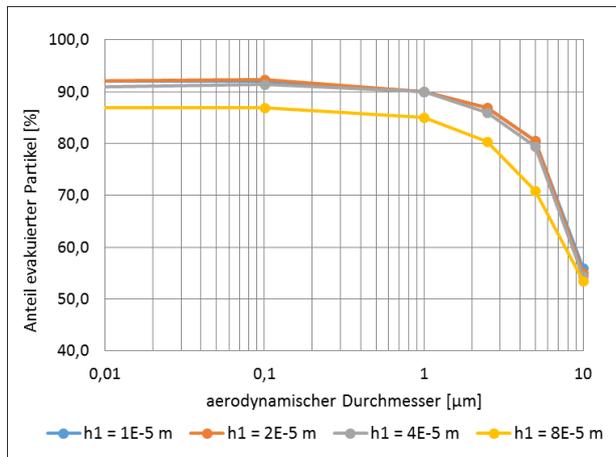


Abbildung 3-8: Transporteffizienz unter Variation der Höhe der ersten Schicht h_1

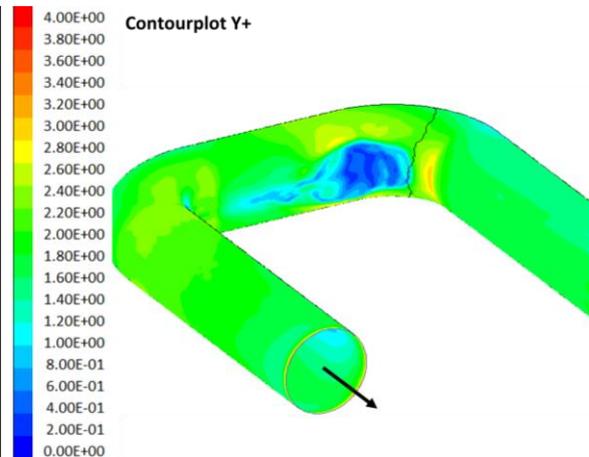


Abbildung 3-9: y^+ über den Abluftkanal bei einer Höhe der ersten Schicht $h_1 = 8,0E-5$ m

Untersuchungen zum Einfluss der Wachstumsrate ω erfolgen für $\omega_1 = 1,15$; $\omega_2 = 1,2$; $\omega_3 = 1,3$; $\omega_4 = 1,4$ und $\omega_5 = 1,6$. Für die in Abbildung 3-10 aufgeführte Transporteffizienz liegt eine Beeinflussung für Wachstumsraten $> 1,3$ vor. Der Einfluss ist auch an dieser Stelle differenziert für die analysierten Partikeldurchmesser zu bewerten. Aus der Bewertung der turbulenten kinetischen Energie (vgl. Abbildung 3-11) geht hervor, dass diese besonders im Wirbel nach der ersten Umlenkung und hohen Wachstumsraten geringer ausfällt. Damit ist festzuhalten, dass für geringere Wachstumsraten keine negative Beeinflussung der Transporteffizienz vorliegt, sondern dass sie gegen einen festen Wert konvergiert. Aus den Ergebnissen ist abzuleiten, dass bei Überschreitungen von $y^+ \geq 1$ eine Beeinflussung von Strömung und Partikelabscheidungsverhalten wahrscheinlich ist. Demnach folgt eine Festlegung des y^+ -Wertes auf < 1 .

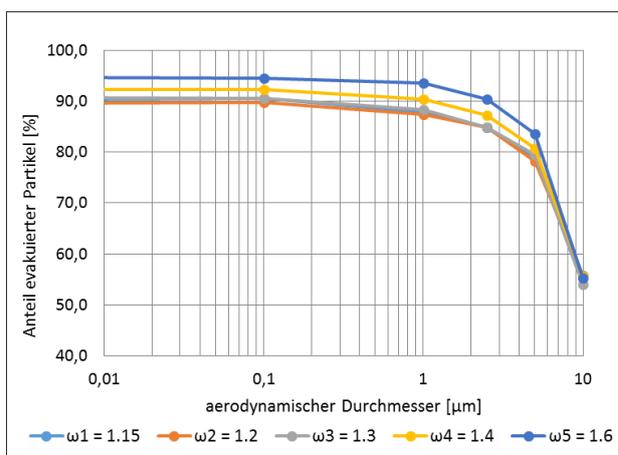


Abbildung 3-10: Einfluss variierender Wachstumsraten ω

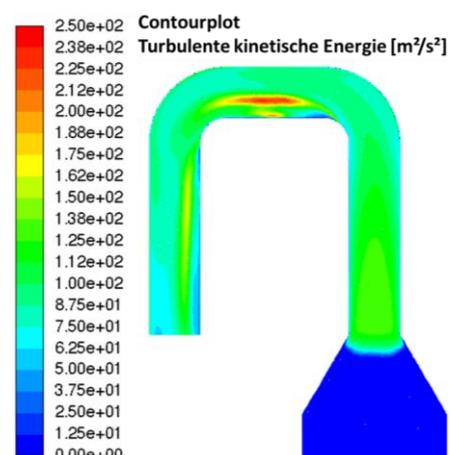


Abbildung 3-11: Turbulente kinetische Energie k (Rohrmitte) bei $\omega = 1,2$

Weitere vordefinierte Netzeinstellungen sind in Tabelle 3-2 aufgeführt. Unter Berücksichtigung dieser Festlegungen ist die gesamte viskose Grenzschicht durch eine feine Vernetzung aufgelöst und die Ergebnisqualität als hinreichend genau zu bewerten.

Tabelle 3-2: Zusammenfassung der Netzeinstellungen

y ⁺ -Wert	Wachstumsrate ω	Elementgröße an der Wandfläche a_E	Höhe der ersten Schicht h_1	Anzahl der Schichten N
< 1	$\leq 1,3$	$\leq 4,0E-3$ m	$\leq 4,0E-5$ m	≥ 10

3.3.3 Übertragung auf das Gesamtmodell

Die Bremsscheibenoberfläche, die Antriebswelle sowie die Ventilation der innenbelüfteten Scheibe wird durch den „moving wall“-Ansatz (vgl. Abbildung 3-12) definiert, wodurch Luft aus dem Bereich der Belagfase gezogen wird und es zur Ausbildung einer Strömung kommt. Gemäß Abbildung 3-13 erfolgt weiterhin die Definition einzelner Bauteile gemäß „moving reference frame“ (bewegtes Referenzsystem), wodurch die Strömung in Bereichen wie z. B. der Innenbelüftung der Scheibe (inkl. der resultierenden Ventilationswirkung) simuliert werden kann [HES19a]. Allgemein ist neben einer ausgeprägten Turbulenz und Reynoldszahl sowie der geringeren Höhe der Grenzschicht ein erhöhter y⁺-Wert zu erwarten, welcher im Optimierungsprozess zu berücksichtigen ist. Gekrümmte Oberflächen als auch Bereiche, an denen große Geschwindigkeitsgradienten und Wirbel auftreten, sind durch ein feines Netz abzubilden. Durch ein iteratives Vorgehen wird teils eine erhöhte Anzahl an Schichten sowie eine Reduktion der Wachstumsrate ω und der Höhe der ersten Schicht h_1 gewählt. Die Injektionsflächen wurden gemäß der Forderung nach einer detaillierten Auflösung fein vernetzt.

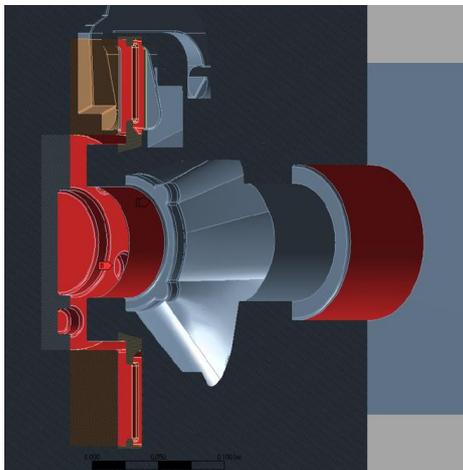


Abbildung 3-12: Bauteile, definiert als moving wall (MW; rot markiert) [HES19a]



Abbildung 3-13: Bauteile, definiert als moving reference frame (MRF) [HES19a]

3.3.4 Partikelinjektion und Initialbedingungen

Für die nachfolgenden Untersuchungen wird ein Geometriemodell einer Einkolben-Schwimm-sattelbremse verwendet. Eine realitätsnahe Injektion der Modellpartikel wird gemäß Abbildung 3-14 und Abbildung 3-15 durch eine abgerundete Fläche am Übergang vom Reibbelag zur Scheibe ermöglicht. Auf die Berücksichtigung eines Luftspaltes zwischen Belag und Scheibe (offset) wird im Rahmen der Simulationen verzichtet. Unter Beachtung der oben definierten Netzoptionen wird eine gezielte Analyse der Interaktion mit der rotierenden Scheibe sowie des

Überganges in die freie Strömung möglich. Gemäß der dargestellten Massenkonzentration geht ein Großteil der injizierten 10 µm-Modellpartikel in die etwa 5,0E-5 m hohe Schicht auf der Scheibenoberfläche über und folgt der Bewegung der Scheibe.

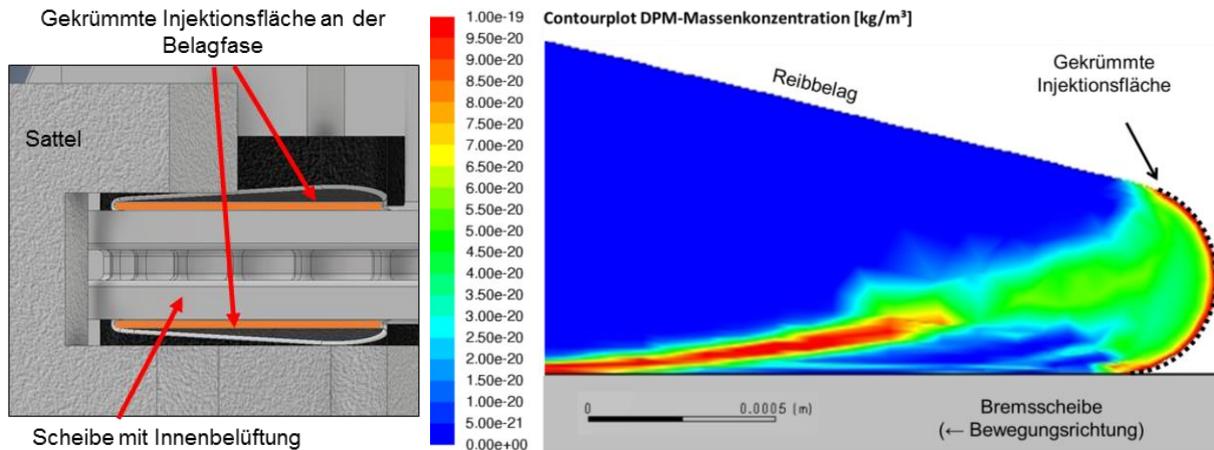


Abbildung 3-14: Injektionsfläche an der Belagfase

Abbildung 3-15: Massenkonzentration im Bereich der Injektionsfläche [HES19a]

Dieser Effekt ist durch den Aufbau einer Grenzschicht durch die vorliegenden Haftbedingungen zu erklären. Neben dem direkten Übergang in die Grenzschicht können vereinzelte, wolkenartige Partikelformationen nachgewiesen werden, welche direkt in den Raum übergehen. Die in Abbildung 3-16 dargestellte Strömung ist als Charakteristikum für den Vorgang der Injektion zu beschreiben. Im Bereich der Partikelinjektion kommt es zu einer Rückströmung in den Bereich der Belagfase, welche den Transport der Partikel in die Grenzschicht bewirkt. Das vorliegende Strömungsprofil wird insbesondere durch die vorliegenden geometrischen Randbedingungen bzw. den Fluidraum beeinflusst [SOM19a]. Der Übergang der Partikel in die Grenzschicht wird durch deren Durchmesser bzw. Trägheit beeinflusst. Während 0,1 µm- und 1 µm-Partikel unmittelbar nach der Injektionsfläche in die Grenzschicht übergehen, kann für 10 µm-Partikel eine Distanz von 1,5 mm bestimmt werden.

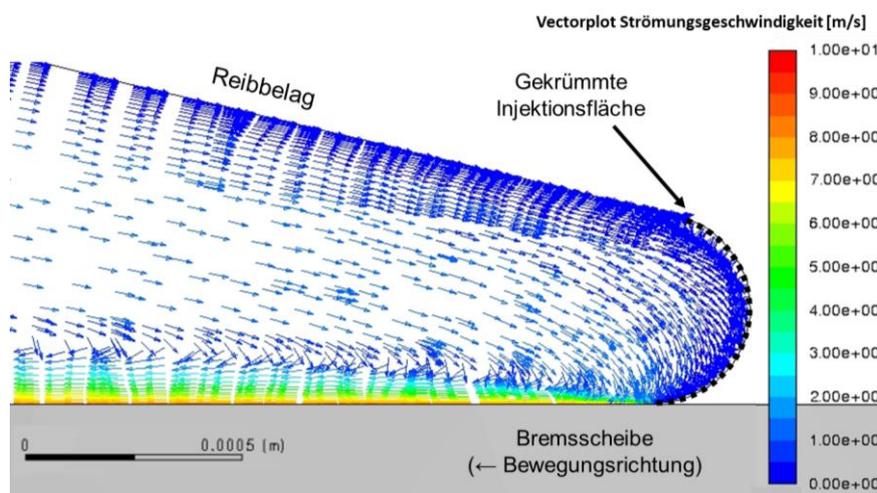


Abbildung 3-16: Strömungsgeschwindigkeit/Strömungsrichtung im Bereich der Injektionsfläche [HES19a]

Maximale Konzentrationen (vgl. Abbildung 3-17; 1 µm-Partikel) der in Bewegungsrichtung der Scheibe transportierten Partikel können in einem Abstand von der Scheibenoberfläche von bis

zu $2,0E-5$ m nachgewiesen werden. In diesen Schichten umrunden Partikel $\leq 1 \mu\text{m}$ die Scheibe nahezu vollständig, was gemäß der Grenzschichttheorie durch die vorliegende laminare Strömung zu erklären ist. $10 \mu\text{m}$ -Partikel verlassen zu einem deutlich höheren Anteil die Grenzschicht in radialer Richtung. In den Schichten darüber (vgl. Abbildung 3-18 – $2,0E-4$ m; $1 \mu\text{m}$ -Partikel) können deutlich geringere Massenkonzentrationen bei einem inhomogenen Injektionsprofil nachgewiesen werden. Der Effekt der inhomogenen Partikelinjektion ist der Ausbildung eines Wirbels durch den Einfluss der Bremssattelgeometrie zuzuschreiben.

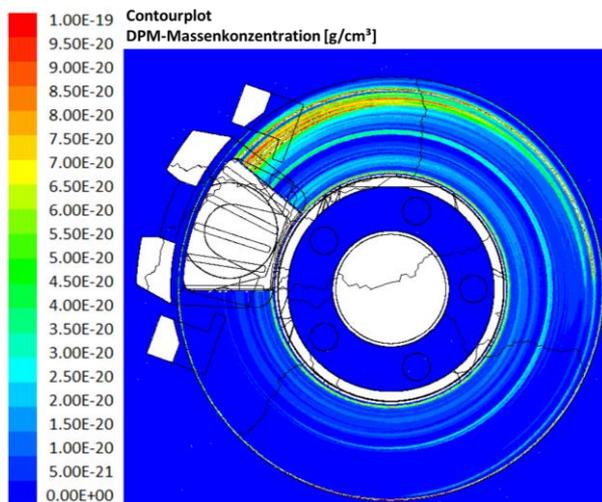


Abbildung 3-17: DPM-Massenkonzentration $1 \mu\text{m}$ ($1,0E-5$ m-Offset); 80 km/h [HES19a]

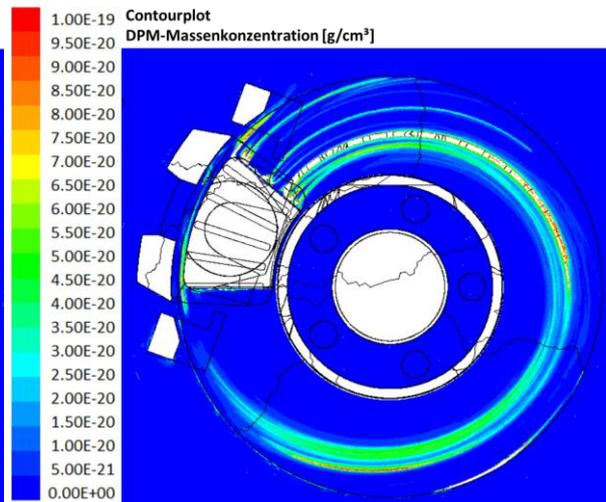


Abbildung 3-18: DPM-Massenkonzentration $1 \mu\text{m}$ ($2,0E-4$ m-Offset); 80 km/h [HES19a]

Dies bewirkt im äußeren und inneren Bereich der Injektionsfläche eine Beeinflussung der Bewegungsrichtung der injizierten Partikel, wobei die vorliegende Strömung die Partikel nicht vollständig erreicht. Die Wahrscheinlichkeit, dass Partikel der Scheibenbewegung in kreisförmigen Bahnen folgen, wird demnach mit zunehmendem Abstand geringer, d. h. die Partikel bewegen sich eher in radialer Richtung. Zur Überprüfung der Partikeldynamik wird die Scheibenoberfläche mittels Laser beleuchtet und mittels Kamera (90° versetzt zur Laserebene) erfasst (1024×1024 Pixel). Zur Reduktion von Abschattungseffekten ist der Laser gemäß Abbildung 3-19 vertikal von oben nach unten gerichtet und spannt auf der Scheibenoberfläche eine Ebene auf. Bereiche hoher Helligkeit entsprechen infolge der Belichtung hohen Partikelkonzentrationen, welche die bereits beschriebene Form wolkenartiger Partikelformationen (insbesondere im freien Raum; Ablösung in radialer Richtung) annehmen und das hochgradig transiente Verhalten infolge der turbulenten Strömung als auch des Partikelbildungsprozesses repräsentieren. Zudem können erhöhte Konzentrationen auf kreisförmigen Partikelbahnen (Partikelbewegung in der Grenzschicht) als Bestätigung für den Übergang in die Grenzschicht angesehen werden (vgl. Abbildung 3-20). Die kreisförmigen Partikelbahnen sind repräsentativ für erhöhte Konzentrationen bis zu einem Abstand von $2,0E-5$ m. Der Vorgang des tangentialen Verlassens tritt vornehmlich für Partikel $> 1 \mu\text{m}$ auf, wobei in der Simulation vereinzelt auch $0,1 \mu\text{m}$ -Partikel detektiert werden können. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Anteil der in tangentialer Richtung bzw. über den Verlauf der Scheibenrotation abgelösten Partikel

unter Zunahme des Partikeldurchmessers steigt, wohingegen der Anteil der in der Grenzschicht bis zur rückseitigen Belagfase (Einlaufseite) transportierten Partikel sinkt. Damit können die grundlegenden Erkenntnisse der simulativen Untersuchungen bestätigt werden.

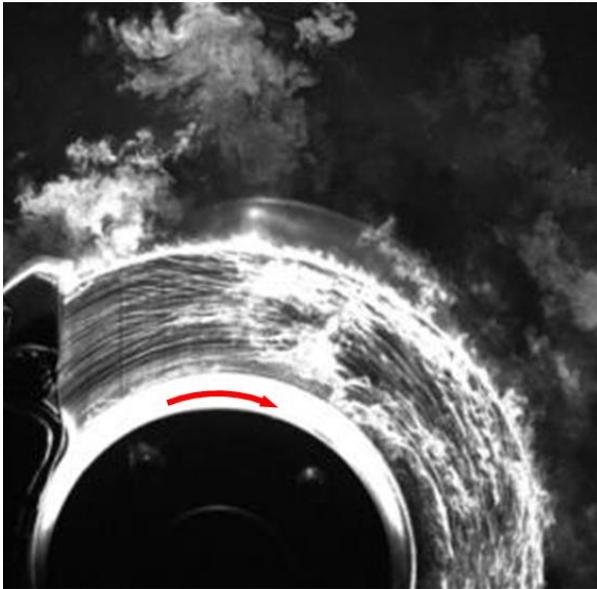


Abbildung 3-19: Laseraufnahme zur Partikelinjektion
120 → 80 km/h (30 bar) [HES19a, HES19c]

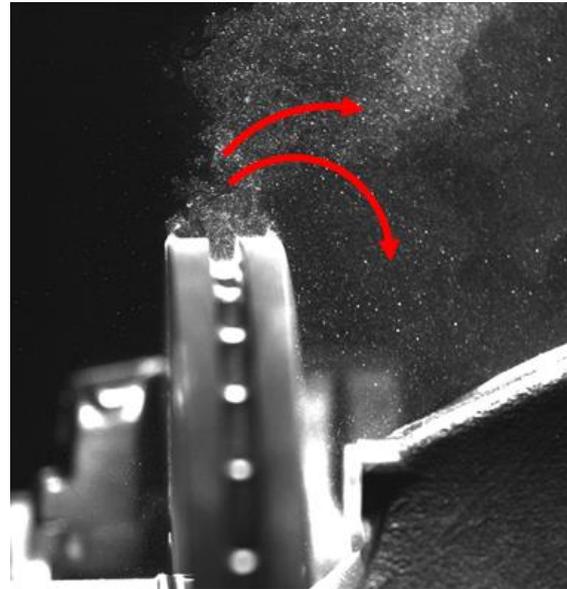


Abbildung 3-20: Laseraufnahme zur Partikelinjektion
120 → 80 km/h [HES19a, HES19c]

3.3.5 Partikelverteilung in einem Konstantvolumen-Probenahmesystem

In diesem Abschnitt folgt eine Untersuchung zur Partikelbewegung innerhalb des Probenahmesystems für Fahrgeschwindigkeiten von 40 km/h (35 rad/s), 80 km/h (70 rad/s) und 120 km/h (105 rad/s). Die Absaugung erfolgt entgegen der Fahrtrichtung, wobei im Abluftkanal eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 36 km/h vordefiniert ist (850 m³/h). Studien zum Einfluss der Absaugrichtung sind Abschnitt 4.1 zu entnehmen. Aus Abbildung 3-21 geht hervor, dass die Strömung um die Peripherie der Bremse vornehmlich durch den Evakuierungsvolumenstrom und die Ventilationswirkung der innenbelüfteten Scheibe beeinflusst wird.

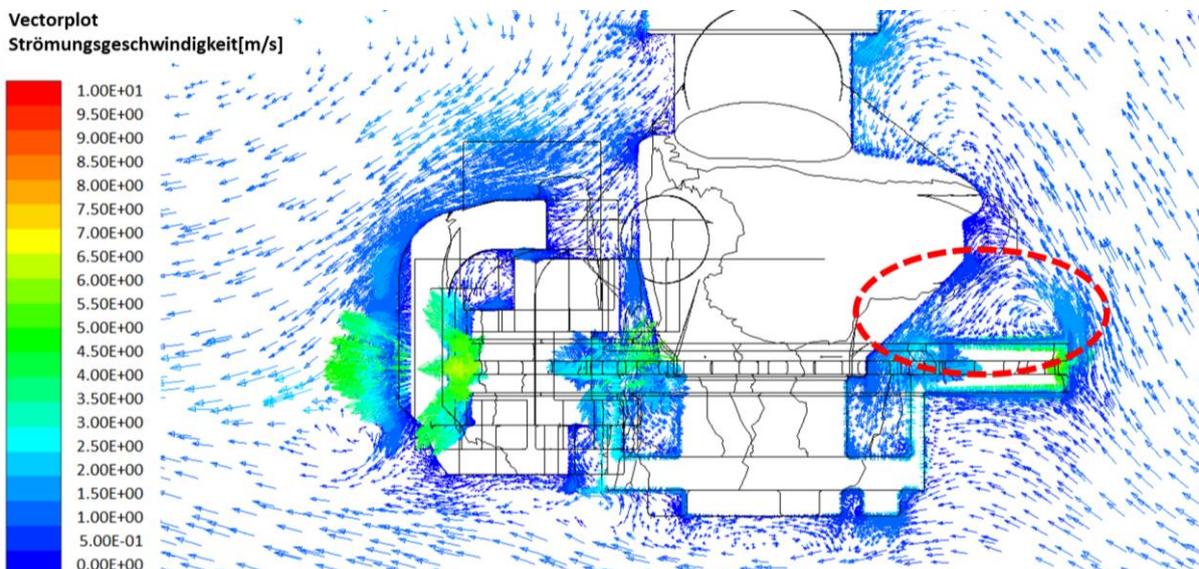


Abbildung 3-21: Strömungsgeschwindigkeit/Strömungsrichtung um die Peripherie der Bremse (40 km/h)

Die Luft strömt durch den verengten Querschnitt zwischen der hinteren inneren Scheibenkante und der Peripherie aus Radträger und Radnabe in die innere Geometrie der Scheibe (rote Markierung). Durch die Scheibenventilation entsteht eine Strömung (vgl. Abbildung 3-22), die im Kontext eines großräumigen Wirbels in radialer Richtung steht. Dadurch kommt es ausschließlich auf der Fahrzeuginnenseite (vgl. Abbildung 3-23, rechts) zu einem Richtungswechsel der injizierten Partikel und zur Zuführung in den Bereich der inneren Scheibenventilation.

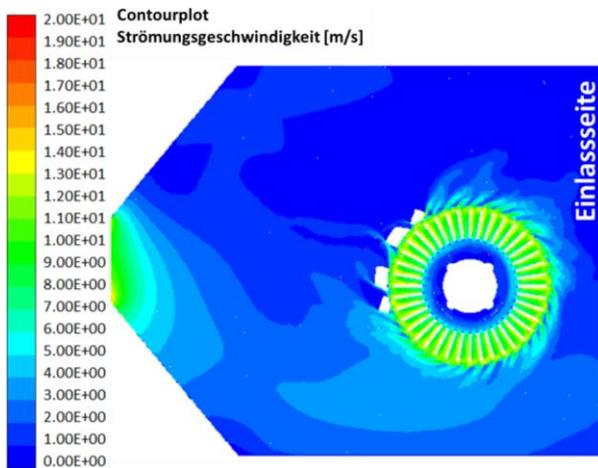


Abbildung 3-22: Strömungsgeschwindigkeit – Einfluss der Scheibenventilation

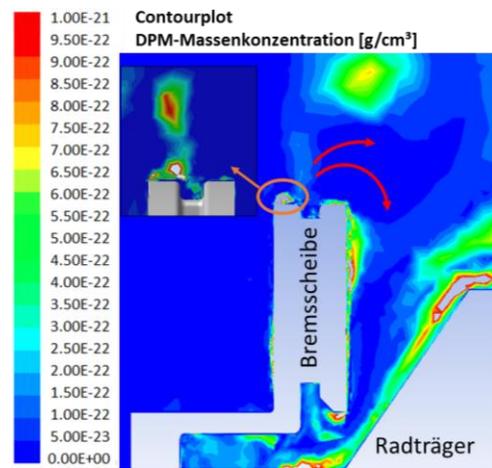


Abbildung 3-23: DPM Massenkonzentration (Rotationsachse)

Der Einfluss der Scheibenventilation auf den Partikeltransport wird signifikant von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst. Die im Bereich der inneren Scheibenventilation befindlichen Partikel (besonders $\leq 1 \mu\text{m}$ -Partikel) werden beschleunigt und in radialer Richtung heraustransportiert. $10 \mu\text{m}$ -Partikel sind durch ein erhöhtes Abscheidepotenzial im Bereich der inneren Scheibenventilation gekennzeichnet. Das Partikelinjektions- und Ausbreitungsverhalten von $0,1 \mu\text{m}$ - und $1 \mu\text{m}$ -Partikeln ist infolge des reduzierten Einflusses der Transportmechanismen vergleichbar.

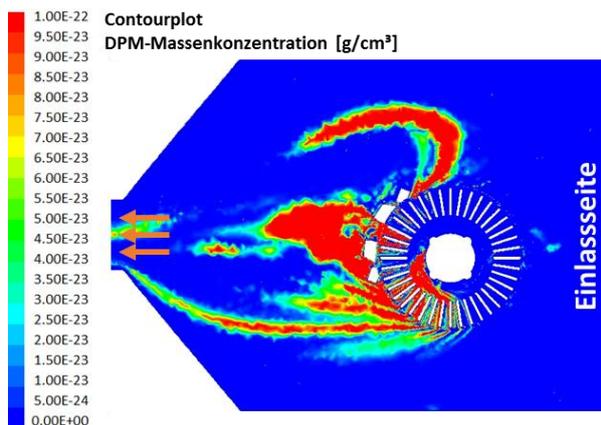


Abbildung 3-24: DPM Massenkonzentration $1 \mu\text{m}$, $40 \text{ km/h} - 850 \text{ m}^3/\text{h}$

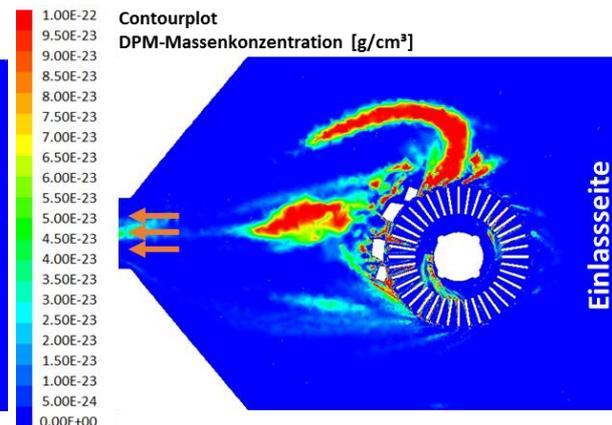


Abbildung 3-25: DPM Massenkonzentration $10 \mu\text{m}$, $40 \text{ km/h} - 850 \text{ m}^3/\text{h}$

Eine Beurteilung zur Partikeldynamik von $1 \mu\text{m}$ - und $10 \mu\text{m}$ -Partikeln folgt für Fahrgeschwindigkeiten von 40 km/h und 80 km/h unter Evakuierung von $850 \text{ m}^3/\text{h}$ Abluft gegen Fahrtrichtung (vgl. Abbildung 3-24 bis Abbildung 3-27). Unter Berücksichtigung einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h und Evakuierung in Fahrtrichtung dienen die in Abbildung 3-28 und Abbildung

3-29 dargestellten Partikelverteilungsprofile als Referenz. 10 µm-Partikel verlassen infolge des Einflusses der Impaktion die Peripherie der Scheibe vornehmlich in tangentialer Richtung, weshalb der Anteil der in die Grenzschicht transportierten Partikel klein ausfällt. Dadurch kommt es insbesondere bei Fahrgeschwindigkeiten > 40 km/h im unteren Bereich der Umhauung zu ausgeprägten Partikelformationen (vgl. Abbildung 3-27). Für > 80 km/h können geringe Partikelformationen im oberen Bereich der Umhauung erfasst werden. Aus dem Einfluss der Impaktion resultieren erhöhte Partikelverluste vor der Querschnittsverjüngung zum Kanal (vgl. Abbildung 3-29; rote Markierung), wobei die Abscheidungen entgegen Fahrtrichtung insgesamt höher ausfallen.

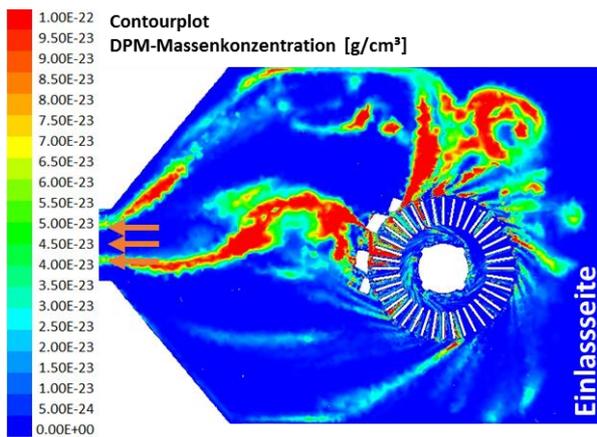


Abbildung 3-26: DPM Massenkonzentration 1 µm, 80 km/h, Evakuierung gegen FR – 850 m³/h

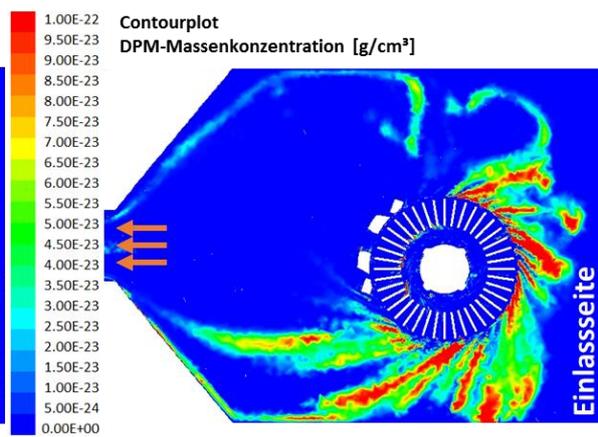


Abbildung 3-27: DPM Massenkonzentration 10 µm, 80 km/h, Evakuierung gegen FR – 850 m³/h

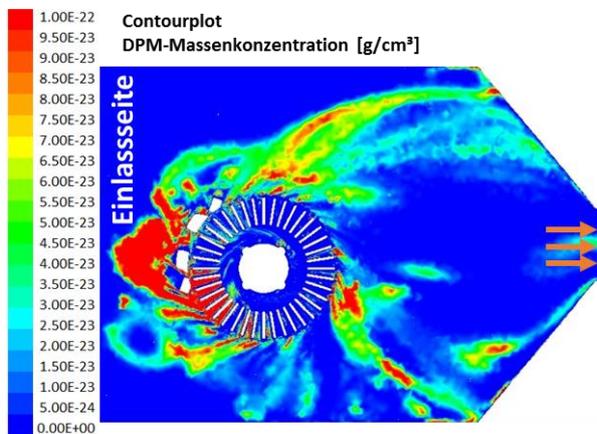


Abbildung 3-28: DPM Massenkonzentration 1 µm, 80 km/h, Evakuierung in FR – 850 m³/h

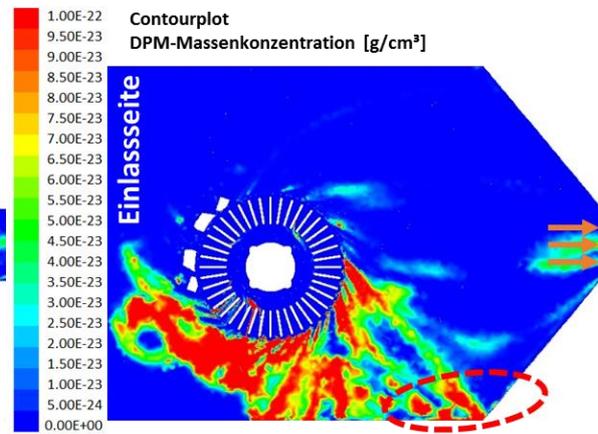


Abbildung 3-29: DPM Massenkonzentration 10 µm, 80 km/h, Evakuierung in FR – 850 m³/h

1 µm-Partikel werden vornehmlich in die Grenzschicht transportiert, folgen der Scheibenbewegung in kreisförmigen Partikelbahnen, werden an der Rückseite des Belages in die Umgebung injiziert und bilden infolge der Geometrie des Einkolben-Schwimmsattels einen großflächigen Konzentrationsbereich (links von der Scheibe) aus. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass für den Fall eines Sattels mit erhöhter Scheibenabschattung (z. B. Mehrkolben-Festsattel) ein Anstieg des Abscheidegrades zu erwarten ist. Neben dem Übergang in die Grenzschicht kann ein erhöhter Anteil an 1 µm-Partikeln im Bereich der inneren Scheibenventilation nachgewiesen werden. Zudem ist ein tangenciales Verlassen zu beobachten, woraus erhöhte

Partikelformationen oberhalb des Bremssystems resultieren. Die Tendenz erhöhter Partikelformationen oberhalb des Bremssystems nimmt unter weiterer Steigerung der Geschwindigkeit (120 km/h) zu, was ein gegensätzliches Verhalten zu 10 µm-Partikeln darstellt. Unter Variation der Rotationsgeschwindigkeit ist für variierende Partikeldurchmesser insgesamt ein differenziertes Injektions- und Ausbreitungsverhalten sowie ein dynamisches Konzentrationsprofil im Übergangsbereich Umhausung–Abluftkanal zu erwarten.

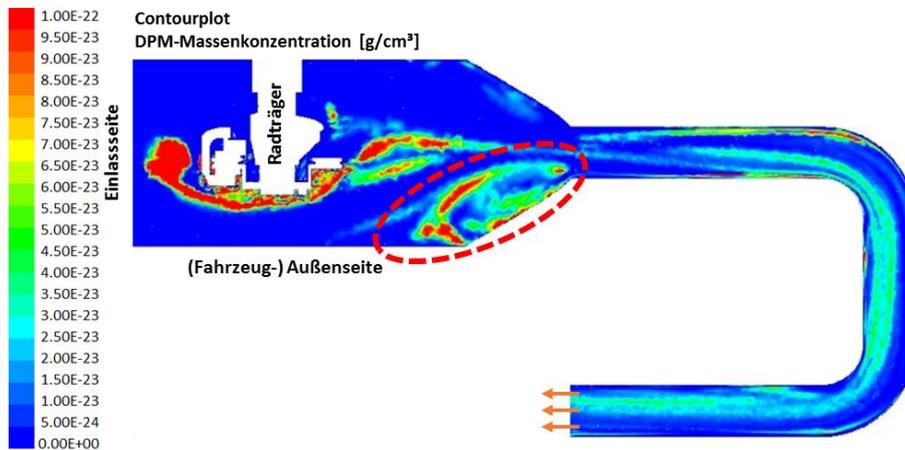


Abbildung 3-30: DPM Massenkonzentration 1 µm, 80 km/h, Evakuierung in FR – 850 m³/h

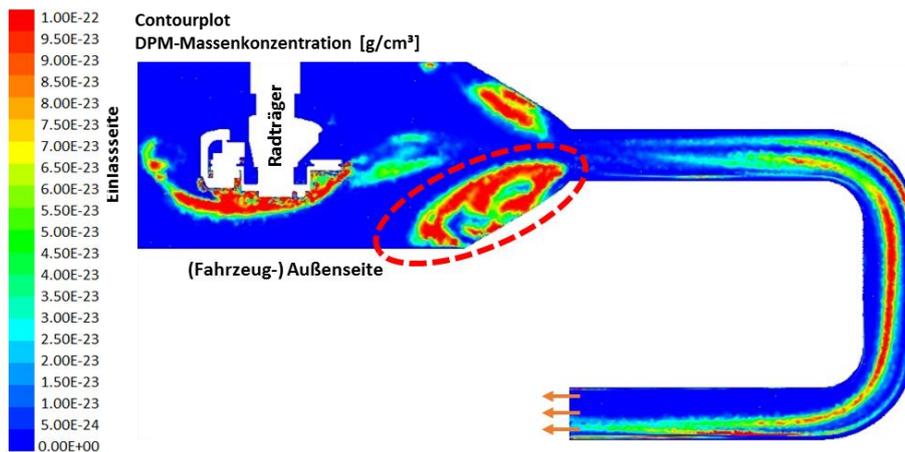


Abbildung 3-31: DPM Massenkonzentration 10 µm, 80 km/h, Evakuierung in FR – 850 m³/h

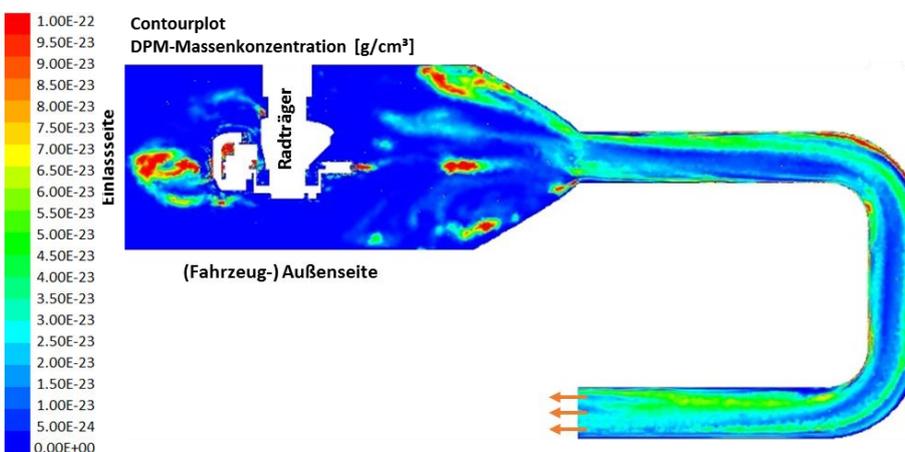


Abbildung 3-32: DPM Massenkonzentration 1 µm, 120 km/h, Evakuierung in FR – 850 m³/h

Neben dem vermehrten Einströmen der 1 µm-Partikel in die obere Kanalhälfte ist zudem eine erhöhte Partikelansammlung auf der Außenseite des Bremssystems (vgl. Abbildung 3-30, rot

markierter Bereich) erkennbar, was aus dem Einfluss der Innenbelüftung und der daraus resultierenden Wirbelausbildung sowie aus Abschattungseffekten durch den Radträger und die Prüfstandanbindung resultiert. Die erhöhte Partikelansammlung auf der Außenseite ist auch unter Evakuierung entgegen Fahrtrichtung sowie für 10 µm-Partikel (vgl. Abbildung 3-31) nachweisbar. Unter weiterer Zunahme der Fahrgeschwindigkeit (120 km/h) kann ein insgesamt erhöhter Durchmischungsgrad innerhalb der Umhausung bestätigt werden, was sich positiv auf die Partikelverteilung im Kanal auswirkt (vgl. Abbildung 3-32). Zudem ist infolge der geometrischen Gestaltung des Abluftkanals ein deutlicher Zuwachs der Partikelverteilung (Uniformität) zwischen Einlass- und Auslassbereich zu bestätigen. Die Verteilung innerhalb des Kanals wird signifikant durch den turbulenten Strömungsabriss im Bereich der 90°-Umlenkungen beeinflusst. Für 1 µm-Partikel ist im Vergleich zu 10 µm-Partikel ein deutlich homogeneres Konzentrationsprofil nachweisbar, was die Probenahme bezüglich Repräsentativität positiv beeinflusst. Durch den Einfluss der Impaktion kommt es lokal zu erhöhten Konzentrationsanhäufungen (besonders für 10 µm), insbesondere nach den Krümmungen. Daraus geht hervor, dass zur Gewährleistung einer repräsentativen Probenahme und zur Bestimmung massebezogener PM10-Emissionsfaktoren die geometrische Gestaltung des gesamten Probenahmesystems von essentieller Bedeutung ist. In Tabelle 3-1 wurde als Anforderung an ein Probenahmesystem unter anderem eine maximale Transporteffizienz aufgeführt. Bislang unberücksichtigt blieb hingegen die Forderung nach einer Konstanz der Transporteffizienz unter Parametervariation. Erst durch eine möglichst geringe Beeinflussung des Partikeltransportes kann eine repräsentative Probenahme, z. B. über den Verlauf eines Prüfzyklus, gewährleistet werden. Zur Überprüfung ist in Abbildung 3-33 und Abbildung 3-34 die Transporteffizienz des stationären Probenahmesystems (Umhausung + Abluftkanal) unter Variation von Fahrgeschwindigkeit und Evakuierungsrichtung gegenübergestellt.

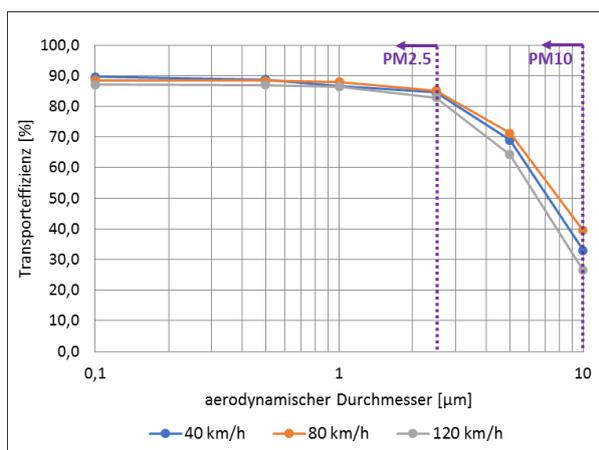


Abbildung 3-33: Transporteffizienz stat. Probenahmesystem (Umhausung+Kanal) – Evakuierung gegen FR

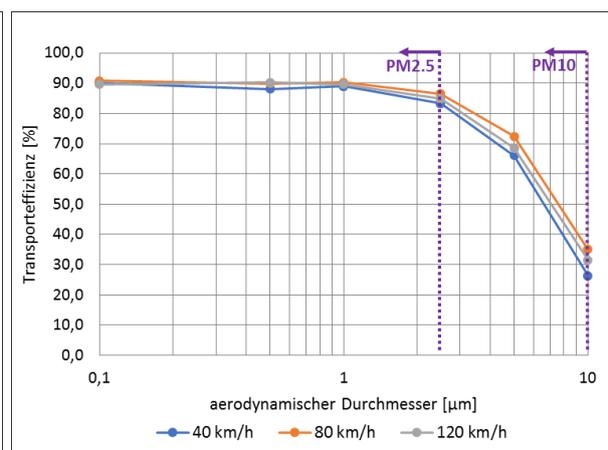


Abbildung 3-34: Transporteffizienz stat. Probenahmesystem (Umhausung+Kanal) – Evakuierung gegen FR

Auf die Berücksichtigung abgechiedener Partikel an der Belagfase, am Bremssattel und im Bereich der inneren Scheibenventilation wird verzichtet. Auch der Einfluss dynamischer Geschwindigkeitsprofile, welche typisch für Prüfzyklen sind und der Bewertung des Einflusses

des hochgradig transienten Verhaltens der turbulenten Strömung in der Peripherie der Brems-scheibe dienen, wird im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Auf Basis der vorgestellten Me-thodik ist jedoch der Übergang zu transienten Simulationen möglich.

Aus dem Vergleich der Transporteffizienzkurven ist abzuleiten, dass 2,5 µm-Partikel über alle Fahrgeschwindigkeiten durch eine Transporteffizienz > 80 % charakterisiert sind. Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit bewirkt eine maximale Abweichung von bis zu 10 %. Eine Beeinflus-sung durch die Evakuierungsrichtung ist besonders für 10 µm-Partikel festzustellen, wobei die maximale Abweichung ca. 7 % beträgt. Eine optimale Effizienz liegt unabhängig von der Eva-kuierungsrichtung bei 80 km/h vor. Für eine Geschwindigkeit von 120 km/h ist unabhängig von der Evakuierungsrichtung ein erhöhter Abscheidegrad innerhalb der Umhausung nachweis-bar, was durch die erhöhte kinetische Energie der Partikel und der bereits beschriebenen Zu-nahme der Partikelverteilung zu erklären ist. Der Anteil der im Abluftkanal abgeschiedenen Partikel ist im Vergleich zur Umhausung teils deutlich reduziert und liegt unter Evakuierung in Fahrtrichtung zwischen 10 % (120 km/h) und 36 % (40 km/h). Unter Evakuierungsrichtungs-umkehr können infolge eines erhöhten Abscheidegrades innerhalb der Umhausung Anteile zwischen 7 % (120 km/h) und 23 % (40 km/h) nachgewiesen werden. Der Vorteil erhöhter Uni-formität für Partikel ≤ 2,5 µm durch das Design des Abluftkanals mit integrierten 90°-Krüm-mungen geht mit geringfügig erhöhten Partikelverlusten > 5 µm infolge des Einflusses der Im-paktion einher. Zur Bewertung des Einflusses der Strömungsbedingungen ist in Abbildung 3-35 bis Abbildung 3-38 die Partikelverteilung für 1 µm- und 10 µm-Partikel für einen Evakuie-rungsvolumenstrom von 425 m³/h, einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h unter Variation der Evakuierungsrichtung gegenübergestellt. Durch die reduzierte Absaugwirkung nimmt die Par-tikelverteilung in radialer Richtung der Scheibe deutlich zu. Die Folge ist eine erhöhte Abschei-derate für 10 µm-Partikel im unteren Bereich der Umhausung und eine Reduktion der Trans-porteeffizienz um ca. 7 %. Unter weiterer Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit (> 80 km/h) steigen die Partikelverluste innerhalb der Umhausung weiter an. Folglich ist auch der Abstand um die Bremse (radial) bei der Auslegung eines Probenahmesystems zu berücksichtigen.

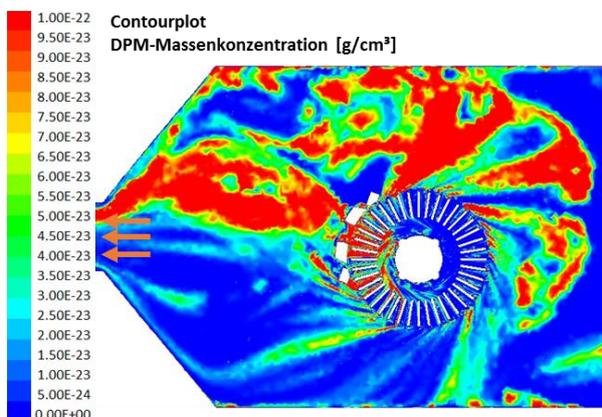


Abbildung 3-35: DPM Massenkonzentration 1 µm, 80 km/h, Evakuierung gegen FR – 425 m³/h

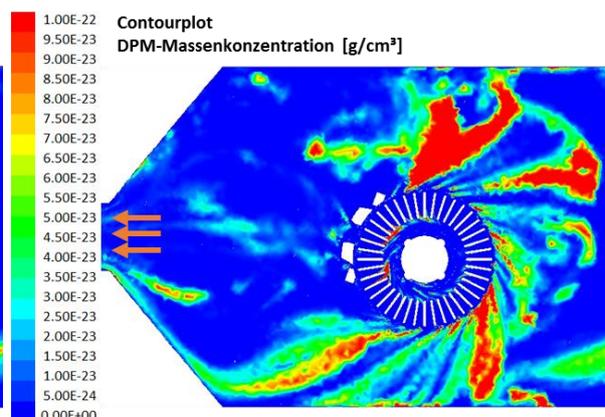


Abbildung 3-36: DPM Massenkonzentration 10 µm, 80 km/h, Evakuierung gegen FR – 425 m³/h

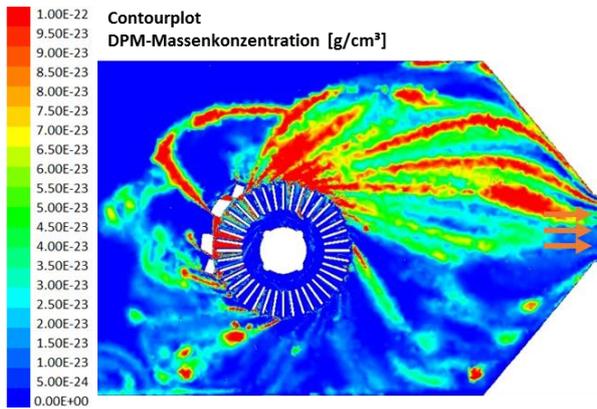


Abbildung 3-37: DPM Massenkonzentration 1 µm, 80 km/h, Evakuierung in FR – 425 m³/h

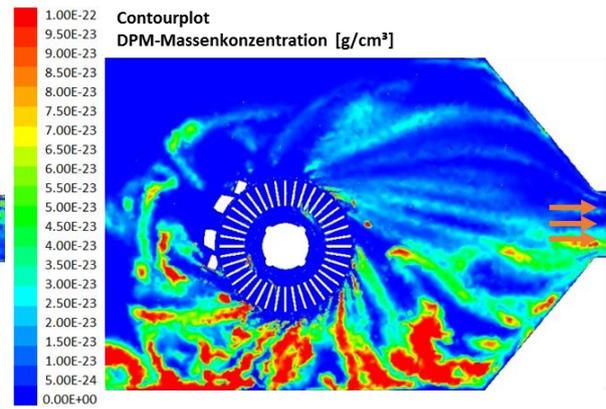


Abbildung 3-38: DPM Massenkonzentration 10 µm, 80 km/h, Evakuierung in FR – 425 m³/h

Gemäß Abbildung 3-39 ist der Einfluss von Abschattungseffekten durch die Geometrie des Radträgers reduziert, wobei der Einfluss der Scheibenventilation auf die Injektion im Bereich der Innen- und Außenseite weiterhin deutlich ausgeprägt ist. Vorteilhaft wirkt sich der reduzierte Volumenstrom hingegen auf die Partikelverteilung im Abluftkanal (Uniformität) aus.

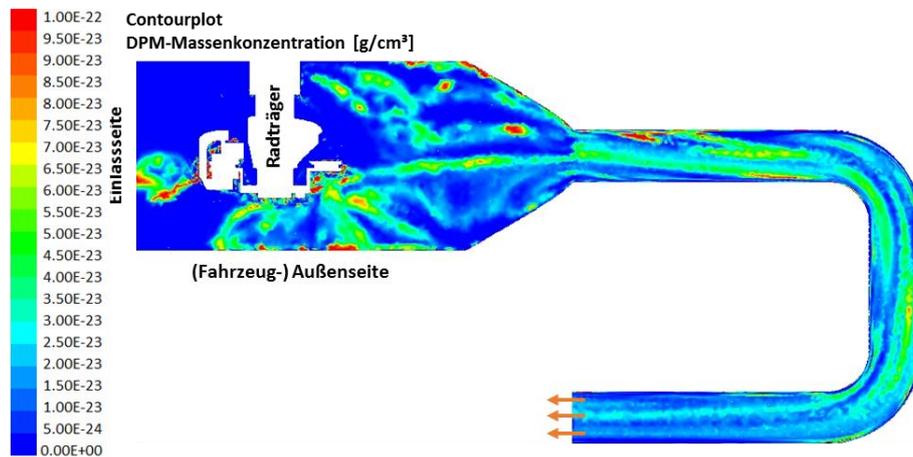


Abbildung 3-39: DPM Massenkonzentration 1 µm, 80 km/h, Evakuierung in FR – 425 m³/h

Eine Auflistung und Bewertung konstruktiver und geometrischer Änderungsansätze für das vorgestellte stationäre Probenahmesystem (vgl. Abbildung 3-1) ist Tabelle 3-3 zu entnehmen. Zusammenfassend ist eine grundsätzliche und sektional differenzierte Beeinflussung von Partikeltransport bzw. Partikelabscheidung durch die Rotationsgeschwindigkeit und die Evakuierungsrichtung zu bestätigen. Insgesamt ist die Intensität im Vergleich zur Beeinflussung durch das geometrische Design des Probenahmesystems und den Strömungsbedingungen als gering einzustufen. Eine Bewertung einzelner Parameter anhand experimenteller Untersuchungen folgt in Abschnitt 4. Aus den simulativen Untersuchungen ist festzuhalten, dass für eine zielführende Entwicklung eines Probenahmesystems, unabhängig von der geometrischen Gestaltung, als Grundvoraussetzung die allgemeine und gegenseitige Bewertung von Einflussgrößen erforderlich ist. Die Bewertung erfolgt idealerweise mithilfe der vorgestellten Simulationsmethodik. Auf deren Basis können erstmals unterschiedlichste Arten von Probenahmesystemen vollumfänglich miteinander verglichen und bewertet werden, was die Basis für die Entwicklung von Probenahmesystemen für regulatorische Messungen darstellt.

Tabelle 3-3: Bewertung konstruktiver und geometrischer Änderungen an einem Probenahmesystem

Nr.	Bezeichnung	Bewertung
1	Horizontal verlaufendes, geradliniges Rohr gemäß GRPE-53-03	Die Probenahme erfolgt zur Gewährleistung einer hinreichenden Strömungsuniformität in einem Abstand des 10–20-fachen des Kanaldurchmessers zur Reduktion des Einflusses der Impaktion; nachteilig ist die nicht praxistaugliche Kanallänge und der (geringe) Einfluss der Sedimentation.
2	Evakuierung nach unten über ein vertikales Fallrohr	Erhöhte Transporteffizienz über den gesamten Partikelgrößenbereich möglich; zur Gewährleistung einer hinreichenden Strömungsuniformität ist ein erhöhtes Raumangebot notwendig, was die Praxistauglichkeit einschränkt.
3	Evakuierung nach oben, Kanal mit 180°-Bogen zur Montage eines Fallrohrs	Reduzierter Raumbedarf und damit gesteigerte Praxistauglichkeit gegenüber den Ansätzen 1 und 2; Erhöhung der Strömungsuniformität möglich, jedoch erhöhte Transportverluste durch vertikale Höhendifferenz.
4	Reduktion (Fall 1) oder Erhöhung (Fall 2) des Kanaldurchmessers	Fall 1 führt bei sonst konstanten Betriebsbedingungen zu einer Erhöhung von Strömungsgeschwindigkeit, Turbulenzgrad und Einfluss der Impaktion und Wirbelträgeit unter Reduktion der Partikelverweilzeit im Kanal sowie des (geringen) Einflusses der Sedimentation; für Fall 2 kehren sich Vor- und Nachteile jeweils um; für Fall 1 folgt eine Reduktion der notwendigen Kanallänge zur Gewährleistung eines hinreichenden Uniformitätsgrades.
5	Reduktion (Fall 1) oder Erhöhung (Fall 2) des Abstandes Bremse (radial) zu Umhausung	Fall 1 führt bei sonst konstanten Betriebsbedingungen zu einer Reduktion der Partikelverweilzeit und zur Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit um die Bremse, was sich positiv auf den Partikeltransport und die Kühlbedingungen auswirkt; Ausschluss der Adaption originaler Radträgeraufbauten (knuckle) infolge des verfügbaren Bauraums.

3.4 Probenahmesystem für Realfahrtanwendung

In diesem Abschnitt werden simulativen Untersuchungen zur Partikeldynamik innerhalb eines Probenahmesystems für die mobile Anwendung (vgl. Abbildung 3-2 und Abbildung 3-40) vorgestellt, was einen Direktvergleich mit den Vorgängen im stationären System ermöglicht.

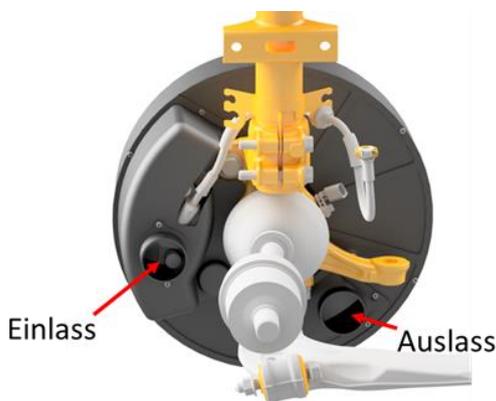


Abbildung 3-40: Konstantvolumen-Probenahmesystem für die mobile Anwendung [HES19a, AUG19c]

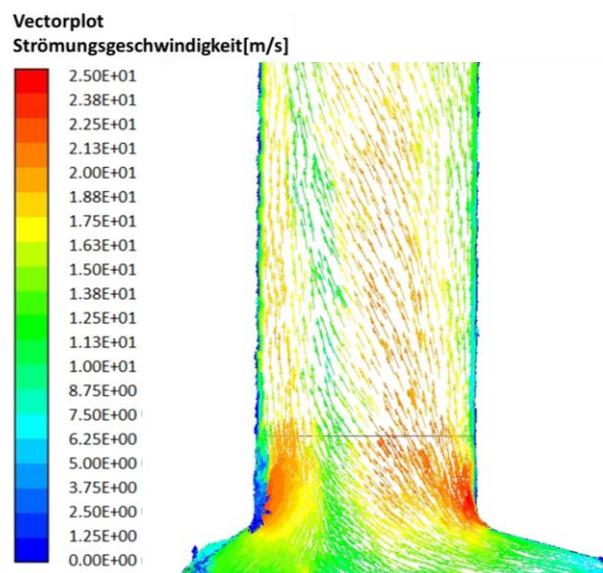


Abbildung 3-41: Strömung im Bereich der Auslassgeometrie, 80 km/h – 120 m³/h [STO19]

Durch lokal abweichende Strömungsgeschwindigkeiten und damit korrelierenden Turbulenzgraden, wird eine lokale Netzanpassung erforderlich, um die Forderung nach $y^+ < 1$ zu erfüllen. Die Randschichtvernetzung wird auf bis zu 28 Schichten erhöht, um die Grenzschicht vollständig abzudecken. Das aus dem verfügbaren Bauraum resultierende, reduzierte Gehäusevolumen und die Geometrieänderungen sind als Herausforderung zur Gewährleistung eines effizienten Partikeltransportes zu bewerten. Kritische Orte sind die in radialer Scheibenrichtung befindliche Innenseite der Umhausung (Abscheidung als Funktion von der Rotationsgeschwindigkeit), die Auslassgeometrie (vgl. Abbildung 3-41), die Krümmung des Abluftkanals und der Diffusor. Gemäß Abbildung 3-42 wird die Bremse nahezu vollständig umströmt. Nach der Ablenkung im Bereich des Sattels entstehen Bereiche mit ausgeprägter Turbulenz. Die Strömung in den Zwischenräumen und die aus der inneren Scheibenbelüftung resultierende Sogwirkung steigen unter Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit (rote Markierung). Letztere weist im Vergleich zur Einlassströmung einen untergeordneten Einfluss auf. Im Bereich des Querschnittsüberganges folgt ein Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit, was im weiteren Verlauf zu einer Erhöhung des Durchmischungsgrades bzw. der Uniformität führt. Die Strömung weist über den gesamten Querschnitt der Auslassgeometrie einen hohen Grad an Uniformität auf.

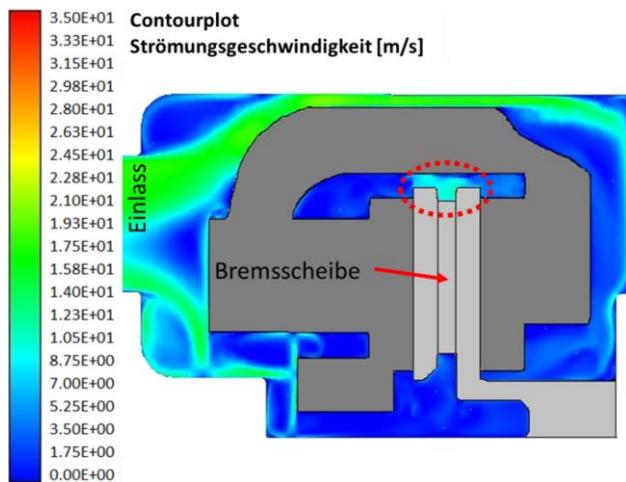


Abbildung 3-42: Strömungsgeschwindigkeit um den Brems-sattel [STO19]

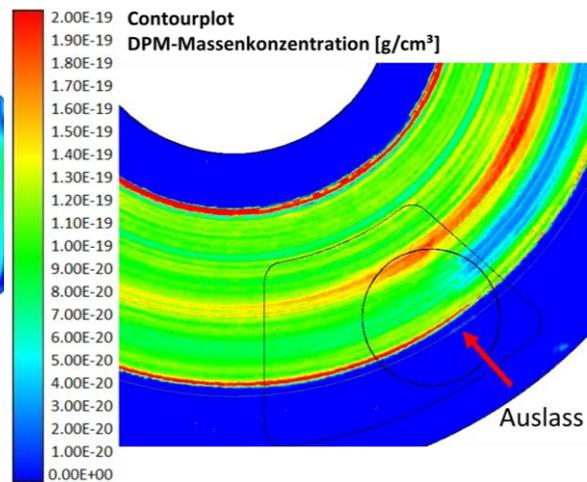


Abbildung 3-43: DPM-Massenkonzentration, 1 µm, Auslassgeometrie (Innenseite) [STO19]

In der Umlenkung des Kanals können im Bereich der Kanalinnenseite Totwassergebiete und lokale Strömungsabrisse ausfindig gemacht werden. Die Scheibenrotation bewirkt in diesem Zusammenhang eine Verschiebung von Strömungen erhöhter Geschwindigkeit in Richtung der kurveninneren Seite. Die Geometrie des Diffusors bewirkt eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit sowie lokale Strömungsablösungen. Der Prozess des tangentialen Verlassens sowie des Überganges in die Grenzschicht ist zum stationären Probenahmesystem vergleichbar. Gemäß Abbildung 3-43 kann für Geschwindigkeiten < 80 km/h und Partikel ≤ 1 µm durch die Absaugwirkung auf der fahrzeuginneren und teilweise auch auf der fahrzeugäußeren Scheibenseite eine lokale Partikelablösung beobachtet werden. Aus den in Abbildung 3-44 und Abbildung 3-45 dargestellten DPM-Massenkonzentrationen (1 µm- und 10 µm-Partikel) ist

auf der Außenseite eine erhöhte Konzentration infolge der vorliegenden Strömungsbedingungen auszumachen. Die an der Innenseite (links) injizierten $1\ \mu\text{m}$ -Partikel werden zu einem hohen Teil in den Bereich der inneren Scheibenbelüftung transportiert. Darüber hinaus ist der Einfluss des oben beschriebenen Evakuierungsstromes (Auslass) für eine reduzierte Konzentration im linken Bereich der Scheibe verantwortlich. Der Vergleich der Transporteffizienz für die mobile Anwendung (Umhausung inkl. Abluftkanal) erfolgt gemäß Abbildung 3-46 und Abbildung 3-47 unter Variation von Fahrgeschwindigkeit und Volumenstrom. Vergleichbar mit der Transporteffizienz des stationären Probenahmesystems (vgl. Abbildung 3-33 und Abbildung 3-34) können signifikante Partikelabscheidungen $> 2,5\ \mu\text{m}$ nachgewiesen werden. Als Abscheideorte sind die Innenseite der Umhausung, die Innenbelüftung der Scheibe sowie der Abluftkanal infolge von Geometrieänderungen auszumachen.

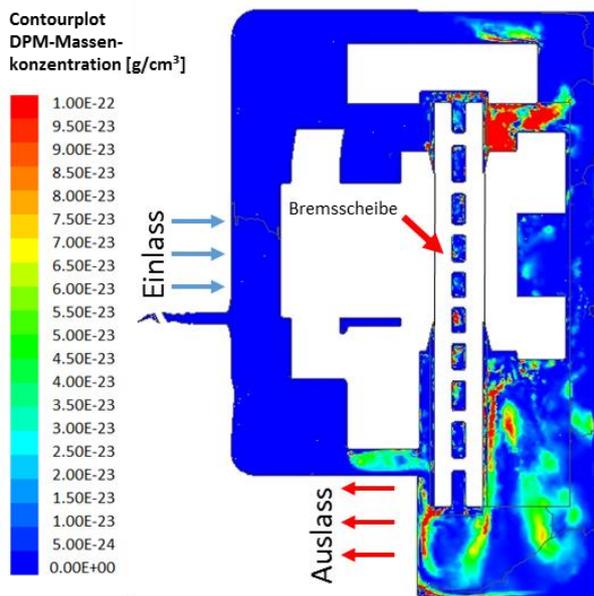


Abbildung 3-44: DPM Massenkonzentration für $1\ \mu\text{m}$ -Partikel bei $80\ \text{km/h}$

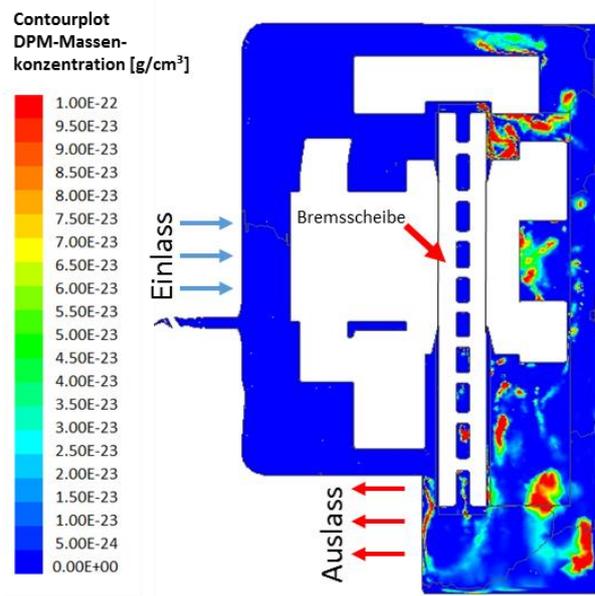


Abbildung 3-45: DPM Massenkonzentration für $10\ \mu\text{m}$ -Partikel bei $80\ \text{km/h}$

Die Abscheidungen im Abluftkanal sind den Bereichen der Auslassgeometrie, der Krümmung und dem Diffusor zuzuweisen. Vereinzelt können auch auf der Radnabe und dem Bremsscheibentopf abgeschiedene Partikel erfasst werden. Partikel auf der Scheibeninnenseite werden weniger von der direkten Evakuierungsströmung beeinflusst, was zu einer vermehrten Abscheidung auf der Innenseite der Umhausung führt. Zudem kommt es mit steigender Rotationsgeschwindigkeit zu einer Zunahme der Abscheidung innerhalb der Umhausung, am Bremssattel und im Bereich der Scheibeninnenbelüftung. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Transporteffizienz sehr sensitiv auf Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit und dem damit gekoppelten Strömungsfeld reagiert (vgl. Abbildung 3-46). Der Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit auf den Partikeltransport innerhalb des Abluftkanals ist als vergleichsweise gering zu bewerten. Aus Abbildung 3-47 geht eine Erhöhung des Abscheidegrades unter Zunahme des Evakuierungsvolumenstromes ($240\ \text{m}^3/\text{h}$) infolge des Einflusses der Impaktion im Bereich von Geometrieänderungen bzw. Krümmungen (insbesondere $> 2,5\ \mu\text{m}$) hervor. Unter

Reduktion des Evakuierungsvolumenstromes (120 m³/h) ist eine reduzierte Evakuierungsleistung der mit der Scheibe bewegten Partikel auszumachen, wodurch ein erhöhter Anteil von der Innenbelüftung der Scheibe angesaugt und in dieser Peripherie abgeschieden wird.

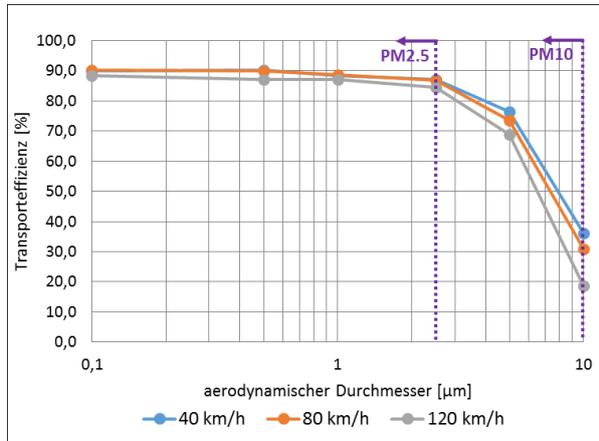


Abbildung 3-46: Transporteffizienz RDE-Probenahmesystem – Geschwindigkeitsvariation (120 m³/h) [STO19]

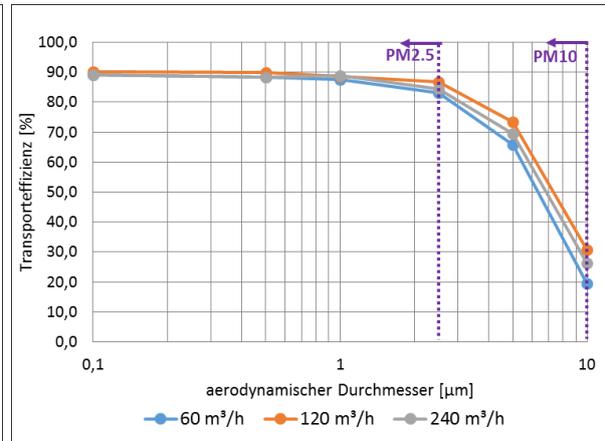


Abbildung 3-47: Transporteffizienz RDE-Probenahmesystem – Volumenstromvariation (80 km/h) [HES19a]

Im Vergleich zum stationären Probenahmesystem ist die mobile Anwendung durch einen insgesamt erhöhten Abscheidegrad gekennzeichnet, der aus dem reduzierten Systemvolumen und einer Änderung der Partikelbewegungsrichtung resultiert und als negativ bezüglich der Bestimmung von PM10-Emissionsfaktoren zu bewerten ist. Abgeleitet aus den in Tabelle 3-3 aufgeführten Optimierungsansätzen, besteht erhöhtes Potenzial in einer geometrischen Anpassung der Auslassgeometrie. Durch eine Aufweitung und Integration erhöhter Krümmungsradien können abrupte Richtungsänderungen und damit eine Anpassung des Strömungsfeldes sowie des Einflusses der Impaktion deutlich optimiert werden. Geometriebedingt ist besonders unter hoher Rotationsgeschwindigkeit das geringe Volumen bzw. der Abstand zwischen Bremse und Umhausung als primäre Herausforderung des Konzeptes anzusehen.

3.5 Fazit zu den simulativen Untersuchungen

Bisherige Ansätze zur Modellierung der Partikeldynamik basieren auf mathematischen Modellen, die eine Verifizierung des Geometrieinflusses in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit, Partikeldurchmesser und Partikeldichte ermöglichen. Dies erlaubt anhand der Definition von Start- und Endpunkt die Bestimmung der Transporteffizienz innerhalb stark vereinfachter, durchströmter Geometrien. Auch mithilfe der numerischen Strömungssimulation existierte bislang kein Ansatz zur Modellierung einer realitätsnahen Partikelinjektion, was die Grundvoraussetzung für eine zielgerichtete Analyse der Partikeldynamik darstellt. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, welche auf die Auflösung der Grenzschicht der Scheibe abzielt und die Modellierung der Scheibenventilation berücksichtigt. Damit wird erstmals, auch international, eine realitätsnahe Analyse und Bewertung des Partikelaustritts- und Abscheideverhaltens innerhalb eines Konstantvolumen-Probenahmesystems unter Variation von Volumenstrom, Rotationsgeschwindigkeit und Partikelcharakteristik möglich.

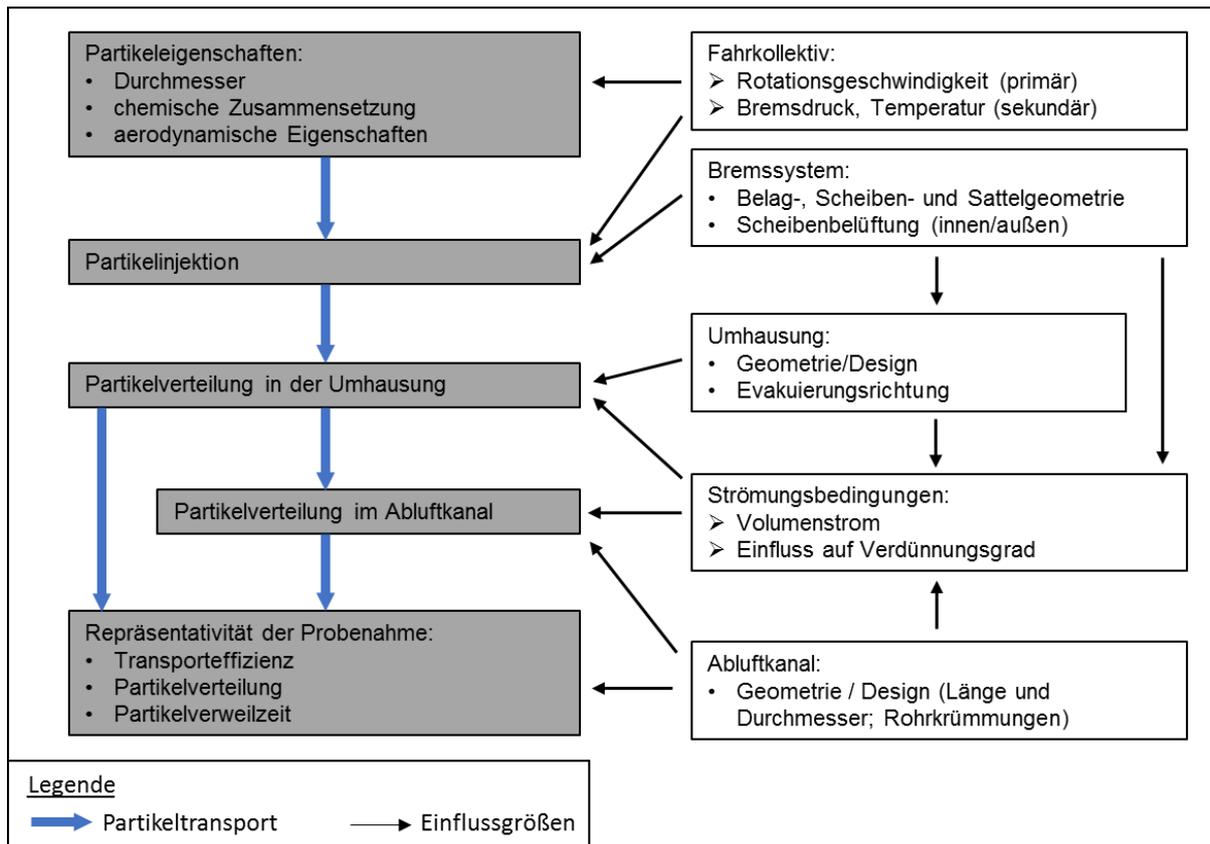


Abbildung 3-48: Einflüsse auf den Partikeltransport (Konstantvolumen-Probenahmesystem)

In Abbildung 3-48 sind die analysierten Wechselwirkungen gegenübergestellt. Eine Bewertung erfolgt in Tabelle 3-4. Die Bewertung von Einflussgrößen auf die Eigenschaften emittierter Partikel folgt in den Abschnitten 5 und 6. Die Repräsentativität des Messergebnisses wird durch die Partikelinjektion und die Partikelverteilung innerhalb des Probenahmesystems beeinflusst. Die Partikelverteilung und Partikelabscheidung innerhalb der Umhausung, im Übergangsbereich zwischen Umhausung und Abluftkanal, innerhalb des Abluftkanals und an der Position der Probenahme unterscheiden sich signifikant für variierende Partikeldurchmesser. Aus den Untersuchungen anhand eines Probenahmesystems für stationäre Anwendung konnte eine signifikante Abhängigkeit von der Evakuierungsrichtung abgeleitet werden. Durch die geometrische Gestaltung des Abluftkanals konnte eine Steigerung der Uniformität nachgewiesen werden, welche jedoch mit größenspezifischen Partikelverlusten einhergeht (insbesondere > 2,5 µm). Maßgeblich für die Partikelverteilung und die Repräsentativität des Messergebnisses sind die vorliegenden Strömungsbedingungen, welche direkt vom eingestellten Druckgefälle und den geometrischen Randbedingungen beeinflusst werden. Im Falle eines reduzierten Volumenstromes konnte eine verbesserte Partikelverteilung sowie reduzierte Partikelverluste im Abluftkanal, jedoch erhöhte Verluste innerhalb der Umhausung nachgewiesen werden. Aus den vielfältigen Einflussgrößen und Wechselwirkungen ist die Auslegung eines Probenahmesystems insgesamt als Kompromissentscheidung zu verstehen. Dabei sind die geometrische Gestaltung und die Festlegung des Volumenstromes zur Gewährleistung einer maximalen und möglichst konstanten Transporteffizienz und Uniformität, was besonders unter

Variation der Rotationsgeschwindigkeit bzw. zyklischer Beanspruchung als Herausforderung anzusehen ist, zu berücksichtigen. Erst durch eine möglichst hohe Konstanz wird eine hohe Repräsentativität bei der parallelen Probenahme und Messung anzahl- und massebezogener Emissionsfaktoren ermöglicht. Damit ist besonderer Wert auf das Partikelverhalten der Fraktion > 2,5 µm zu legen, wobei sich Partikelverluste gemäß der in Abschnitt 2.3 präsentierten Größenverteilung primär auf die Bestimmung massebezogener Emissionsfaktoren auswirken.

Tabelle 3-4: Bewertung von Einflussgrößen auf die Repräsentativität der Probenahme

Untergruppe	Parameter	Bewertung	Einflussbeschreibung
Partikelinjektion	Rotationsgeschwindigkeit	4	Einfluss auf die (Partikel-) Injektionsgeschwindigkeit und die damit korrelierende kinetische Energie bzw. Trägheit
	Partikelgröße/ Partikeldurchmesser	4	Grenzschichtübergang/Injektion: 10 µm-Partikel gehen nach längerer Distanz in die Grenzschicht über; geringer Anteil der 10 µm-Partikel in der Grenzschicht gebunden: primäre Injektion in tangentialer Richtung; Injektion während Scheibenrotation: ≤ 1 µm-Partikel werden nahezu vollständig gebunden, 10 µm-Partikel verlassen zu einem höheren Anteil die Grenzschicht in radialer Richtung
	Geometrie des Bremssystems	2	Einfluss durch Scheibenbelüftung (innen/außen) sowie Belag-, Scheiben- und Sattelgeometrie / -orientierung
Verteilung und Transport in der Umhausung	Strömungsbedingungen	4	Volumenstrom und Turbulenz als maßgebende Einflussgrößen auf die Partikelverteilung; größenabhängige Unterschiede (Einfluss Transportmechanismen)
	Design der Umhausung	3	Einfluss infolge der Geometrie der Umhausung und Evakuierungsrichtung, Radträger und Prüfstandanbindung
Verteilung und Transport im Abluftkanal	Strömungsbedingungen	4	Volumenstrom und Turbulenz als maßgebende Einflussgrößen auf die Partikelverteilung; größenabhängige Unterschiede (Einfluss Transportmechanismen)
	Design des Abluftkanals	3	Beeinflussung des Uniformitätsgrades und des Transportes (insb. trägheitsbedingte Partikelabscheidung) durch Kanallänge, -durchmesser, Krümmungsradien
Bewertungsgrößen: 1 – schwacher Einfluss; 2 – mittlerer Einfluss, 3 – starker Einfluss, 4 – sehr starker Einfluss			

4 Methoden der experimentellen Validierung

Aufbauend auf den in Abschnitt 3 vorgestellten Untersuchungen, werden in diesem Abschnitt methodische Ansätze zur experimentellen Validierung vorgestellt und Zusammenhänge herausgearbeitet. Zunächst werden Emissionscharakteristiken am Beispiel eines stationären Konstantvolumen-Probenahmesystems beschrieben. Darauf aufbauend wird der Einfluss variierender Parameter auf die Partikelverteilung und Partikelabscheidung bewertet sowie spezifische Abscheidegeschwindigkeiten ermittelt. Die Untersuchungen erfolgen anhand einer Einkolben-Schwimmsattelbremse (Bremsen 1) mit einem effektiven Reibradius von 133,5 mm unter Verwendung eines kupferhaltigen Low-Steel-Belages (ECE-kh; vgl. Abschnitt 5.2), wobei abschnittsweise ein Vergleich mit einem kupferhaltigen NAO-Belag (NAO-kh; vgl. Abschnitt 5.2) erfolgt. Die Untersuchungen werden unter Simulation eines Trägheitsmoments von $73,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ durchgeführt. Als Prüfparameter kommen die aus den AK-Master-Druckreihen 4.1 (40 → 5 km/h), 4.2 (80 → 40 km/h), 4.3 (120 → 80 km/h) sowie 4.4 (160 → 130 km/h) abgeleiteten Geschwindigkeitsbereiche und Bremsdrücke gemäß [AKM98] zur Anwendung. Die AK-Master-Druckreihen dienen über den weiteren Verlauf dieser Arbeit als Vergleichsnorm zur Bewertung des Einflusses von Geschwindigkeit und Bremsdruck.

4.1 Evaluierung von Emissionscharakteristiken

In Abschnitt 3 erfolgte die Beschreibung des Mechanismus der Partikelinjektion, welcher durch einen Partikelübergang in die Grenzschicht, der Mitführung in Rotationsrichtung und dem tangentialen Verlassen der Grenzschicht bzw. Scheibe charakterisiert ist. Der vorliegende Abschnitt dient zur messtechnischen Erfassung von Emissionscharakteristiken unter Verwendung eines Konstantvolumen-Probenahmesystems für stationäre Anwendungen und variierenden Geschwindigkeits- und Bremsdruckprofilen. Darauf aufbauend folgt eine Bewertung zum Einfluss des Druckgradienten und der Scheibenrotation auf das Emissionsverhalten.

4.1.1 Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit und des Bremsdruckes

Zur visuellen Beurteilung (vgl. Abschnitt 3) des Partikelemissionsverhaltens eines ECE-kh-Belages, sind in Abbildung 4-1 Laseraufnahmen über einzelne Geschwindigkeitsbereiche der AK-Master-Druckreihen für einen Bremsdruck von je 30 bar gegenübergestellt; erstellt 0,2 s nach Druckanstieg (Druckgradient: 200 bar/s). Durch die Geschwindigkeitsvariation stellt sich insbesondere der Einfluss der geschwindigkeitsabhängigen Reibenergie heraus, welcher maßgeblich für die Intensität der emittierten Partikelanzahl ist. Die Partikel verlassen die Peripherie der Scheibe unabhängig von der Rotationsgeschwindigkeit in tangentialer Richtung oder folgen der Rotationsrichtung der Scheibe. Diese Partikelbewegung ist auch in Bereichen $> 90^\circ$ nach Sattelauslass erkennbar (vgl. Abschnitt 3) [AUG11]. Darüber hinaus ist über alle Geschwindigkeitsbereiche das bereits beschriebene, stark transiente Verhalten, welches sich

in Form einer wolkenartigen Injektion äußert und die Partikelverteilung innerhalb des Probenahmesystems beeinflusst, zu beobachten. Zur Bewertung der zeitaufgelösten Injektionsdynamik ist in Abbildung 4-2 die Partikelkonzentration zu unterschiedlichen Zeitpunkten über die Druckreihe 4.4 (30 bar) dargestellt. Ab dem Zeitpunkt $t_1 = 0,2$ s entspricht der Bremsdruck dem Sollwert (30 bar). Die Partikelinjektion erfolgt fortlaufend bis zum Ende der Verzögerung (Abfall des Bremsdruckes), wobei zum Zeitpunkt $t_2 = 1,0$ s gemäß des Einflusses der geschwindigkeitsabhängigen Reibenergie eine Reduktion der Emissionsintensität zu erkennen ist.

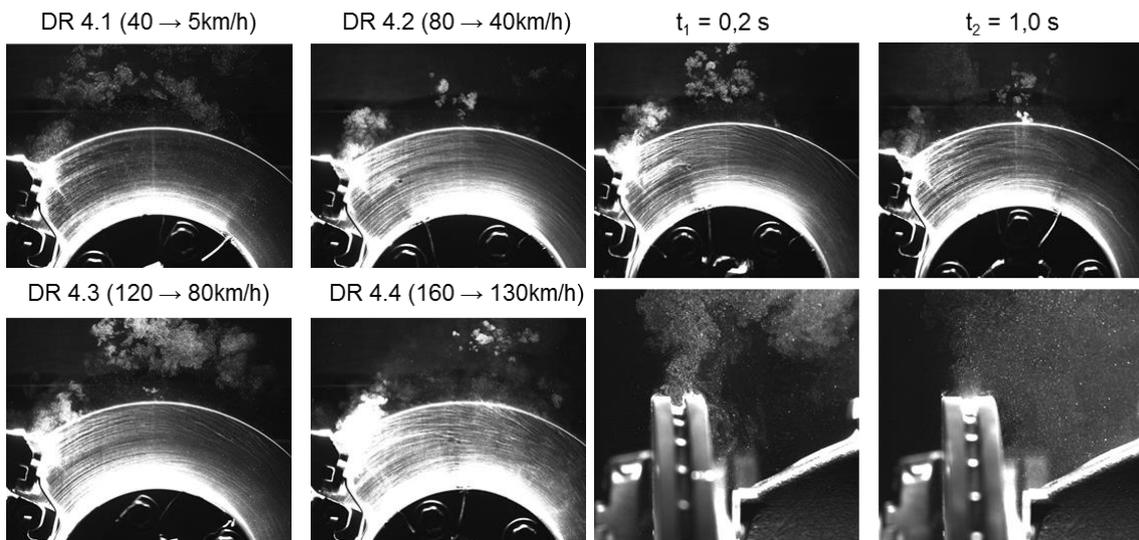


Abbildung 4-1: Visualisierung der emittierten Partikelkonzentration – ECE-kh (30 bar)

Abbildung 4-2: Visualisierung der Partikelkonzentration (zeitaufgelöst) – ECE-kh (DR 4.4)

Zum Zeitpunkt $t_2 = 1,0$ s hat sich auf der Innenseite der innenbelüfteten Scheibe ein Konzentrationsgebiet gebildet, welches gemäß Abschnitt 3 im Kontext eines großräumigen Wirbels steht. Die in Abbildung 4-3 gegenübergestellten Konzentrationsverläufe, erfasst mittels 10 nm-Kondensationspartikelzähler (CPC; vgl. Abschnitt 5.2.1), ermöglichen die Bewertung variierender Betriebsbedingungen auf die Partikelverteilung innerhalb des Probenahmesystems.

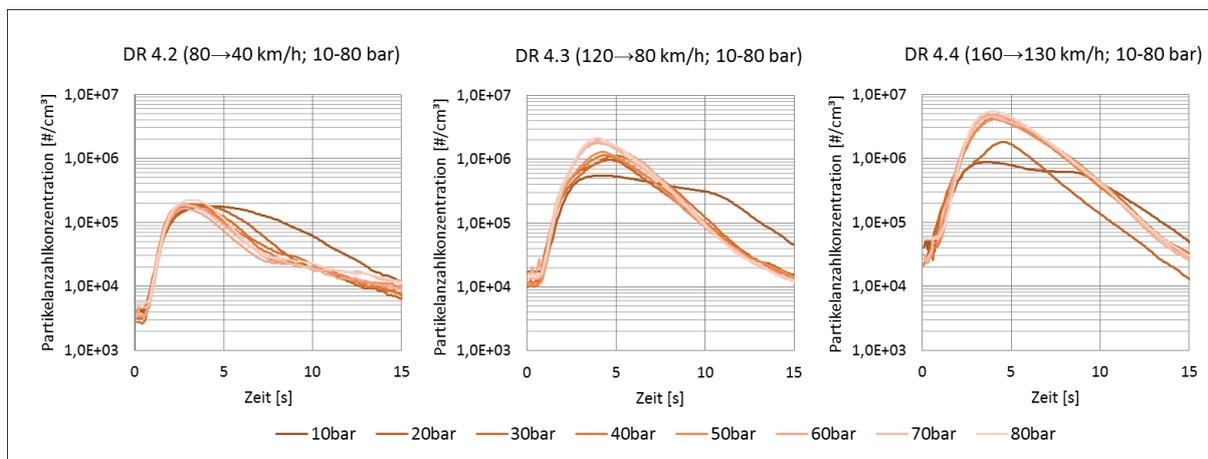


Abbildung 4-3: Verlauf der Partikelanzahlkonzentration – Einfluss initialer Geschwindigkeit und Bremsdruck (ECE-kh)

Die Prüfparameter werden durch die AK-Master-Druckreihen 4.2–4.4 definiert [AKM98]. Die Dauer der Bremsenaktuierung (Schwellenwert: 90 % des Bremsdrucksollwertes) beträgt im Falle der Druckreihe 4.3 für eine 10 bar-Bremsung ca. 8,8 s und für eine 80 bar-Bremsung ca.

0,9 s. Ein globales Konzentrationsmaximum ist ca. 2,8–4,2 s nach Druckaktuierung (Druckgradient: 200 bar/s) nachweisbar, wobei der Konzentrationsgradient, Konzentrationspeak und Konzentrationsverlauf durch die Verweilzeit im Probenahmesystem beeinflusst wird. Demnach können die aus einer 80 bar-Bremmung emittierten Partikel erst nach Abschluss des Bremsvorganges nachgewiesen werden. Dabei ist gemäß Abschnitt 3.3.4 einerseits die Partikelverweilzeit innerhalb des Probenahmesystems zu berücksichtigen, welche den zeitlichen Versatz zwischen dem Zeitpunkt der Injektion, über die Partikelverteilung innerhalb der Umhausung bis zum Erreichen der Probenahme-position repräsentiert und durch das Design von Umhausung und Abluftkanal sowie den Betriebsbedingungen (Evakuierungsvolumenstrom) beeinflusst wird. Andererseits ist die Ansprechzeit des Partikelmesssystems zu berücksichtigen, welche durch die messsysteminterne Durchflussrate und die Sensoreinheit bestimmt wird und für den verwendeten CPC ca. 3 s (T90) beträgt. Nach Überschreiten des dargestellten Konzentrationspeaks fällt die Anzahlkonzentration stetig ab und erreicht nach ca. 15 s die Ausgangskonzentration, welche unter Zunahme der Geschwindigkeit ein erhöhtes Niveau aufweist. Damit können infolge der Partikelverteilung signifikante Konzentrationen mit einem zeitlichen Versatz nach dem eigentlichen Bremsvorgang nachgewiesen werden. Die Unterschiede im Konzentrationsverlauf und -gradienten sind über die Geschwindigkeitsbereiche klein. Auffälligkeiten zeigen sich für die 10 bar- bzw. 20 bar-Bremmung (Druckreihe 4.4) in Form eines reduzierten Konzentrationspeaks bei zeitlich erhöhtem Konzentrationsplateau. Die Intensität der Anzahlkonzentration wird für die definierten Geschwindigkeitsbereiche primär durch die Rotationsgeschwindigkeit und sekundär durch den Bremsdruck beeinflusst. Unterschiede resultieren aus dem Einfluss der Temperatur (vgl. Abschnitt 6.2).

4.1.2 Einfluss des Bremsdruckgradienten

Der Bremsdruckgradient ist definiert als der Anstieg des Bremsdruckes über die Zeit. Unterschiedliche Bremsdruckgradienten sind besonders für Fahrversuche zu erwarten, weshalb nachfolgend eine Einflussbewertung hinsichtlich der Partikelanzahl je Bremsung folgt.

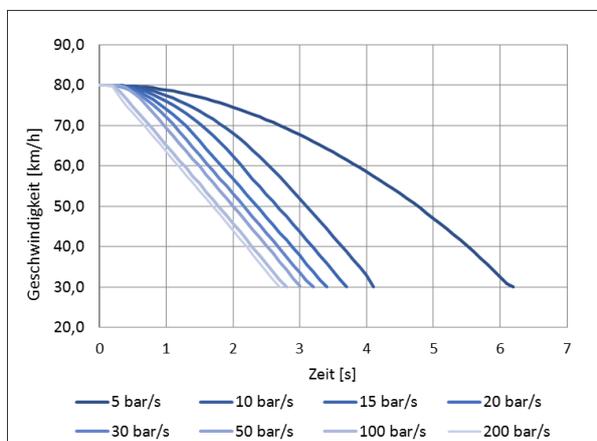


Abbildung 4-4: Einfluss des Bremsdruckgradienten auf Geschwindigkeit (80 → 40 km/h; $p_{\max} = 30$ bar; ECE-kh)

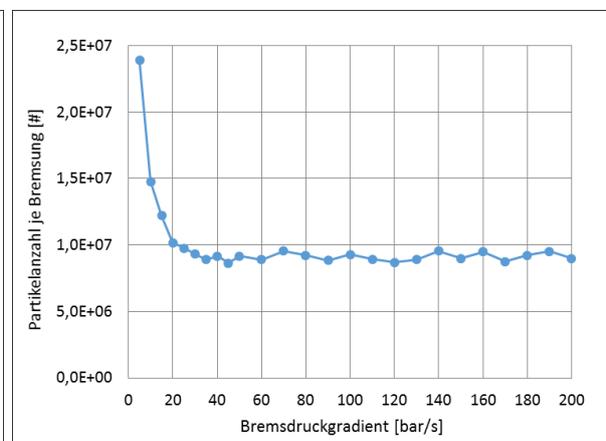


Abbildung 4-5: Variation Bremsdruckgradient – PN je Bremsung (80 → 40 km/h; $p_{\max} = 30$ bar; ECE-kh)

Analysiert werden Druckgradienten von 5–200 bar/s am Beispiel eines Geschwindigkeitsprofils von 80 → 40 km/h bei einem Soll-Bremsdruck von 30 bar. Für die in Abbildung 4-4 gegenübergestellten Geschwindigkeitsverläufe ist für < 50 bar/s eine Beeinflussung des Geschwindigkeitsverlaufes und der Bremsdauer nachweisbar. Die Bremsdauer ist im Falle des niedrigsten Druckgradienten (5 bar/s) um das 2,6-fache gegenüber dem maximalem Druckgradienten (200 bar/s) erhöht. Diese Beobachtung kann auch auf die Partikelanzahl je Bremsung gemäß Abbildung 4-5 übertragen werden (vgl. Abschnitt 5.2). Mit Zunahme des Bremsdruckgradienten amortisiert sich der Einfluss und hebt sich ab ca. 40 bar/s näherungsweise auf.

4.1.3 Sekundärpartikelemissionen

Dieser Abschnitt dient zur Untersuchung des Einflusses der Scheibenrotation in der offbrake-Phase auf das Partikelemissionsverhalten. Bereits in [HAG15, MAT19, FAR19b] wurde die Existenz beschrieben, wobei Erklärungen über den Entstehungsprozess offen blieben. Über den Verlauf der in Abbildung 4-6 dargestellten Laseraufnahmen, welche die Beschleunigungsphase von 40 → 120 km/h (abgeleitet aus der Beschleunigung von AK-Master-Druckreihe 4.2 zu 4.3) darstellen, ist ein geschwindigkeitsabhängiger Anstieg der Partikelkonzentration erkennbar. Zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ s (40 km/h) sind geringfügige Konzentrationsanhäufungen in Form von Schlieren auf der Bremsscheibenoberfläche (rot markierter Bereich) erkennbar, was eine fortlaufende Partikelinjektion im Falle der Scheibenrotation bestätigt. Zum Zeitpunkt der Beschleunigung ($t_1 = 0,8$ s) steigt die Intensität der Partikelkonzentrationen an und erreicht zum Zeitpunkt maximaler Rotationsgeschwindigkeit ($t_2 = 1,6$ s) ein Maximum, d. h. die Intensität der Partikelinjektion ist als Funktion von der Rotationsgeschwindigkeit zu betrachten.

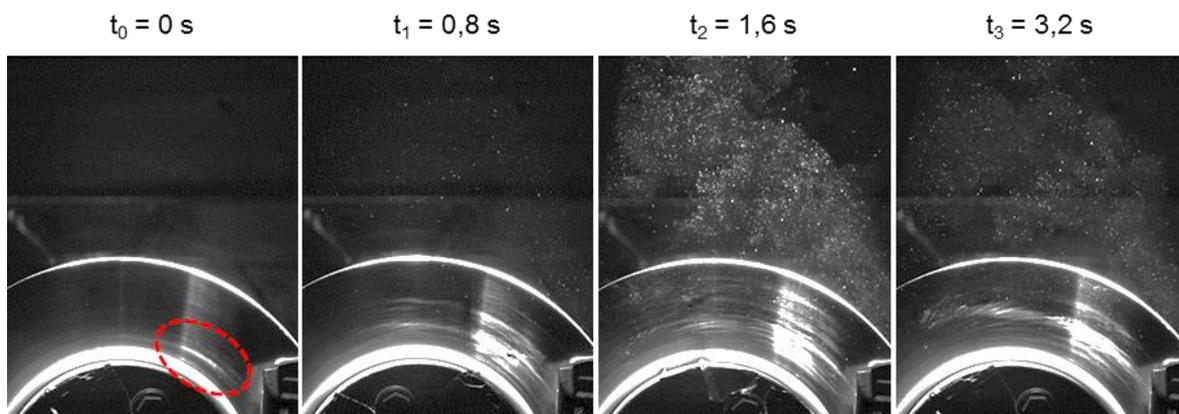


Abbildung 4-6: Partikelkonzentration über eine Beschleunigungsphase auf 120 km/h – ECE-kh

Ab dem Zeitpunkt konstanter Rotationsgeschwindigkeit fällt die Intensität kontinuierlich ab. Die über den Verlauf der offbrake-Phase emittierten Partikel werden nachfolgend als Sekundärpartikel definiert. Zur weiteren Evaluierung dient der in Abbildung 4-7 dargestellte Konzentrationsverlauf über die AK-Master-Druckreihe 4.2 (80 bar) bzw. 4.3 (10 bar mit 2 Wiederholungen), erfasst mittels 10 nm-CPC. Der Zeitpunkt $t = 185$ s repräsentiert den Startpunkt einer Beschleunigung von 40 km/h (Endgeschwindigkeit der Druckreihe 4.2) auf die Initialgeschwin-

digkeit der Druckreihe 4.3 (120 km/h). Diese Beschleunigung geht mit einem Anstieg der Partikelkonzentration bis $8,5E+04 \text{ \#/cm}^3$ einher, gefolgt von einem stetigen Abfall über den Zeitbereich konstanter Rotationsgeschwindigkeit. Zudem übersteigt die während konstanter Rotationsgeschwindigkeit detektierte Anzahlkonzentration die initiale Konzentration zum Startzeitpunkt der Beschleunigungsphase. Die während der Beschleunigungsphase detektierte Peak-Konzentration entspricht ca. 40 % der während der Bremsdruckaktuierung erfassten Peak-Konzentration. Darüber hinaus ist die initiale Beschleunigungsphase auf eine erhöhte Initialgeschwindigkeit (120 km/h) durch eine um Faktor 2–3 erhöhte Peak-Konzentration gegenüber den folgenden Beschleunigungsvorgängen ($t = 360 \text{ s}$ bzw. $t = 545 \text{ s}$) charakterisiert.

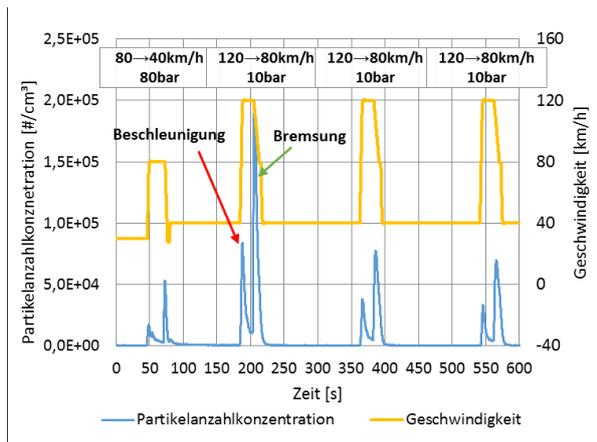


Abbildung 4-7: Einfluss initialer Beschleunigung auf die Sekundärpartikelemission (80 und 120 km/h) – ECE-kh

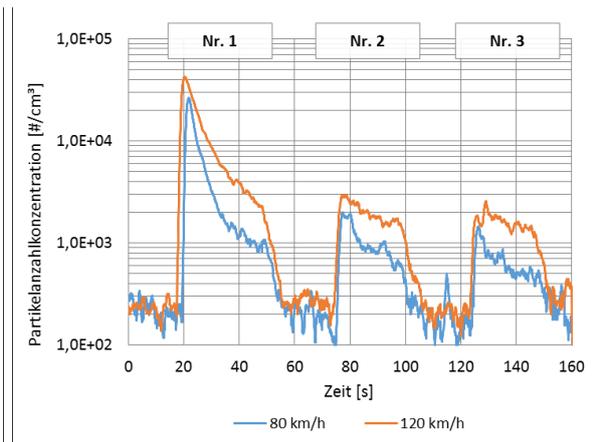


Abbildung 4-8: Partikelanzahlkonzentration – Geschwindigkeitswechsel (z. B. 0 → 80 → 0 km/h) – ECE-kh

Die initiale Beschleunigung ist folglich als Ursache für die Partikelinjektion zu werten. In Abbildung 4-8 ist dazu der Verlauf der Partikelanzahlkonzentration über drei Beschleunigungen und Verzögerungen ohne aktuierten Bremsdruck und jeweils 15 s konstanter Geschwindigkeit (80 km/h und 120 km/h) dargestellt. Als Vorbeanspruchung ist vor jedem Beschleunigungsvorgang eine Sequenz von jeweils $5 \times 80 \rightarrow 40 \text{ km/h}$ bei 30 bar integriert. Zwischen den einzelnen Sektionen sind Stillstandphasen integriert, wodurch die gemessene Konzentration auf das Niveau der Hintergrundkonzentration (unzureichende Filterung der einströmenden Frischluft) abfällt. Neben der fortlaufenden, jedoch abfallenden Intensität der Partikelinjektion unter konstanter Rotationsgeschwindigkeit ist eine Intensitätsabnahme unter zunehmender Anzahl an Beschleunigungsvorgängen erkennbar. Zur Bewertung des Einflusses des Bremsdruckes auf die Emission von Sekundärpartikeln dienen die in Abbildung 4-9 dargestellten Konzentrationsverläufe. Aus der initialen Beschleunigung je Druckreihe folgt die höchste Intensität an Sekundärpartikeln. Dieser Effekt ist allgemein auf dynamische Beschleunigungen (typisch für Testzyklen) übertragbar. Die Intensität über den Beschleunigungsvorgang nach einer 10bar-Bremsung weist ein globales Minimum auf. Unter weiterer Zunahme des Bremsdruckes kann ein Anstieg der Partikelkonzentration bestimmt werden. Der Abfall der Konzentration ist im Vergleich zum Niveau bremseninduzierter Emissionen deutlich flacher ausgeprägt. Eine Reduktion auf die Ausgangskonzentration, welche zum Startpunkt der Beschleunigung erfasst

wurde, konnte bis zum Erreichen der Initialtemperatur von 100 °C (185–196 s) infolge der konstanten Scheibenrotation nicht beobachtet werden.

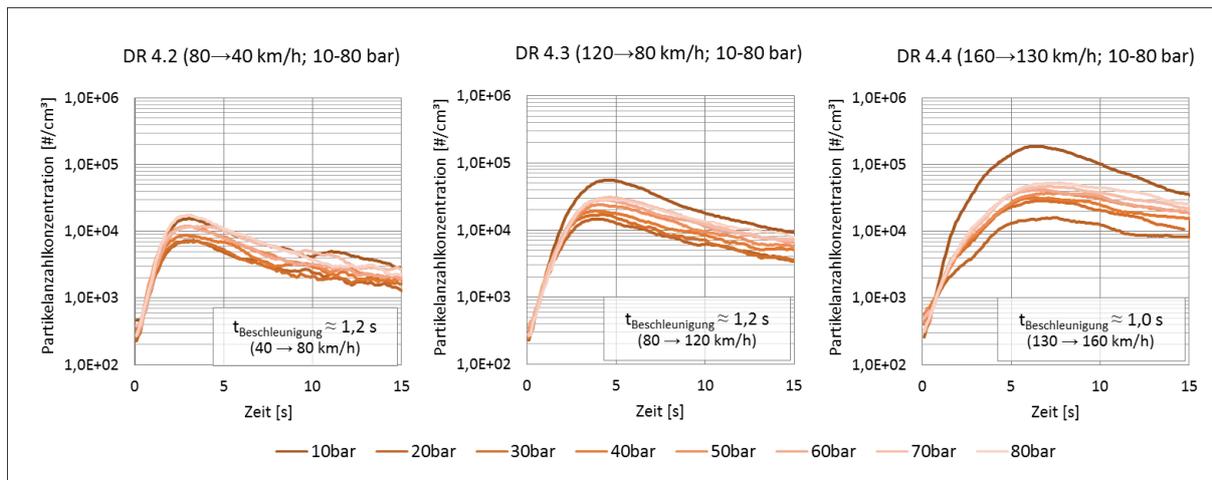


Abbildung 4-9: Verlauf der Sekundärpartikelemissionen – Einfluss der Geschwindigkeit und Vorbelastung (ECE-kh)

Um letztlich die Korrelation zwischen der Intensität der Sekundärpartikelemissionen und der Rotationsgeschwindigkeit zu bewerten, ist in Abbildung 4-10 die Anzahl der emittierten Sekundärpartikel je Beschleunigungsvorgang über eine Dauer von 15 s dargestellt. Als Vorbeanspruchung wird erneut eine Sequenz von jeweils 5 x 80 → 40 km/h bei 30 bar integriert.

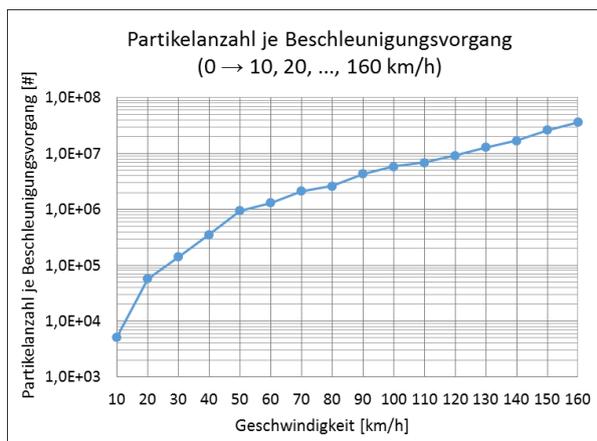


Abbildung 4-10: Einfluss der Geschwindigkeit auf die Sekundärpartikelemission je Beschleunigung – ECE-kh

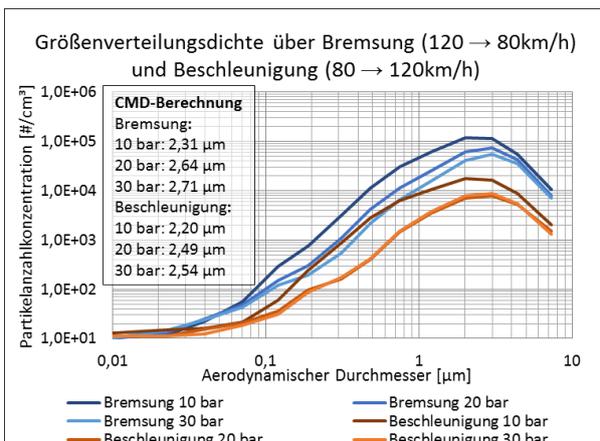


Abbildung 4-11: Charakteristik emittierter Partikel während Brems- und Beschleunigungsvorgang – ECE-kh

Es ist abzuleiten, dass aus einem linearen Anstieg der Rotationsgeschwindigkeit ein exponentieller Anstieg der Partikelanzahl je Beschleunigungsvorgang resultiert. Weiterhin folgt ein Vergleich anhand der größen aufgelösten Anzahlkonzentration für ausgewählte Verzögerungen bzw. Druckaktierungen (120 → 80 km/h bei 10 – 30 bar) und Beschleunigungen (80 → 120 km/h jeweils vor der Bremsdruckaktierung). Zur messtechnischen Erfassung dient ein elektrischer Niederdruck-Kaskadenimpaktor ELPI (vgl. Abschnitt 2.4). Dabei erfolgt eine größen selektive Fraktionierung der auf 14 Prallplatten abgeschiedenen Partikel über einen Größenbereich von 6 nm bis 10 µm. Aus Abbildung 4-11 geht neben der bereits diskutierten Reduktion der Intensität der Anzahlkonzentration eine Reduktion des Median-Partikeldurchmessers (CMD) über die Beschleunigungsphase hervor, wobei eine Korrelation mit der Intensität des

Bremsdruckes der vorangegangenen Verzögerung beobachtet werden kann. Zur Erklärung des Effektes der Emission von Sekundärpartikeln in Abhängigkeit von der Rotation der Scheibe sei auf die Arbeiten von [HEI12], [GRA14] und [KOL19] verwiesen. Zudem sind in [OST07], [OST18] sowie [BOD12] Erkenntnisse zum Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf einen lokalen Kontakt sowie zur Wirkung eines Patches als Wärmequelle beschrieben. In [HEI12] sind praktische und theoretische Analysen zum Restbremsmoment (Einkolben-Schwimmsattel) aufgeführt, welches in der Offbrake-Phase infolge ungünstiger Konstellationen von Lüftspiel (axialer Abstand zwischen Scheibe und Belag bei nichtbetätigter Bremse) und dynamischem Runout entsteht. In den Untersuchungen wurde eine Reduktion des Lüftspiels für Bremsdrücke ≥ 30 bar sowie ein Anstieg des Restbremsmomentes unter weiterer Zunahme des Bremsdruckes nachgewiesen. Zur Visualisierung eines lokalen Reibkontaktes dienen Thermografieaufnahmen (Scheibenaußenseite) über die AK-Master-Druckreihe 4.3. Dazu ist in Abbildung 4-12 das Temperaturprofil eines Reibringausschnittes zum Zeitpunkt der Beschleunigung auf Initialgeschwindigkeit (120 km/h) dargestellt. Neben abweichenden Temperaturniveaus in radialer Richtung des Reibringes infolge eines abweichenden lokalen Energieumsatzes sind charakteristische Temperaturgradienten messbar (z. B. für 80 bar; rote Markierung). Der Temperaturunterschied von bis zu 20 °C ist durch einen lokalen Kontakt zwischen Belag (Fingerseite) und Scheibe zu erklären. Die in [HEI12] beschriebene Korrelation zwischen der vorangegangenen, druckabhängigen Beanspruchung und dem lokalen Kontakt bzw. dem resultierenden Restbremsmoment dient weiterhin als Erklärung für die in Abbildung 4-9 dargestellte Konzentrationszunahme.

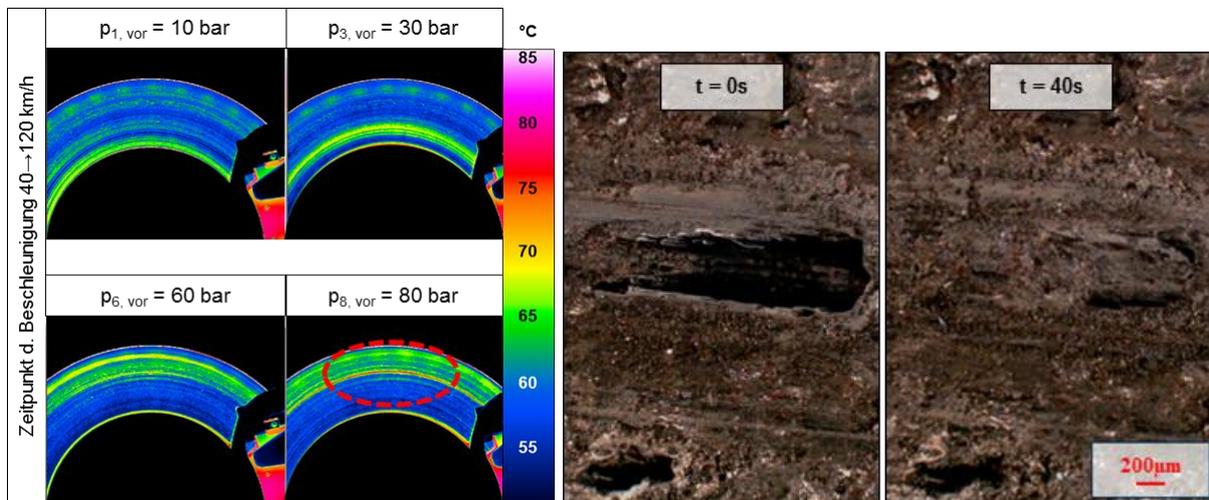


Abbildung 4-12: Temperaturprofil der Reibfläche unter variierender Vorbelastung

Abbildung 4-13: Sekundärpatchzerfall (150-fach; $n = 20$ U/min) – Bewegung: rechts nach links

Um die Vorgänge innerhalb der Reibzone während eines lokalen Reibkontaktes zu visualisieren, dient die in [GRA14] und [KOL19] vorgestellte In-situ-Beobachtungseinheit. Damit können die dynamischen Vorgänge innerhalb der Reibzone durch eine rotierende Borosilikatglas-scheibe mittels Mikroskop beobachtet werden. In Abbildung 4-13 ist exemplarisch die Änderung des Kontaktbereiches für anliegende Beläge ($p \approx 0$ bar) während konstanter Rotation

($n = 20$ U/min) dargestellt. Aus der Scheibenbewegung resultiert im Kontaktbereich ein konstanter Partikelfluss (nach links) und daraus folgend die kontinuierliche Auflösung des Sekundärpatches. Es besteht demnach ein Zusammenhang zwischen Rotationsgeschwindigkeit und Dauer des Patchzerfalls bzw. der zur Geschwindigkeit orthogonalen Emissionskennzahl (vgl. Abbildung 4-10). Der Zerfall erfolgt umso schneller, je höher die Rotationsgeschwindigkeit ist. Welchen Anteil den bereits gelösten, komprimierten oder durch tribologischen Verschleiß entstehenden Partikeln zuzuweisen ist, bleibt an dieser Stelle ungeklärt. Neben der Emission von Sekundärpartikeln aus dem Reibkontakt ist nicht auszuschließen, dass ein Teil der erfassten Konzentration aus der Aufwirbelung bereits abgeschiedener Partikel durch den Einfluss der Scheibenventilation resultiert (Resuspension) und der Strömung zugeführt wird. Als Abscheideorte sind die Umhausung und das Bremssystem (Sattel, Scheibe und Beläge) zu nennen. Zusammenfassend stellen Sekundärpartikelemissionen einen signifikanten Anteil am anzahl- und massebezogenen Emissionsfaktor im Falle von Zyklen mit dynamischen Geschwindigkeitswechseln dar. Die Intensität steigt grundsätzlich unter Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit und der Vorbelastung. Eine feste Trennung in Anteile von Primär- und Sekundärpartikeln ist infolge der zeitlichen Nachwirkung und Konzentrationsüberlagerung, insbesondere im Falle von Zyklen mit dynamischen Geschwindigkeitswechseln, nur ansatzweise möglich. Ein beispielhafter Vergleich erfolgt in Abschnitt 5.2.4, wobei die Anteile von Primär- und Sekundärpartikelemissionen ganzheitlich zur Bildung von Emissionsfaktoren berücksichtigt werden. Für die in dieser Arbeit durchgeführte Einflussgrößenbewertung anhand einer Partikelanzahl je Bremsung bleiben Anteile von Sekundärpartikelemissionen unberücksichtigt.

4.2 Partikelverteilungsprofile im Konstantvolumen-Probenahmesystem

Die Repräsentativität einer entnommenen Teilprobe (Teilstromentnahme) wird gemäß Tabelle 3-1 durch die Transporteffizienz und Uniformität beeinflusst. Gemäß Abschnitt 3 ist die Partikelinjektion und Partikelverteilung für unterschiedliche Größenfraktionen differenziert zu bewerten. Darüber hinaus beeinflussen die Injektionsbedingungen, die Rotationsgeschwindigkeit und die damit verbundene Ventilationswirkung, die geometrischen Randbedingungen und instationären Strömungsbedingungen letztlich die Partikelverteilung innerhalb der Umhausung, im Abluftkanal und an der Position der Probenahme. Die vielfältigen Einflussgrößen werden in diesem Abschnitt am Beispiel des stationären Probenahmesystems untersucht und bewertet. Die Gestaltung und Auslegung der Probenahmesonden zur Teilstromentnahme nach isokinetischen und isoaxialen Bedingungen erfolgt gemäß der VDI 2066 (Staubmessungen in strömenden Gasen), EN 13284-1 und ISO 9096.

4.2.1 Methodik und Vorgehensweise

Die Verifizierung des Partikelverteilungsprofils im Querschnitt eines $\varnothing 160$ mm-Kanals erfolgt durch Probenahme an vier Positionen a, b, c und d (jeweils 40 mm vom Zentralpunkt entfernt)

im Kanaleinlass (Messposition 1), vor der ersten Umlenkung (Messposition 2) und dem Kanalauslass (Messposition 3) entsprechend des in Abbildung 4-14 dargestellten Versuchsaufbaus. Die Konzentration im Zentralpunkt e wird bei der Berechnung des anzahlbezogenen Uniformitätsindex berücksichtigt, bleibt bei der Darstellung jedoch unberücksichtigt. Im Falle der Evakuierung in Fahrtrichtung wird der Versuchsaufbau um 180° gedreht (Evakuierung nach rechts). Die Untersuchungen erfolgen am Beispiel der Geschwindigkeitsbereiche der AK-Master-Druckreihen 4.1–4.4 für 10 Einzelbremsungen je Parameterstufe und zwei Bremsengeometrien (vgl. Abbildung 4-15). Die vorgestellte Einkolben-Schwimmsattelbremse dient als Referenzbremse. Der Einfluss der Bremsendimensionierung wird anhand einer Vierkolben-Festsattelbremse/Bremse 2 (Scheiben-Ø: 374 mm; eff. Reibradius: 144 mm; Trägheitsmoment: 96,8 kg·m²) bewertet. Zur Bestimmung anzahlbezogener Verteilungsprofile kommt ein elektrischer Niederdruck-Kaskadenimpaktor (ELPI) zur Anwendung (vgl. Abschnitt 2.4). Die Bewertung erfolgt anhand der Partikelanzahl je Einzelbremsung (vgl. Abschnitt 5.2) und des CMDs zur Bewertung inhomogener und größenabhängiger Verteilungsprofile. Daraus folgt die Bestimmung eines anzahlbezogenen Uniformitätsindex, welcher die mittlere prozentuale Abweichung der Partikelanzahl je Bremsung und Messpunkt zur Bewertung der Partikelverteilung repräsentiert. Eine ideale Partikelverteilung liegt bei einem Uniformitätsindex von 0 vor. Die Charakterisierung der Strömung und Durchmischung erfolgt nach der CO₂-Testmethode.

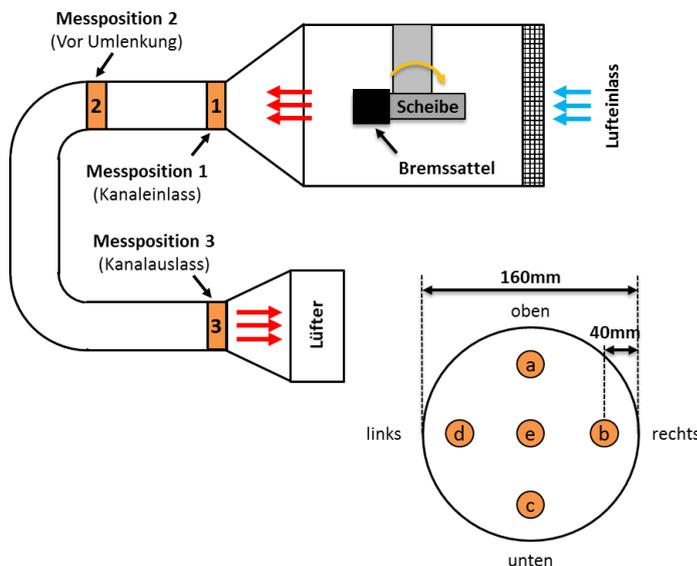


Abbildung 4-14: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Verteilungsprofils

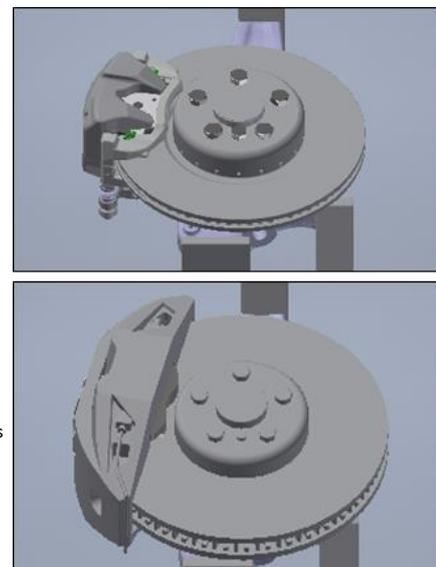


Abbildung 4-15: Einkolben-Schwimmsattel (oben) und Vierkolben-Festsattel (unten)

4.2.2 Verifizierung der Strömungsuniformität mittels Tracergas-Verfahren

Das CO₂-Tracergas-Verfahren ermöglicht die Verifizierung der Strömungs- bzw. Gasuniformität innerhalb des Probenahmesystems. Dazu wird über präparierte Reibbeläge das Tracergas in einen 0,5 mm breiten Spalt zwischen Belag und Scheibe gemäß Abbildung 4-16 injiziert. Ein Durchflussregler dient zur Injektion einer konstanten Gasmenge gemäß der Constant-concentration-Methode. Bei einem konstanten Evakuierungsstrom wird das injizierte Tracergas in

Richtung des Abluftkanals evakuiert, wobei die Konzentration über die oben beschriebenen Messpositionen mittels NDIR-Analysator (nichtdispersiver Infrarotsensor) bestimmt wird.

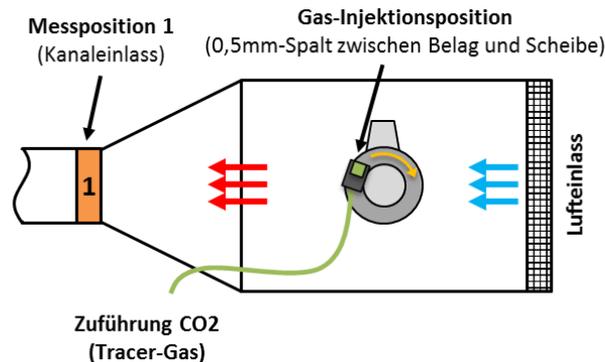


Abbildung 4-16: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Gasuniformität (CO₂-Tracergas)

Durch Variation der Tracergas-Konzentration können Positionen inhomogener Durchmischung bei Evakuierung in und entgegen Fahrtrichtung identifiziert werden [PAU14]. Die Beschreibung der Verteilungsprofile erfolgt aus Sicht des Bremssystems in Richtung der Messposition 1. Gemäß Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18 kann am Kanaleinlass eine inhomogene Durchmischung mit Verlagerung nach rechts (Evakuierung entgegen Fahrtrichtung) bzw. links (Evakuierung in Fahrtrichtung) nachgewiesen werden, was den in Abschnitt 3.3.5 beschriebenen Einfluss der Scheibenventilation mit Verschiebung zur Scheiben- bzw. Fahrzeuginnenseite bestätigt. Zu beobachten ist eine erhöhte Konzentration im oberen Teil des Kanaleinlasses bei Evakuierung entgegen Fahrtrichtung. Letztlich ist auch aus der geometrischen Form des Radträgers und des Bremssattels eine Strömungsbeeinflussung zu erwarten. Über den Verlauf des Abluftkanals kann eine Erhöhung der Uniformität beobachtet werden, welche nahezu unabhängig von der Evakuierungsrichtung ist. Demnach resultiert aus der geometrischen Gestaltung des Abluftkanals mit Doppelbogen eine signifikante Uniformitätssteigerung.

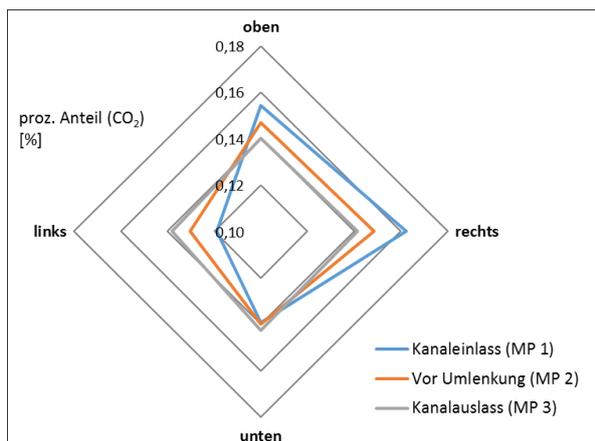


Abbildung 4-17: Durchmischungsgrad nach CO₂-Testmethode – Evakuierung gegen Fahrtrichtung

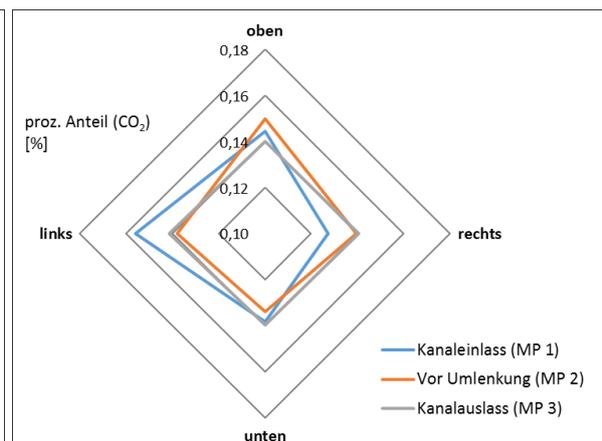


Abbildung 4-18: Verifizierung des Durchmischungsgrades – Evakuierung in Fahrtrichtung

4.2.3 Einfluss von Geschwindigkeit und Absaugrichtung

Auf Basis der Charakterisierung der Gasuniformität folgt eine Bewertung zum Einfluss der Belagzusammensetzung (ECE-kh und NAO-kh) unter variierenden Geschwindigkeitsbereichen

und Evakuierungsrichtungen. Der Vergleich der Partikelanzahl je Bremsung (vgl. Abbildung 4-19; Definition nach Abschnitt 5.2), bestimmt über je 5 Einzelmessungen bei einem Bremsdruck von jeweils 30 bar, verdeutlicht zunächst ein um Faktor 3–9 reduziertes Emissionsniveau des NAO-kh im Vergleich zum ECE-kh (Evakuierung entgegen Fahrtrichtung). Darüber hinaus ist der Einfluss der geschwindigkeitsabhängigen Reibenergie auf die Partikelanzahl je Bremsung nachweisbar. Unter Verwendung des ECE-kh ist zwischen der niedrigsten (40 km/h) und höchsten (160 km/h) Initialgeschwindigkeit eine Erhöhung der Partikelanzahl je Bremsung um bis zu Faktor 100 messbar (weitere Untersuchungen zum Einfluss der Reibenergie folgen in Abschnitt 6.2). Die mittlere Partikelanzahl je Bremsung (5 Einzelmessungen je analysiertem Messpunkt) sinkt über den Verlauf des Abluftkanals, wobei der Abfall von Messpunkt 1 zu 3 mit 5–12 % gering ausfällt. Aus der Variation der Absaugrichtung sind geringe Abhängigkeiten nachweisbar, d. h. die Partikelanzahl ist unter Evakuierung in Fahrtrichtung um maximal 5 % erhöht.

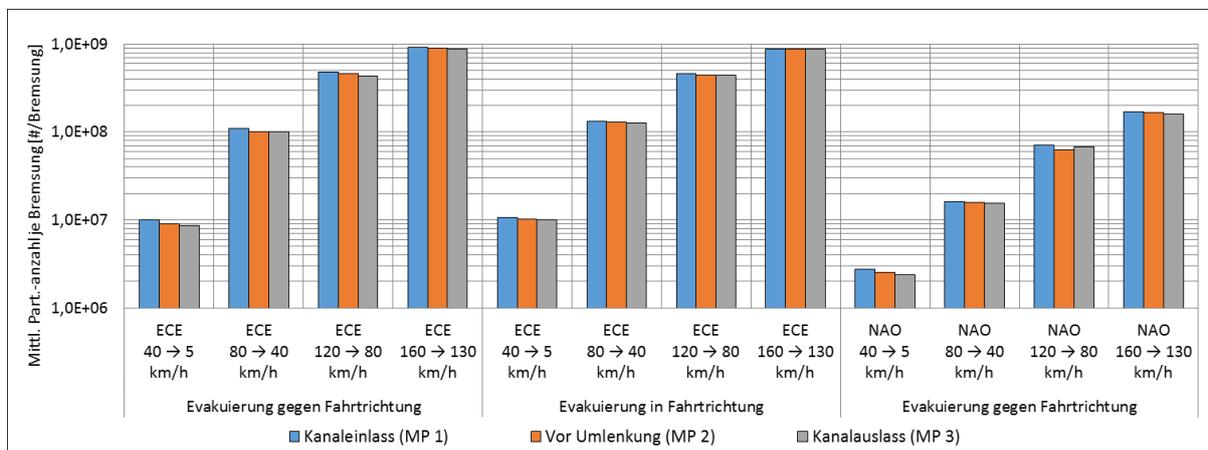


Abbildung 4-19: Einfluss Geschwindigkeit und Evak.-richtung auf PN je Bremsung (ECE-kh, NAO-kh) – Bremse 1

Aus der Erhöhung der geschwindigkeitsabhängigen Reibungsenergie folgt gemäß Abbildung 4-20 ein Abfall des CMD, welcher je Geschwindigkeitsbereich von Messpunkt 1 zu 3 geringfügig abnimmt. Der NAO-kh weist über alle Geschwindigkeitsbereiche einen geringeren CMD gegenüber dem ECE-kh auf (Evakuierung entgegen Fahrtrichtung), was gemäß Abschnitt 5.1 durch die chemische Zusammensetzung des Reibbelages zu erklären ist.

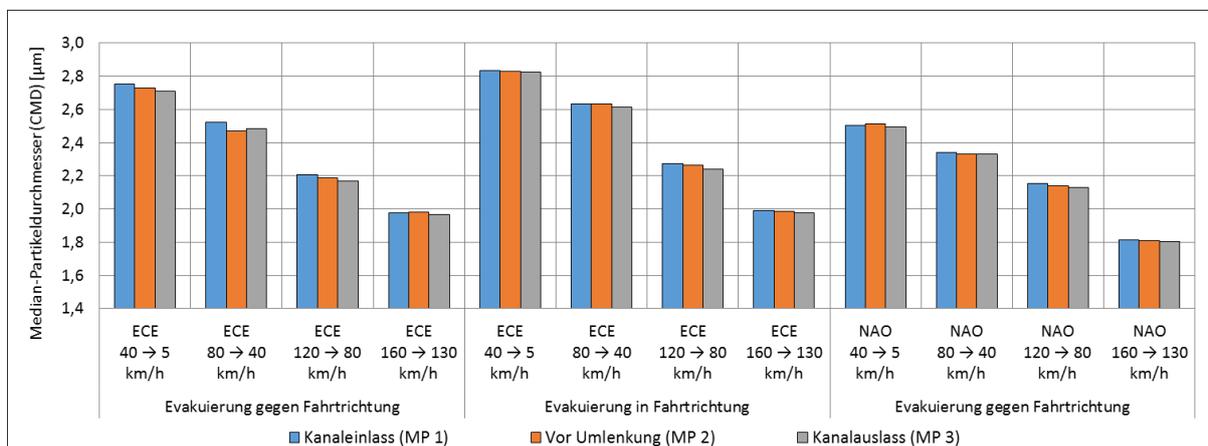


Abbildung 4-20: Einfluss Geschwindigkeit und Evak.-richtung auf Partikelcharakteristik (ECE-kh, NAO-kh) – Bremse 1

Unter Evakuierung in Fahrtrichtung (ECE-kh) ist ein insgesamt erhöhter CMD messbar. Dieser Effekt ist durch das Injektions- und Ausbreiterverhalten der Partikel $> 1 \mu\text{m}$ zu erklären (vgl. Abbildung 3-27), welches durch ein tangenciales Verlassen in Fahrtrichtung gekennzeichnet ist. Aus der Richtungsumkehr und der damit korrelierenden erhöhten Verweilzeit innerhalb der Umhausung steigt die Abscheidewahrscheinlichkeit. Unter Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit heben sich die Abweichungen deutlich auf, d. h. der Einfluss der Evakuierungsrichtung sinkt. Gemäß der in Abbildung 4-21 gegenübergestellten partikelanzahlbezogenen Uniformitätsindizes für variierende Fahrgeschwindigkeiten ist eine kontinuierliche Abnahme der prozentualen Abweichung je Messposition über den Verlauf des Abluftkanals bzw. eine Steigerung des Uniformitätsindex messbar. Unabhängig von der Belagzusammensetzung oder der Evakuierungsrichtung ist eine Abnahme des Uniformitätsindex unter Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit bzw. Reduktion des CMD zu beobachten. Im Falle des NAO-kh stellt sich ein geringfügig verbesserter Uniformitätsindex ein, was primär durch einen reduzierten CMD zu erklären ist. Unter Evakuierung in Fahrtrichtung liegt insbesondere für Geschwindigkeitsbereiche $\leq 120 \text{ km/h}$ eine signifikante Verbesserung der Partikelverteilung im Kanaleinlass vor.

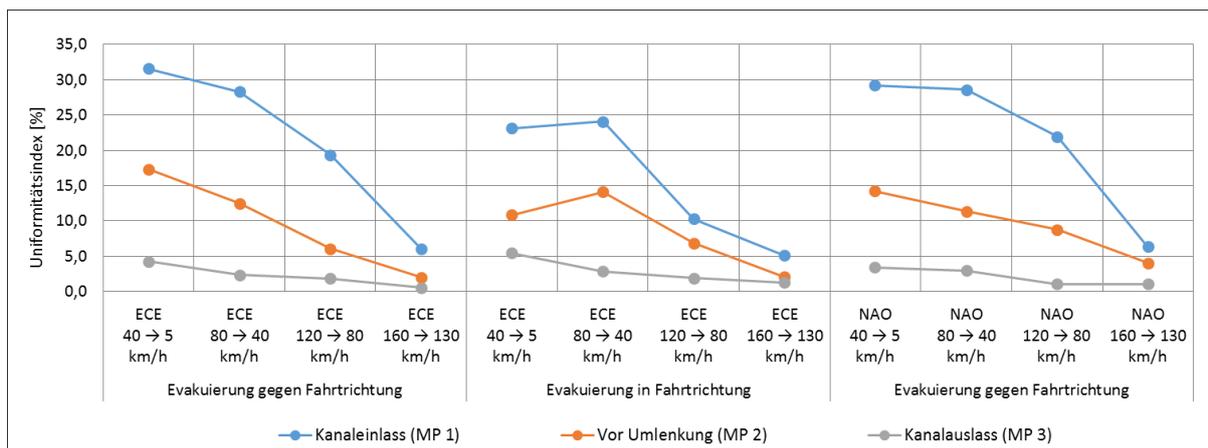


Abbildung 4-21: Anzahlbez. Uniformitätsindex – Geschwindigkeit Evak.-richtung (ECE-kh, NAO-kh) – Bremse 1

Zur Bewertung der Partikelverteilung dienen die in Abbildung 4-22 bis Abbildung 4-25 dargestellten Verteilungsprofile. Unter Variation der Evakuierungsrichtung resultiert ein umgekehrtes Verteilungsprofil für die Peripherie des Kanaleinlasses, was die Beobachtungen bei der Analyse der Gasuniformität bestätigt. Unter Evakuierung entgegen Fahrtrichtung ist für niedrige Initialgeschwindigkeiten ($40 \rightarrow 5 \text{ km/h}$) eine Verschiebung nach rechts und unter Evakuierung in Fahrtrichtung nach links erkennbar. Für den untersuchten Geschwindigkeitsbereich wird die Partikelverteilung innerhalb des Probenahmesystems demnach primär durch die Strömungsbedingungen beeinflusst. Unter Zunahme der Initialgeschwindigkeit ($80 \rightarrow 40 \text{ km/h}$) verlagert sich das Profil nach links/unten (Evakuierung entgegen Fahrtrichtung) bzw. rechts/oben (Evakuierung in Fahrtrichtung), was dem beschriebenen Einfluss der Richtungsumkehr von Partikeln $> 1 \mu\text{m}$ zuzuschreiben ist. Dieses Verhalten ist auch für eine Initialgeschwindigkeit von 120 km/h zu beobachten, wobei die Unterschiede unter Zunahme der Initialgeschwindigkeit klein sind.

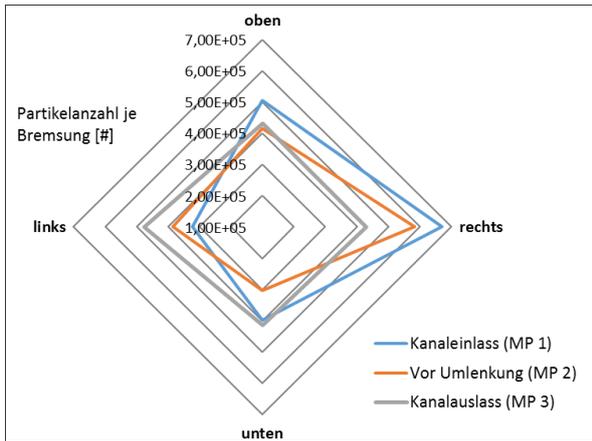


Abbildung 4-22: Verteilungsprofil – Evakuierung gegen Fahrtrichtung 40 → 5 km/h (Bremsse 1, ECE-kh)

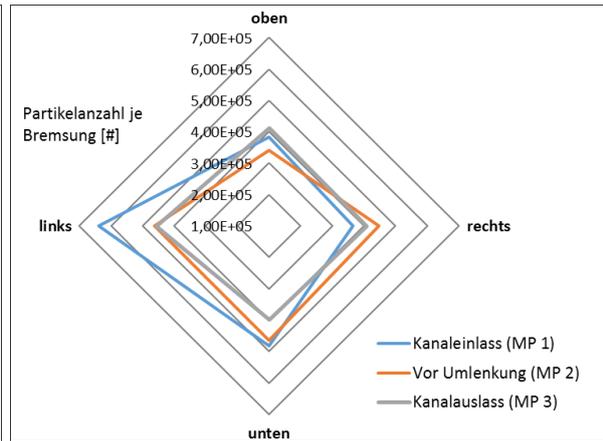


Abbildung 4-23: Verteilungsprofil – Evakuierung in Fahrtrichtung 40 → 5 km/h (Bremsse 1, ECE-kh)

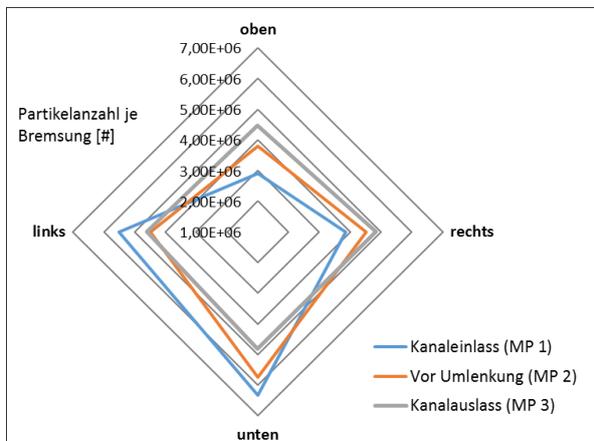


Abbildung 4-24: Verteilungsprofil – Evakuierung gegen Fahrtrichtung 80 → 40 km/h (Bremsse 1, ECE-kh)

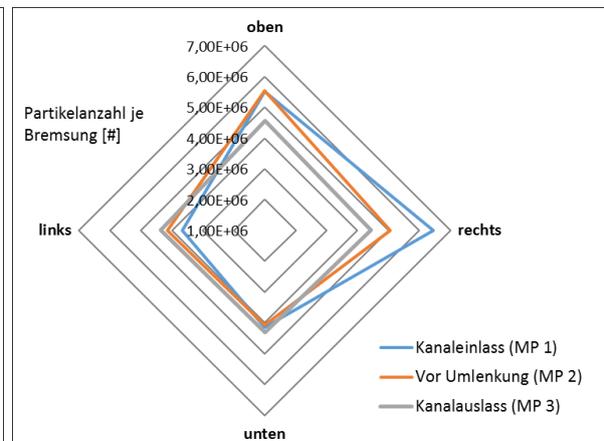


Abbildung 4-25: Verteilungsprofil – Evakuierung in Fahrtrichtung 80 → 40 km/h (Bremsse 1, ECE-kh)

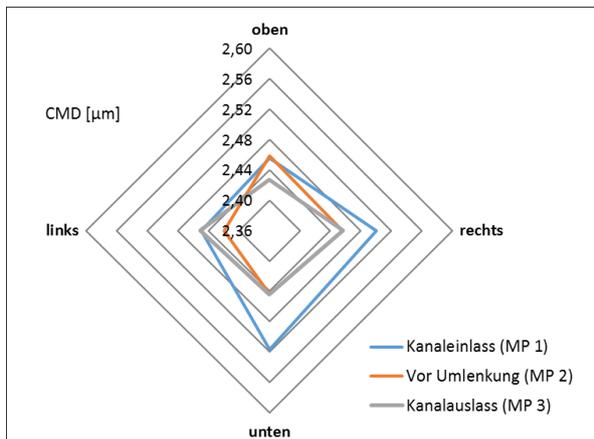


Abbildung 4-26: Verteilungsprofil (CMD) – Evakuierung gegen Fahrtrichtung 80 → 40 km/h (Bremsse 1, ECE-kh)

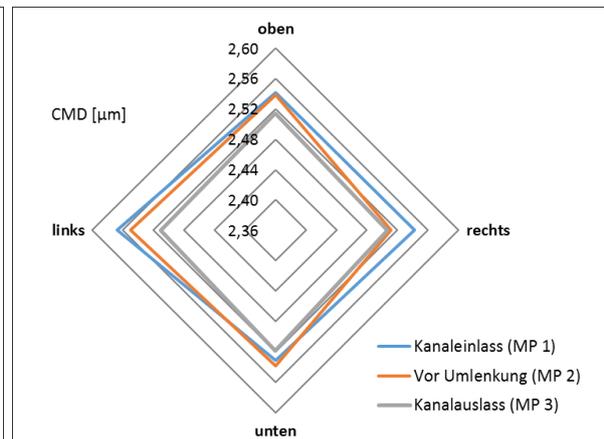


Abbildung 4-27: Verteilungsprofil (CMD) – Evakuierung in Fahrtrichtung 80 → 40 km/h (Bremsse 1, ECE-kh)

Neben der freien Strömung (vgl. Abschnitt 4.2.2) auf der Außenseite der Bremsse werden die Strömungsbedingungen auf der Innenseite durch die Radträgergeometrie und durch den Einfluss der Scheibenventilation bestimmt. Die Bewertung größenspezifischer Abhängigkeiten anhand des CMD erfolgt anhand des Geschwindigkeitsbereiches von 80 → 40 km/h (vgl. Abbildung 4-26 und Abbildung 4-27). Unter Evakuierung entgegen Fahrtrichtung können geringere CMDs nachgewiesen werden, was die Vermutung nach größenspezifischen Verlusten

bestätigt. Zudem ist ein erhöhter CMD im unteren Bereich des Kanaleinlasses messbar, wobei der Einfluss größenspezifischer Verluste und verschobener Profile des CMDs unter weiterer Zunahme der Initialgeschwindigkeit (z. B. 120 km/h) geringer ausfällt. Der bereits beschriebene reduzierte Grad an Uniformität (vgl. Abbildung 4-21; Uniformitätsindex) bzgl. des CMDs unter Evakuierung entgegen Fahrtrichtung resultiert aus einer Verschiebung nach unten/rechts. Durch eine homogene Partikelgrößenverteilung steigt die Repräsentativität der entnommenen Teilprobe (Teilstromentnahme), was besonders bei der Bestimmung von massebezogenen Emissionsfaktoren (z. B. PM₁₀) von Bedeutung ist. Insgesamt können die Ergebnisse der simulativen Untersuchungen zum Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit und der geometrischen Gestaltung des Abluftkanals auf die Partikelverteilung bestätigt bzw. durch Erkenntnisse zu größenspezifischen Abhängigkeiten erweitert werden. Auffällig ist, dass unter Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit der anzahlbezogene Uniformitätsindex im Kanaleinlass und daraus resultierend auch im weiteren Verlauf des Abluftkanals erhöht ist, weshalb die Probenahme am Kanalauslass als vorteilhaft zu bewerten ist. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Partikeleigenschaften in besonderem Maße durch die initiale Geschwindigkeit beeinflusst werden. Im Falle von Prüfzyklen, welche durch dynamische Geschwindigkeitswechsel gekennzeichnet sind, ist demnach eine kontinuierliche Änderung der Partikelverteilung über den Querschnitt der Probenahme bzw. der Repräsentativität der entnommenen Teilprobe die Folge. Gemäß Abschnitt 3.3.5 folgt aus der Reduktion des Volumenstromes eine Zunahme der Abscheiderate von Partikeln > 5 µm innerhalb der Umhausung. Vorteilhaft ist hingegen eine gesteigerte Partikelverteilung (Uniformitätsgrad) am Übergang Umhausung–Abluftkanal. Zur experimentellen Analyse dienen die in Abbildung 4-28 aufgeführten Uniformitätsindizes, bestimmt für ECE-kh und NAO-kh unter Variation des Volumenstromes (425 m³/h sowie 850 m³/h) und Evakuierung entgegen Fahrtrichtung.

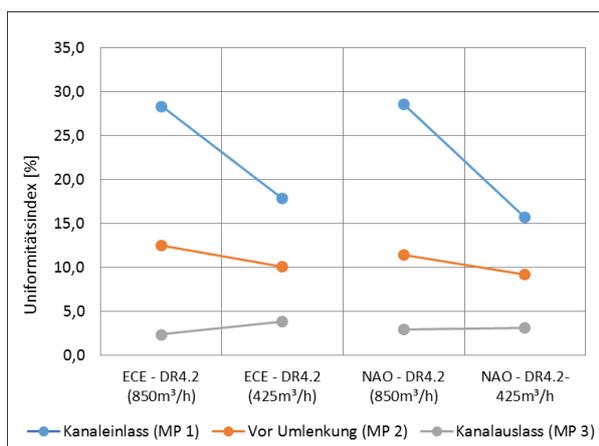


Abbildung 4-28: Anzahlbez. Uniformitätsindex – Volumenstrom 80 → 40 km/h (Bremse 1, ECE-kh, NAO-kh)

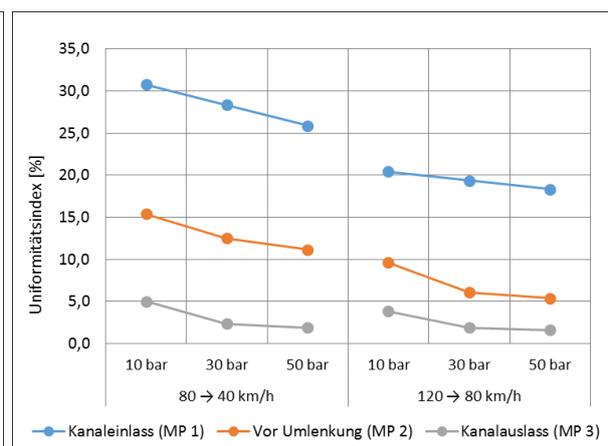


Abbildung 4-29: Anzahlbez. Uniformitätsindex – Bremsdruck 80 → 40 km/h bei 425 m³/h (Bremse 1, ECE-kh)

Daraus ist besonders im Kanaleinlass ein erhöhter Uniformitätsgrad messbar. Über den weiteren Verlauf des Abluftkanals hebt sich der Vorteil einer homogeneren Verteilung infolge einer Verschiebung des Konzentrationsprofils nach unten/rechts geringfügig auf. Zur Bewertung der

Korrelation zwischen Bremsdruck und Partikelverteilung folgt zusätzlich zum Referenzwert (30 bar) eine Untersuchung bei 10 bar und 50 bar. Gemäß Abbildung 4-29 ist eine geringfügige, wenn auch messbare Beeinflussung des anzahlbezogenen Uniformitätsindex zu bestätigen. Aus der zeitlichen Änderung der Partikelinjektion folgt für einen Bremsdruck von 10 bar eine geringfügige Reduktion und für 50 bar eine Erhöhung des Uniformitätsindex. Letzteres ist durch die Änderung der Partikelgrößenverteilung infolge eines reduzierten CMDs und einer damit korrelierenden Erhöhung der Uniformität zu erklären. Zur Bewertung des Einflusses der Bremsengeometrie auf die Partikelverteilung folgt eine vergleichende Bewertung zwischen einer Einkolben-Schwimmsattelbremse (Bremse 1; vgl. Abschnitt 4.2.1) und Vierkolben-Festsattelbremse (Bremse 2; vgl. Abbildung 4-15) unter Verwendung identischer Belagmixturen.

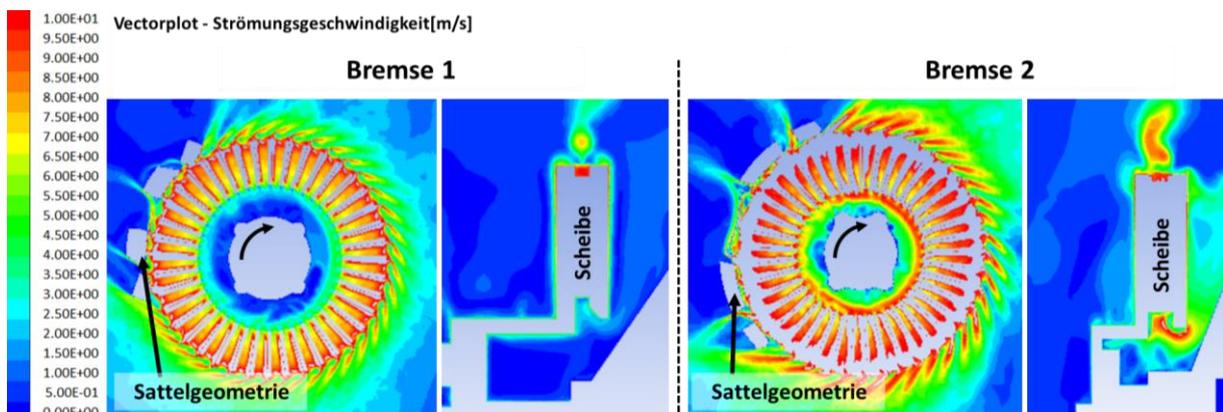


Abbildung 4-30: Vergleich zum Einfluss der Innenbelüftung – Bremse 1 (links) und Bremse 2 (rechts) – 80 km/h [LIN18]

Ein Vergleich der aus der Scheibeninnenbelüftung resultierenden Strömungsbedingungen um die Peripherie der Bremse ist Abbildung 4-30 zu entnehmen. Daraus geht hervor, dass aus den unterschiedlichen Bremsengeometrien unterschiedliche Strömungsbedingungen im rückwärtigen Scheibenbereich (Fahrzeuginnenseite) sowie in radialer Richtung vorliegen.

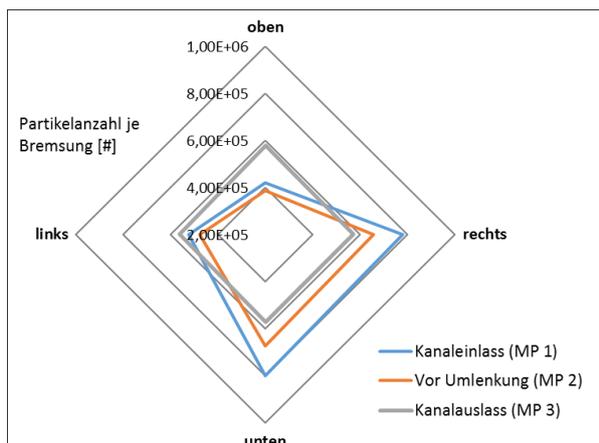


Abbildung 4-31: Verteilungsprofil bei Evakuierung gegen Fahrtrichtung 80 → 40 km/h (Bremse 2, ECE-kh)

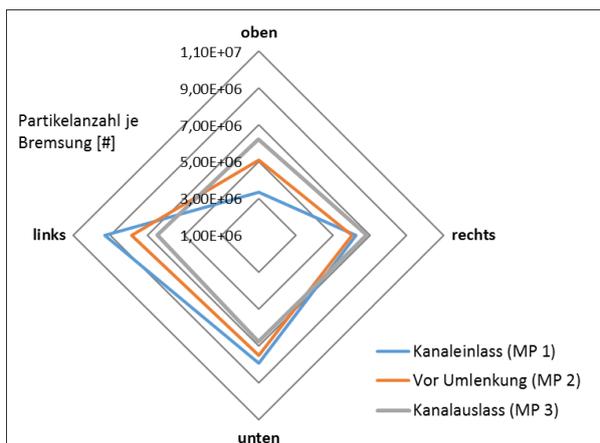


Abbildung 4-32: Verteilungsprofil bei Evakuierung in Fahrtrichtung 80 → 40 km/h (Bremse 2, ECE-kh)

Durch die Geometrie des Vierkolben-Festsattels ist zudem ein ausgeprägter Abschattungseffekt erkennbar, was zu einer gesteigerten Beeinflussung der Partikelverteilung bis in den Rohrquerschnitt führt. Aus den in Abbildung 4-31 und Abbildung 4-32 dargestellten Verteilungsprofilen für Bremse 2 ist im Vergleich zu den Verteilungsprofilen für Bremse 1 (vgl. Abbildung 4-22

und Abbildung 4-24) ein abweichendes Verteilungsprofil bei gleichzeitig erhöhter Partikelanzahl je Bremsung infolge von Dimensionierung und simuliertem Trägheitsmoment abzuleiten. Als Erklärung sind die abweichenden Strömungs- und Injektionsbedingungen zu nennen, welche primär durch die geometrischen Randbedingungen beeinflusst werden. Demnach ist durch eine Variation der Bremsendimensionierung eine Beeinflussung des Überganges in die Grenzschicht, des tangentialen Überganges oder auch der radialen Ablösung im Verlauf der Scheibenrotation zu vermuten. Der Vergleich der für ECE- und NAO-Belag generierten Uniformitätsindizes für Messposition 1 (vgl. Abbildung 4-33) verdeutlicht für den Geschwindigkeitsbereich 40 → 5 km/h eine abweichende Verteilung gegenüber Bremse 1 (vgl. Abbildung 4-21), wobei die Unterschiede unter Geschwindigkeitszunahme weiter abnehmen. Zudem ist ein vergleichbarer Trend in der Partikelverteilung für ECE- und NAO-Belag messbar.

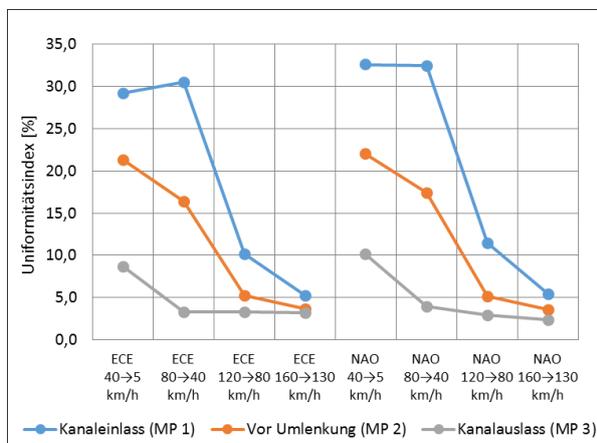


Abbildung 4-33: Anzahlbez. Uniformitätsindex – Geschwindigkeit (Bremse 2, ECE-kh, NAO-kh)

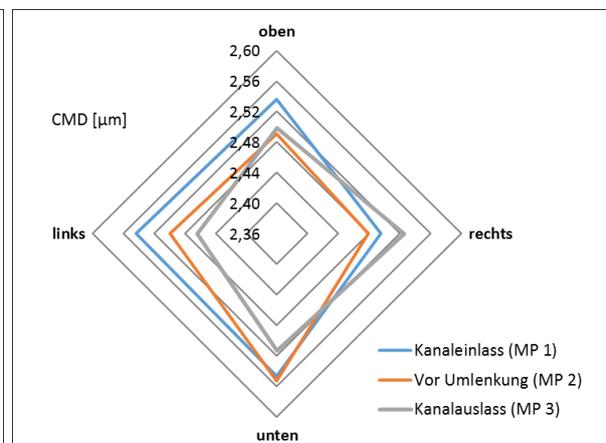


Abbildung 4-34: Verteilungsprofil (CMD) bei Evakuierung gegen FR 80 → 40 km/h (Bremse 2, ECE-kh)

Darüber hinaus liegt ein erhöhter CMD (vgl. Abbildung 4-34) bei gleichzeitig homogenerer Verteilung an Messposition 1 vor. Damit wird erneut bestätigt, dass aus einer abweichenden Geometrie des Bremssystems bei sonst konstanten Prüfbedingungen eine Beeinflussung der Partikelinjektion und Partikelverteilung in Umhausung und Abluftkanal sowie der Repräsentativität der entnommenen Teilprobe folgt. Es ist auch zu erwarten, dass die Partikelverteilung über den Verlauf eines Zyklus differenziert ausfällt, was besonders für die Festlegung einer Homologationsmethode von Bedeutung ist. Für den Fall eines standardisierten Messaufbaus empfiehlt sich die Bestimmung eines Partikelverteilungsprofils über eine vordefinierte Messposition (z. B. MP 3) anhand von anzahl- und massebezogenen Emissionsfaktoren für mindestens drei Messpunkte (z. B. Mitte (3e), Links (3d) und Rechts (3b)). Die Erfassung kann z. B. in Form einer parallelen Probenahme an zwei Messpunkten unter Verwendung von Kondensationspartikelzählern (CPC) oder Filterhaltern bzw. Kaskadenimpaktoren (vgl. Abschnitt 5.2.4 bzw. Abschnitt 4.2.4) erfolgen. Auf Basis eines zyklusbezogenen Uniformitätsindex (Anzahl/Masse) wird die Qualität und Repräsentativität der Probenahme bewertet. Die Definition zulässiger anzahl- und massebezogener Uniformitätsindizes sowie die Beschreibung von Maßnahmen zur Optimierung erfolgen in Abschnitt 8.2.

4.2.4 Massebezogene Emissionsfaktoren zur Bewertung der Probenahme

Aufbauend auf die Bewertung von Partikelverteilungsprofilen anhand einer Partikelanzahl je Bremsung folgen in diesem Abschnitt eine Bewertung anhand massebezogener PM10 und PM2.5-Emissionsfaktoren (vgl. Abschnitt 5.2) und die Ableitung eines Verhältnisfaktors als Bewertungsgröße. Die Untersuchungen erfolgen anhand des ECE-kh und des in Abschnitt 5.2 beschriebenen JRC-novel cycles (WLTP brake cycle), welcher auf Grundlage der WLTP-Datenbasis entwickelt wurde und durch dynamische Geschwindigkeitsbereiche und Verzögerungen gekennzeichnet ist. Da die Partikeldynamik für unterschiedliche Größen supermikroner Partikel (besonders $> 5 \mu\text{m}$) differenziert zu bewerten ist, empfiehlt sich die Teilstromentnahme über eine Sonde und eine größenselektive Fraktionierung mittels dreistufigem Kaskadenimpaktor mit Trenndurchmessern (d_{50}) von 10 und $2,5 \mu\text{m}$ nach ISO 23210 und VDI 2066 (Teil 10) und Isokinetiksteuerung. Die erste Stufe dient als Vorabscheider (Trenndurchmesser d_{50} : $10 \mu\text{m}$), die Stufe 3 als Endfilter. Zur Anwendung kommen Filter mit einer Effizienz von 99 % für $0,3 \mu\text{m}$ -Partikel (di-octylphthalate). Die Mindestwaage je Stufe beträgt $0,1 \text{ mg}$.

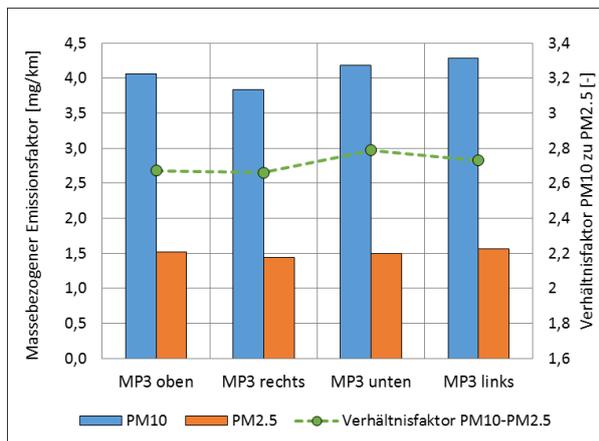


Abbildung 4-35: Vergleich Emissionsfaktoren und Verhältnisfaktor (MP 3) – JRC-novel cycle (ECE-kh)

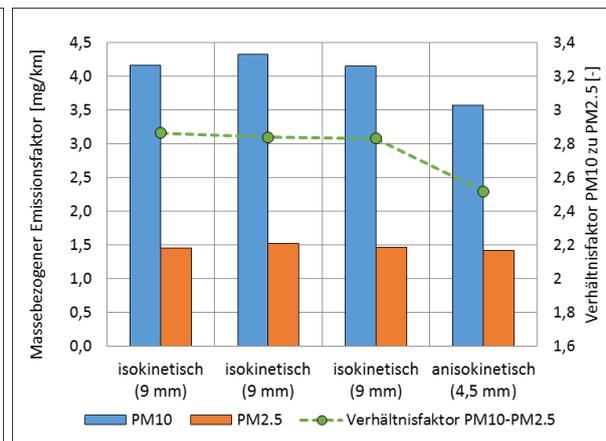


Abbildung 4-36: Variation der Probenahmebedingungen an MP 3 (Mitte) – JRC-novel cycle (ECE-kh)

Exemplarisch erfolgt eine Bewertung anhand eines an Messposition 3 (vgl. Abbildung 4-35) erfassten Verteilungsprofils massebezogener PM10/PM2.5-Emissionsfaktoren gemäß des in Abbildung 4-14 vorgestellten Versuchsaufbaus. Es wird erneut der am Beispiel einer Partikelanzahl je Bremsung bestimmte hohe Grad an Uniformität deutlich, wobei über den Querschnitt maximale Abweichungen von ca. 12 % (PM10) nachgewiesen werden können. Der Verhältnisfaktor weist an der Position „unten“ ein Maximum auf, wobei die Unterschiede insgesamt gering ausfallen und den CMD-Ergebnissen folgen. Zusätzlich erfolgt eine Bewertung zum Einfluss variierender Probenahmebedingungen (vgl. Abbildung 4-36), wobei für eine konstante Strömungsgeschwindigkeit eine Variation des Sondendurchmessers, d. h. ein Vergleich zwischen 3x isokinetischer (Abweichung $< 5 \%$) und 1x hyperkinetischer Probenahme (Halbierung des Sondendurchmessers bei sonst identischen Prüfbedingungen) vorgenommen wird. Im Falle einer hyperkinetischen Probenahme, bei der die Geschwindigkeit in der Entnahmesonde v_n größer als die des Abgasstromes v_d ist ($v_n/v_d > 1$), liegt eine signifikante Reduktion

Als Einflussgrößen werden die Rotationsgeschwindigkeit, die Evakuierungsrichtung sowie der Evakuierungsvolumenstrom anhand der Einkolben-Schwimmsattelbremse (Bremse 1) untersucht. Je Parametereinstellung werden 100 Einzelbremsungen in direkter Abfolge (Initialtemperatur: 100 °C) umgesetzt. Die bestückten Pads werden mittels Mikroskopie analysiert und daraus die Partikelfläche bestimmt. Aus der Partikelfläche folgt die Berechnung eines Äquivalentdurchmessers, wobei die untere Grenze auf einen Durchmesser von 0,5 µm (Auflösung) beschränkt ist. Die Bestimmung des Äquivalentdurchmessers ermöglicht einen Direktbezug zu den Feinstaubklassen gemäß Einteilung in $\leq 2,5$ µm; $> 2,5$ µm bis ≤ 10 µm sowie > 10 µm.

4.3.2 Untersuchung variierender Parameter

Die in Abbildung 4-38 gegenübergestellten Ausschnitte elektropolierter Probenahmepads verdeutlichen für Partikeldurchmesser zwischen 0,5 und > 10 µm eine inhomogene Partikelabscheidung über den Kanalquerschnitt. An Messposition 1a (oben) liegen in Bezug auf Anzahl und Größenverteilung signifikante Unterschiede zu Messposition 1c (unten) vor.

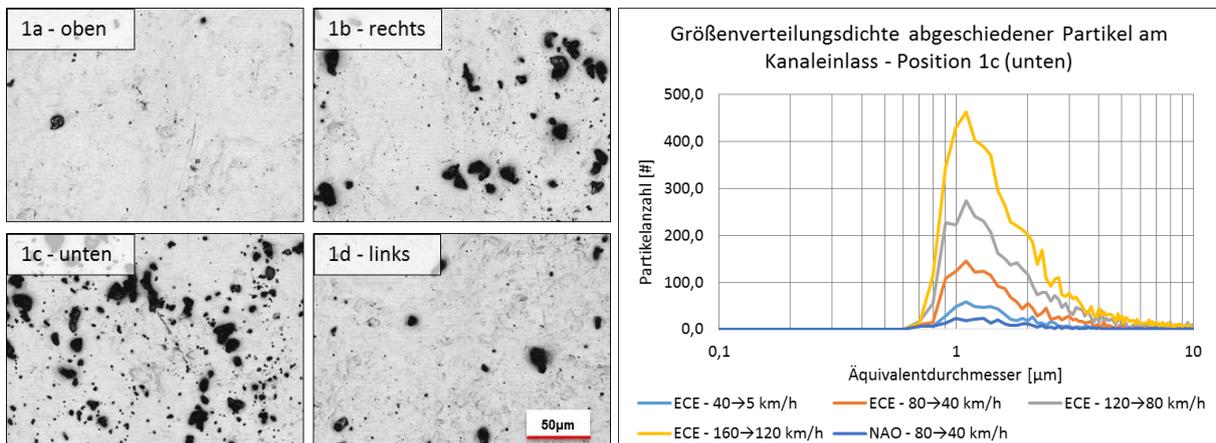


Abbildung 4-38: Partikelabscheidung an Messposition 1 (Kanaleinlass); Evak. in Fahrtrichtung 80 → 40 km/h

Abbildung 4-39: Partikelabscheidung – 80 → 40 km/h (850 m³/h) bei 30 bar (Bremse 1, ECE-kh, NAO-kh)

Aus den in Abbildung 4-39 gegenübergestellten Größenverteilungsdichten für Messposition 1 (aufsummiert über die Probenahmepads je Messposition) geht die bereits beschriebene Korrelation zwischen der Rotationsgeschwindigkeit und der Partikelanzahl abgeschiedener Partikel mit einem Peak im Größenbereich > 1 µm hervor. Auffällig ist, dass unter Beachtung der Nachweisgrenze (0,5 µm) nur geringfügige Anteile im Größenbereich zwischen 0,5 und 0,8 µm erfasst werden können, was gemäß [SAG07] aus dem reduzierten Einfluss der Transportmechanismen auf die Partikelgrößenklasse 0,1–1 µm zu erklären ist. Insgesamt können Partikelfragmente bis 45 µm innerhalb der Umhausung und bis 30 µm an Messposition 1 (Kanaleinlass) nachgewiesen werden, wobei die Detektionswahrscheinlichkeit dieser Größenklasse mit zunehmender Kanallänge sinkt. Unter Evakuierung entgegen Fahrtrichtung liegt eine erhöhte Intensität in der Anzahl abgeschiedener Partikel im unteren Bereich des Kanals vor, was dem Einfluss der Richtungsumkehr infolge von Impaktion (> 1 µm) zuzuschreiben ist. Die in Abbildung 4-40 und Abbildung 4-41 dargestellten, anzahlbezogenen Abscheideprofile spiegeln die

Beobachtungen aus Abschnitt 4.2 wider, wobei ein geringer Einfluss der Evakuierungsrichtung nachweisbar ist (Differenz < 10 %). Unter Evakuierung in Fahrtrichtung ist ein insgesamt homogeneres Abscheideprofil zu identifizieren.

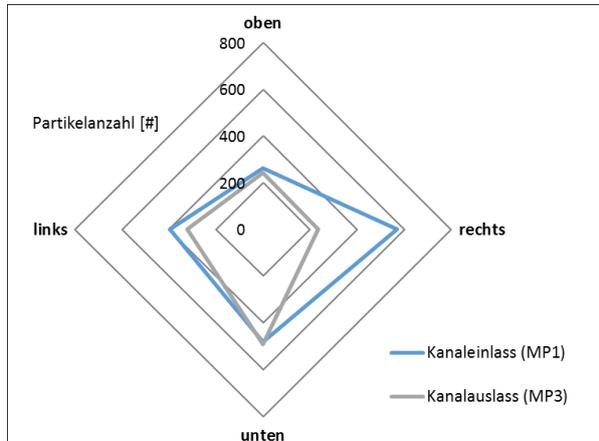


Abbildung 4-40: Partikelabscheideprofil; Evakuierung in Fahrtrichtung bei 850 m³/h 80 → 40 km/h

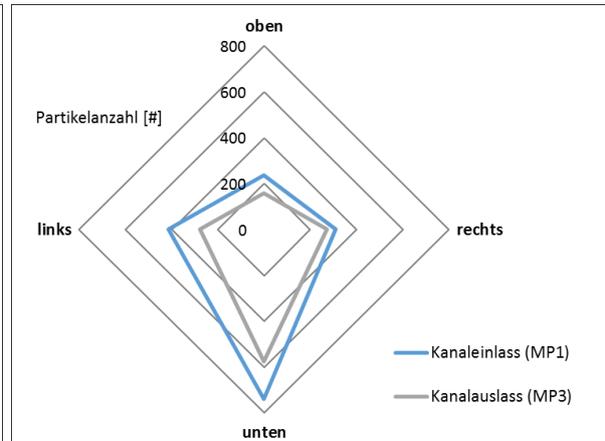


Abbildung 4-41: Partikelabscheideprofil; Evakuierung entgegen Fahrtrichtung bei 850 m³/h 80 → 40 km/h

Anhand der Größenklassifizierung (prozentuale Anteile) der unter Variation der Evakuierungsrichtung abgeschiedenen Partikel (vgl. Abbildung 4-42 und Abbildung 4-43) ist der Evakuierungsrichtung ein signifikanter Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung zuzuweisen. Für den Fall einer Evakuierung entgegen Fahrtrichtung können 90,7 % der abgeschiedenen Partikel an Messposition 1a (oben) der Größenfraktion $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ausgemacht werden. Unter Evakuierungsrichtungsumkehr fällt der Anteil auf 80,5 % ab, wobei neben einem homogeneren Abscheideprofil eine homogenere Größenverteilung bestimmt werden kann. Im Vergleich zu den anzahlbezogenen Verteilungsprofilen ist hingegen keine Uniformitätssteigerung unter Zunahme der Kanallänge erkennbar. An Messposition 3 ist vielmehr eine Zunahme im unteren Bereich des Kanals (3c) bei gleichzeitig erhöhtem Anteil der Größenfraktion $> 2,5 \mu\text{m}$ unter Evakuierung in Fahrtrichtung zu bestätigen. Gemäß der in Abbildung 4-44 und Abbildung 4-45 gegenübergestellten Anteile je Größenklasse resultiert aus der Evakuierung entgegen Fahrtrichtung eine erhöhte Abscheidewahrscheinlichkeit für Partikel $> 2,5 \mu\text{m}$ in der Umhausung.

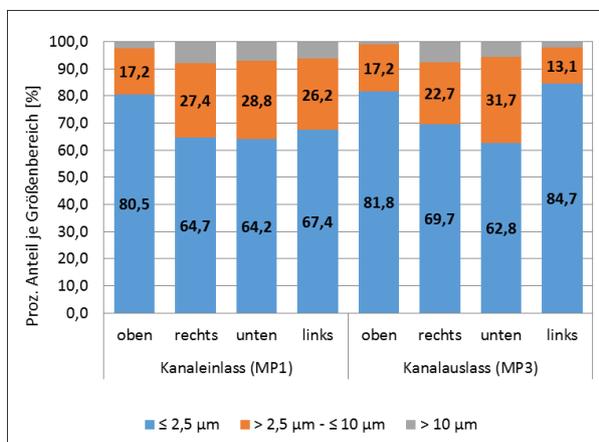


Abbildung 4-42: Größenklassifizierung im Kanal; Evak. in FR bei 850 m³/h, 80 → 40 km/h (ECE-kh)

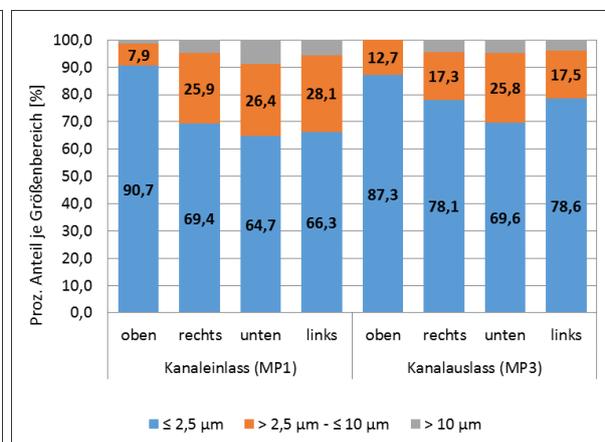


Abbildung 4-43: Größenklassifizierung im Kanal; Evak. gegen FR bei 850 m³/h, 80 → 40 km/h (ECE-kh)

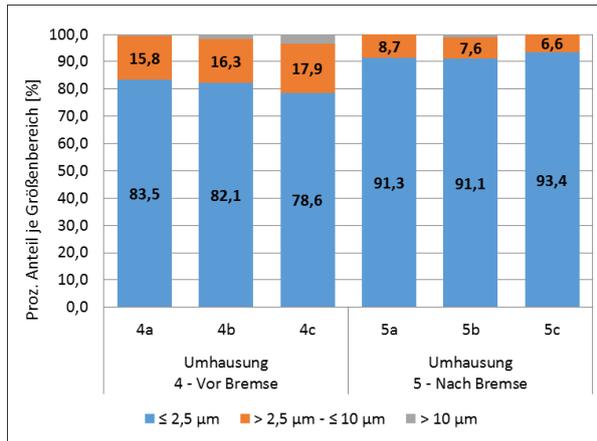


Abbildung 4-44: Größenklassifizierung in Umhausung; Evak. in FR bei 850 m³/h, 80 → 40 km/h (ECE-kh)

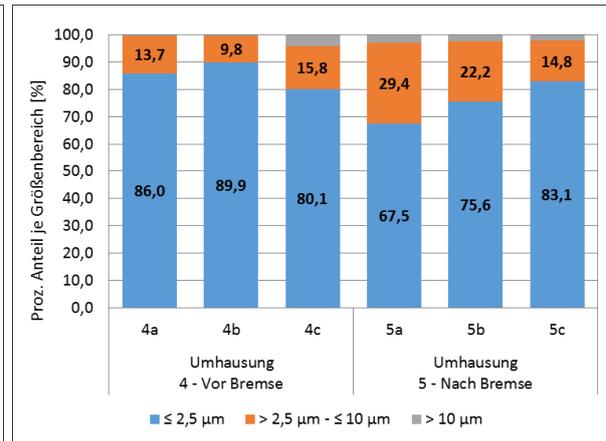


Abbildung 4-45: Größenklassifizierung in Umhausung; Evak. gegen FR bei 850 m³/h, 80 → 40 km/h (ECE-kh)

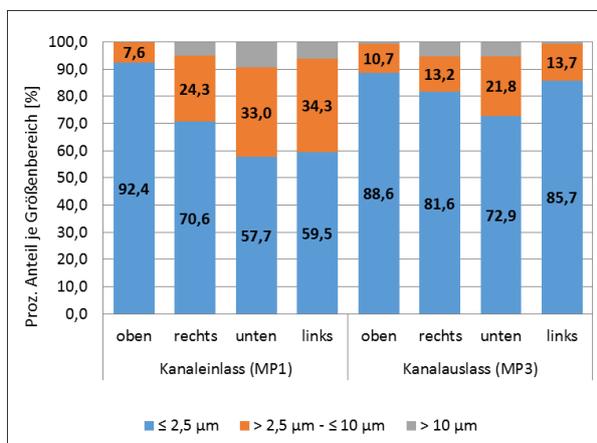


Abbildung 4-46: Größenklassifizierung im Kanal; Evak. in FR bei 850 m³/h, 40 → 5 km/h (ECE-kh)

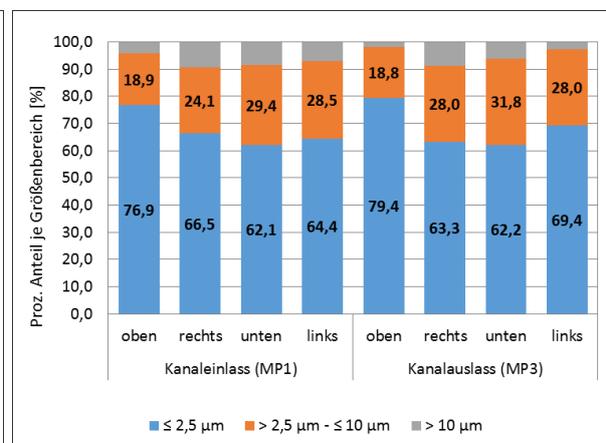


Abbildung 4-47: Größenklassifizierung im Kanal; Evakuierung in FR bei 850 m³/h, 120 → 80 km/h (ECE-kh)

Aus einer Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit folgt ein erhöhter Anteil an der Größenfraktion $> 2,5 \mu\text{m}$ (z. B. an Position 1a; Kanaleinlass – oben) bei einer insgesamt homogeneren Verteilung. Eine Bewertung zum Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit erfolgt gemäß Abbildung 4-46 und Abbildung 4-47 unter Geschwindigkeitsvariation. An Messposition 3 (Kanalauslass) sind die Anteile $> 2,5 \mu\text{m}$ im Vergleich zur Messposition 1 reduziert, was durch größen-spezifische Abscheidungen über den Verlauf des Kanals zu begründen ist. Zur Bewertung der Abscheideprofile unter reduziertem Evakuierungsvolumenstrom folgt gemäß Abbildung 4-48 ein Vergleich variierender Volumenströme. Für den Fall eines reduzierten Volumenstromes ist eine signifikante Beeinflussung bei einer erhöhten Abscheidewahrscheinlichkeit ableitbar. Die Anzahl der abgeschiedenen Partikel ist unter Halbierung des Volumenstromes über alle Messpositionen um bis zu einem Faktor von 2,5 erhöht. Entsprechend fällt unter Reduktion des Volumenstromes die Transporteffizienz für Partikel der Größenfraktion $> 2,5 \mu\text{m}$ deutlich ab. Zudem ist das Abscheideprofil (vgl. Abbildung 4-49) im Vergleich zur Referenz (vgl. Abbildung 4-40) durch eine deutlich erhöhte Anzahl abgeschiedener Partikel an Messposition 1c (unten) und 3c (unten) gekennzeichnet. Darüber hinaus kann eine homogene, anzahlbezogene Partikelverteilung jeweils rechts (1b/3rechts) und links (1d/3d) beobachtet werden. Letzteres ist mit

den Erkenntnissen aus der Untersuchung zur Partikelverteilung gemäß Abbildung 3-30 in Einklang zu bringen.

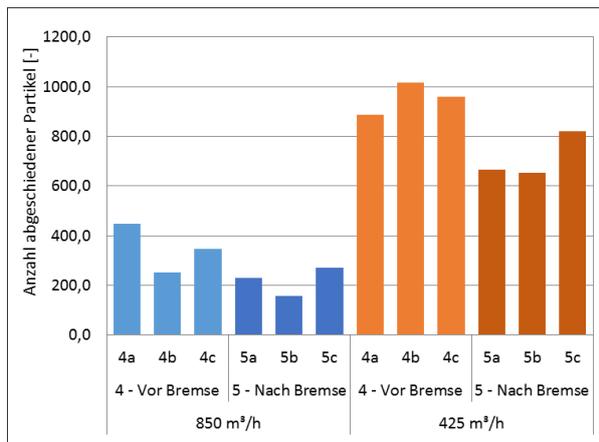


Abbildung 4-48: Partikelanzahl je Pad (Umhausung); Variation des Volumenstromes 80 → 40 km/h (ECE-kh)

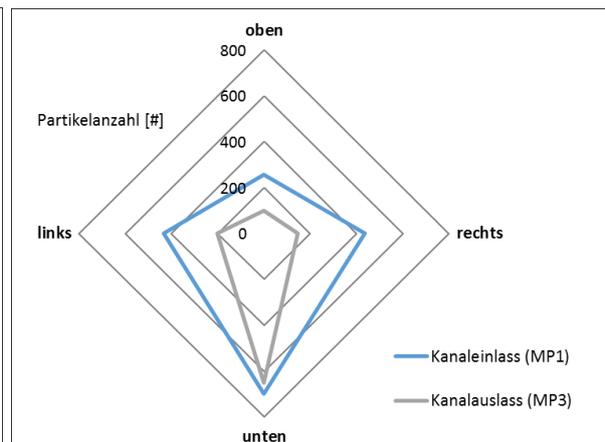


Abbildung 4-49: Partikelabscheideprofil; Evakuierung in Fahrtrichtung bei 425 m³/h, 80 → 40 km/h (ECE-kh)

An den Positionen 1a/3a (oben), 1b/3b (rechts) sowie 1d/3d (links) gemäß Abbildung 4-50 kann ein gegenüber der Referenz (vgl. Abbildung 4-42) infolge größenspezifischer Partikelverluste innerhalb der Umhausung (vgl. Abbildung 4-51) deutlich erhöhter Anteil an der Größenfraktion $\leq 2,5 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden. Die größenspezifischen Anteile an Messposition 1c (unten) sind mit der Referenz vergleichbar; an Messposition 3c (unten) ist der Anteil an der Größenfraktion $> 2,5 \mu\text{m}$ erhöht, was nur bedingt mit einer Uniformitätssteigerung über den Verlauf des Kanals in Einklang gebracht werden kann. An Positionen 4 und 5 sind nur geringe Unterschiede bei einer homogeneren Verteilung nachweisbar.

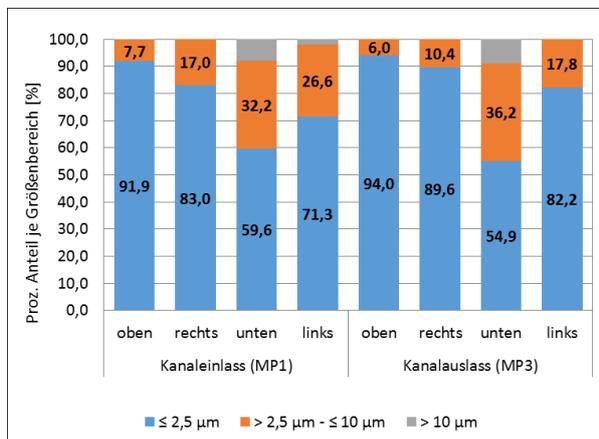


Abbildung 4-50: Größenklassifizierung im Kanal; Evak. in Fahrtrichtung bei 425 m³/h, 80 → 40 km/h (ECE-kh)

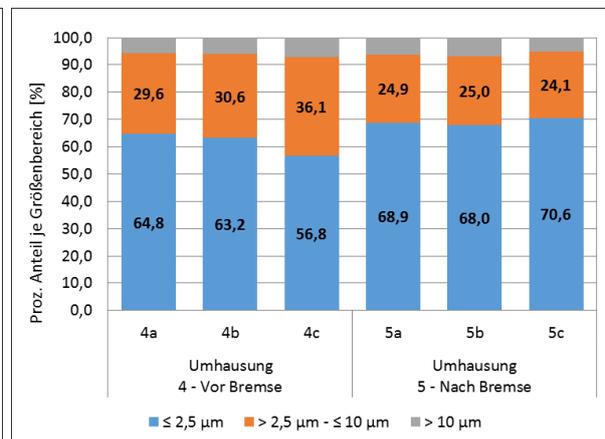


Abbildung 4-51: Größenklassifizierung in Umhausung; Evak. in FR bei 425 m³/h, 80 → 40 km/h (ECE-kh)

Im Falle eines NAO-kh ist der Anteil der Größenfraktion $> 2,5 \mu\text{m}$ gemäß Abschnitt 4.2 insgesamt niedriger einzustufen. Daraus resultierend konnte in Vergleichsmessungen ein insgesamt reduzierter Anteil an abgeschiedenen Partikeln dieser Größenfraktion, eine Erhöhung der Transporteffizienz und ein homogeneres Abscheideprofil innerhalb des Abluftkanals bestimmt werden. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mithilfe der mikroskopischen Analyse abgeschiedener Partikel eine umfangreiche Bewertung über die Einflüsse variierender

Parameter sowie eine Beurteilung über die Ergebnisqualität simulativer Untersuchungen ermöglicht wird. Es konnten Einflüsse der Initialgeschwindigkeit, der Evakuierungsrichtung und der Strömungsbedingungen auf die Partikelverteilung herausgearbeitet werden. Insgesamt konnten die in Abschnitt 3 beschriebenen Zusammenhänge grundsätzlich bestätigt werden.

4.3.3 Verifizierung der Abscheidegeschwindigkeit

Zur Beschreibung des Partikeltransports in Abhängigkeit der vorliegenden Strömungsbedingungen und den spezifischen Partikeleigenschaften sind gemäß [SAG07] und [SCH01] numerische und analytische Lösungsansätze bekannt. Anhand der in Abschnitt 3 vorgestellten Methodik wird eine simulative Untersuchung zum Partikelinjektions-, Partikelausbreitungs- und Partikelabscheideverhalten ermöglicht, wobei Einflüsse wie Thermophorese, Diffusion oder Koagulation unberücksichtigt bleiben. Um darauf aufbauend ein tieferes Verständnis über den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Partikelabscheidung (vgl. Abbildung 4-52) zu erhalten, folgt in diesem Abschnitt eine Untersuchung dessen mittels mikroskopischer Analyse. Infolge abweichender Partikelinjektions- und Ausbreitedynamik unter Variation der Rotationsgeschwindigkeit stellt die Verifizierung dieser Einflussgröße den primären Fokus dar.

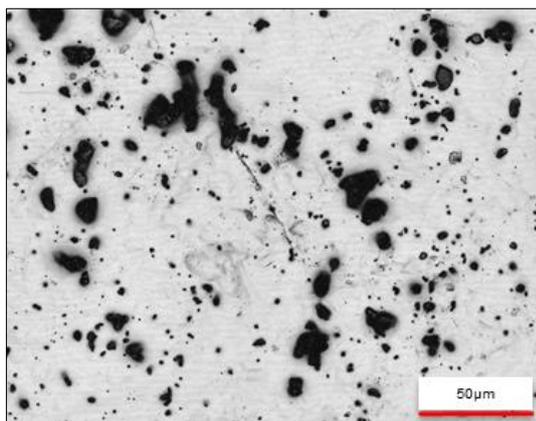


Abbildung 4-52: Partikelabscheidungen auf einem elektropolierten Edelstahlpad (20-fach)

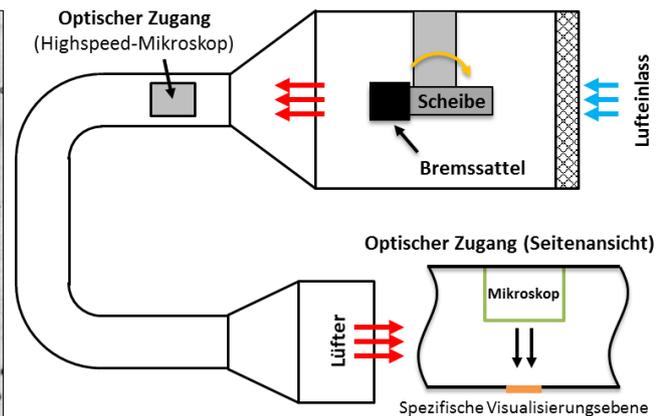


Abbildung 4-53: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Abscheidegeschwindigkeit [POP19]

Die Partikelvisualisierung auf bzw. über der Visualisierungsebene erfolgt mittels Highspeed-Mikroskop über einen optischen Zugang (vgl. Abbildung 4-53). Das Highspeed-Mikroskop bietet bei einer 1.000-fachen Vergrößerung eine Bildrate von 4.000 fps, was die Auflösung von Partikeln $\geq 1 \mu\text{m}$ ermöglicht. Die Bewertung zum Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit erfolgt für zwei differenzierte Edelstahloberflächen. Oberfläche 1 ist bei verteilten Riefen eine mittlere Rauigkeit (R_a) von 0,594 zuzuweisen, die elektropolierte Oberfläche 2 eine R_a von 0,638. Die Gegenüberstellung in Abbildung 4-54 und Abbildung 4-55 zeigt, dass die Struktur der Oberfläche 1 ein deutlich inhomogeneres Profil aufweist. Die Untersuchungen erfolgen für Geschwindigkeitsbereiche der AK-Master-Druckreihen 4.1–4.3 bei 30 bar und 850 m³/h. Je Geschwindigkeitsbereich werden 25 Einzelbremsungen in direkter Abfolge (Initialtemperatur 100 °C) analysiert.

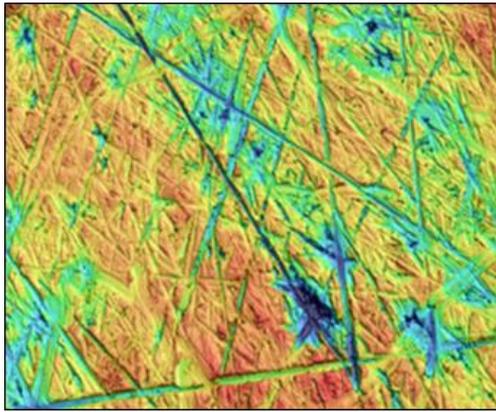


Abbildung 4-54: 3D-Struktur Oberfläche 1 (Ausschnitt: 0,2 mm x 0,2 mm)

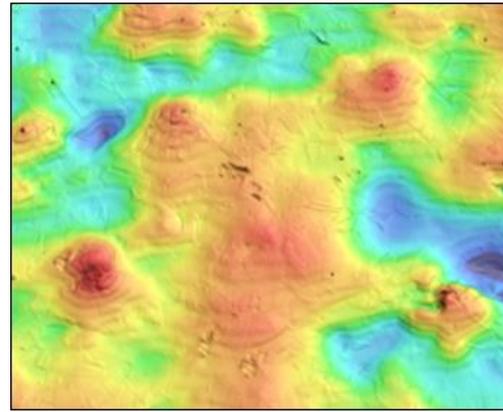


Abbildung 4-55: 3D-Struktur Oberfläche 2 – elektroliert (Ausschnitt: 0,2 mm x 0,2 mm)

Partikel, welche in die viskose Wandschicht ($\delta_v = 0,086 \text{ mm}$) gelangen, werden abgebremst und scheiden auf den analysierten Strukturen ab (vgl. Abbildung 4-56 bis Abbildung 4-59) [POP19]. Die mittleren Abscheidegeschwindigkeiten, bestimmt anhand der Bildframes vor dem Zeitpunkt der Partikelabscheidung, betragen $5,62\text{E-}2 \text{ m/s}$ (Oberfläche 1) und $5,85\text{E-}2 \text{ m/s}$ (Oberfläche 2) und sind als kritische Abscheidegeschwindigkeiten für die vorliegenden Betriebsbedingungen zu definieren.

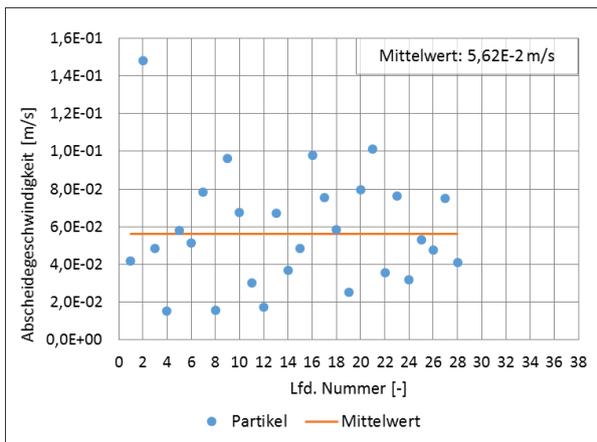


Abbildung 4-56: Partikelabscheidegeschwindigkeit Oberfläche 1; 80 → 40 km/h (ECE-kh)

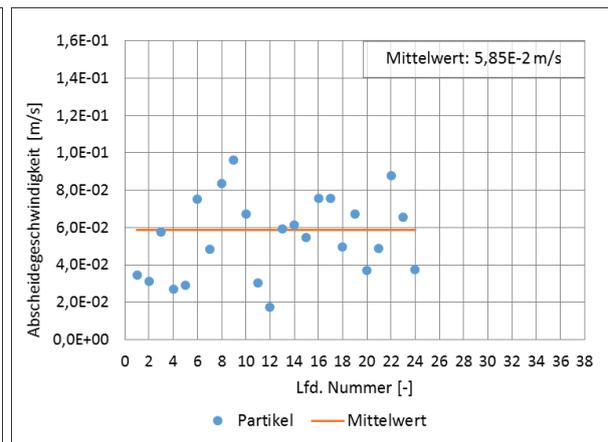


Abbildung 4-57: Partikelabscheidegeschwindigkeit Oberfläche 2 (elektroliert); 80 → 40 km/h (ECE-kh)

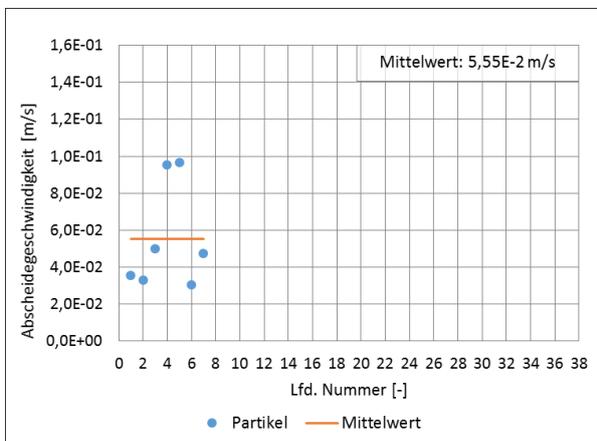


Abbildung 4-58: Partikelabscheidegeschwindigkeit Oberfläche 1; 40 → 5 km/h

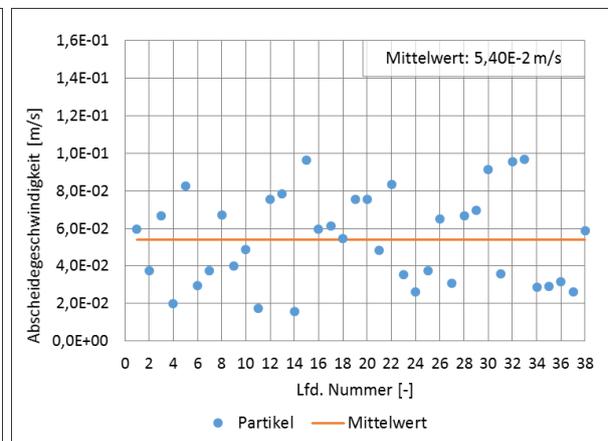


Abbildung 4-59: Partikelabscheidegeschwindigkeit Oberfläche 1; 120 → 80 km/h

Strömt ein Partikel mit der Geschwindigkeit kleiner gleich der kritischen Abscheidegeschwindigkeit im Bereich der (viskosen) Wandschicht, kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Abscheidung. Auch unter Variation der Initialgeschwindigkeit (Oberfläche 1) können erwartungsgemäß nur geringfügige Abweichungen nachgewiesen werden. Auffällig ist die Reduktion bzw. Erhöhung der Anzahl abgeschiedener Partikel entsprechend des Einflusses der Reibenergie. Damit ist die Beeinflussung des Geschwindigkeitsprofils auf die Partikelabscheidegeschwindigkeit als gering zu bewerten. Die primäre Beeinflussung der Abscheidewahrscheinlichkeit erfolgt damit durch die vorliegenden Strömungsbedingungen und die daraus resultierende Ausbildung der viskosen Wandschicht. Der Abscheidemechanismus ist dadurch zu definieren, dass die Partikel in die viskose Wandschicht eintreten, abgebremst und abgeschieden werden. Damit können insgesamt die in [GRP07] beschriebenen Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit (vgl. Tabelle 3-3 gemäß GRPE-53-03) auf den vorliegenden Anwendungsfall übertragen werden. Zu berücksichtigen sind demnach möglichst glatte Oberflächen aus elektrisch leitfähigen und nicht korrosiven Werkstoffen (z. B. Edelstahl). Hierbei sei auf [WAN17] verwiesen. Darin wird die Partikelabscheidung in durchströmten Geometrien mit konvexen oder konkaven Wandstrukturen anhand von Partikeldurchmessern zwischen 0,1 und 50 μm bewertet. Es wird nachgewiesen, dass die Ablagerungsgeschwindigkeit in einem Kanal mit konvexen Wandstrukturen gegenüber einem Kanal mit konkaven Strukturen höher ausfällt. Dies wird durch die deutlich komplexere Strömung und die damit korrelierende Erhöhung der turbulenten kinetischen Energie im wandnahen Bereich begründet. Es wird weiterhin beschrieben, dass durch konkave Strukturen die Partikelabscheidung verstärkt wird, während für konvexe Strukturen eine Reduktion, besonders für Partikel $\leq 2,5 \mu\text{m}$, beobachtet werden kann.

4.4 Verifizierung sektionaler Partikelabscheidungen

In Abschnitt 4.3 konnten Partikelabscheidungen $> 10 \mu\text{m}$ innerhalb der Umhausung identifiziert werden, welche nicht den Feinstaubklassen zuzuordnen sind. Diese Partikel repräsentieren nur einen geringen Anteil an der gesamten Partikelanzahl, beeinflussen jedoch signifikant die Masse des emittierten Größenspektrums. Zur Verifizierung emittierter Partikelmassen und deren Verteilung innerhalb eines Probenahmesystems folgt in diesem Abschnitt die Untersuchung sektionaler Partikelabscheidungen ohne Trennung in Größenfraktionen. Dies ermöglicht die Bestimmung einer partikelmassebezogenen Transporteffizienz als Partikelmassenbilanz über das gesamte Größenspektrum und als Erweiterung zu den in Abschnitt 4.3 vorgestellten größen aufgelösten Anteilen. Eine größen selektive Trennung ist durch Variation von Filterklassen möglich, wobei zwei hintereinander geschaltete Filterstufen unterschiedlicher Filterklassen, wie z. B. ein Feinstaubfilter für Partikel 1–10 μm vor einem Schwebstofffilter für Partikel $< 1 \mu\text{m}$, denkbar sind. Als Herausforderung der Methodik ist der Anstieg des Staudruckes durch die Filterintegration, die flache Trennkurve sowie die Dynamik des Staudruckes in Abhängigkeit von der Filterbeladung zu nennen. Ein repräsentatives Ergebnis setzt demnach

eine Überwachung des Evakuierungsvolumenstromes voraus. Die Bestimmung der partikelmassenbezogenen Transporteffizienz erfolgt auf Basis der gravimetrischen Bestimmung sektionaler Partikelabscheidungen. Dazu werden nach einem vordefinierten Zyklus die Anteile abgeschiedener Partikel bestimmt und gegeneinander verglichen. Der Vergleich erfolgt zwischen evakuierter und nicht-evakuierter Partikelmasse. Als evakuiert gilt der Anteil, welcher die Referenzposition im Abluftkanal passiert. Die Referenzposition stellt die in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Messposition 3 (Kanalauslass) dar (vgl. Abbildung 4-60; Evakuierung entgegen Fahrtrichtung), an der ein Feinstaubfilter der Klasse M5 (gemäß EN 779:2012) mit einer mittleren Abscheideeffizienz ($0,4 \mu\text{m}$) zwischen $40 \% \leq E_m < 60 \%$ integriert wird. Die schrittweise Bestimmung der Masse abgeschiedener Fragmente erfolgt nach sektionaler Evakuierung anhand des Filtermassenzuwachses. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen am Beispiel des Einkolben-Schwimmsattel (Bremse 1; vgl. Abschnitt 4.2.1) [SCH13]. In Abbildung 4-61 ist die sektionale Partikelmassenbilanz gegenübergestellt.

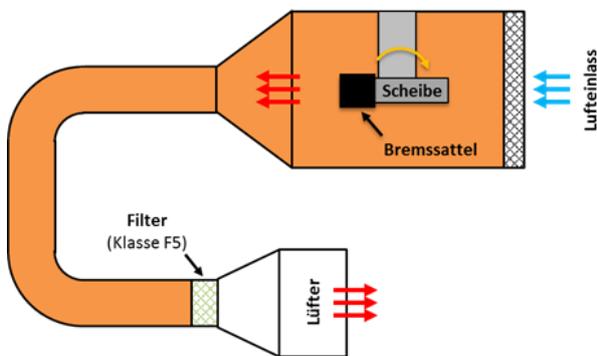


Abbildung 4-60: Versuchsaufbau zur Bestimmung sektionaler Partikelabscheidungen

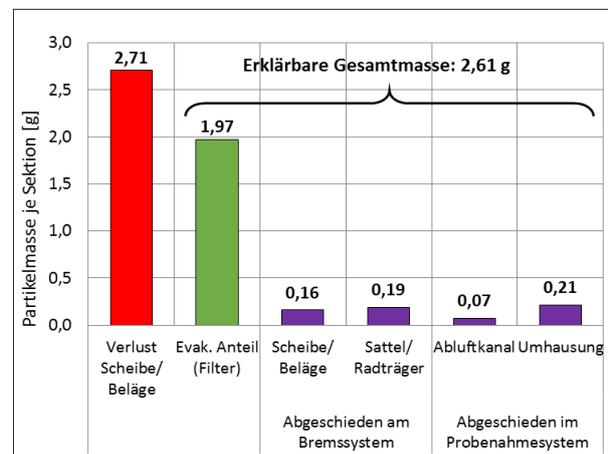


Abbildung 4-61: Massenbilanz für 60x 80 → 40 km/h (Evakuierung in Fahrtrichtung bei $425 \text{ m}^3/\text{h}$) – ECE-kh

Daraus geht hervor, dass der überwiegende Anteil der Verschleißmasse (1,97 g) evakuiert bzw. im Filter (Messposition 3) abgeschieden wird. Auf Scheibe und Belägen können 0,16 g bestimmt werden, wobei die Bereiche des Reibkontaktes, der Chamfer (Belagauslass), des Scheibentopfes und der Scheibeninnenbelüftung (vgl. Abbildung 3-23 und Abbildung 4-2) als Abscheideorte identifiziert werden können. Diese, insbesondere jedoch die Anteile im Bereich des Reibkontaktes zwischen Belag und Scheibe, sind als Ursprung für die in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Sekundärpartikelemissionen zu verstehen. Zudem kann eine Partikelmasse von 0,19 g auf den Komponenten Bremssattel und Radträger bestimmt werden. Damit ist auf den Komponenten des Bremssystems eine Gesamtmasse von 0,35 g bzw. ein Anteil von ca. 13 % des Massenverlustes (Scheibe + Beläge) nachweisbar. Dieser Anteil steigt für eine Festsattelbremse mit identischer Belagzusammensetzung (Bremse 2; vgl. Abschnitt 4.2.1) auf ca. 18 % an. Die innerhalb des Probenahmesystems abgeschiedenen Anteile können mit 0,21 g der Umhausung und 0,07 g dem Abluftkanal zugewiesen werden. Letztlich kann durch diese

Methodik eine Partikelmasse von 2,61 g erklärt werden, was ca. 96 % der Verlustmasse entspricht. Ein Anteil von ca. 4 % wird nicht in der Filterstufe abgeschieden und fällt infolge begrenzter Filtereffizienz aus der Gesamtbewertung heraus. Damit sind die Komponenten des Bremssystems als relevante Abscheideorte auszumachen, was besonders für eine zukünftige Homologationsmethode zu beachten ist.

4.5 Fazit zur Verifizierung der Partikelverteilung und Partikelabscheidung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Methoden zur Verifizierung von Emissionscharakteristiken sowie zur experimentellen Validierung der in Abschnitt 3.3 vorgestellten Erkenntnisse vorgestellt. Die Methoden zur Verifizierung der Partikelverteilung und -abscheidung sind auf jede Art von Konstantvolumen-Probenahmesystemen übertragbar und ermöglichen ein tieferes Verständnis über die ablaufenden Vorgänge. Aus den Untersuchungen zur Partikelverteilung (vgl. Abschnitt 4.1) ist abzuleiten, dass die Probenahme mit einem anzahlbezogenen Uniformitätsindex ≤ 5 % am Kanalauslass (Messposition 3) unter Evakuierung in Fahrtrichtung erfolgen sollte. Dadurch können die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen bestätigt und eine Festlegung über die Position der Probenahme und Evakuierungsrichtung für den weiteren Verlauf der Arbeit getroffen werden. Zudem ist der Fahrgeschwindigkeit ein signifikanter Einfluss zuzuweisen. Aus dynamischen Geschwindigkeitswechseln resultieren dynamische Partikelinjektionsbedingungen und -verteilungsprofile, wodurch auch die Repräsentativität der entnommenen Teilprobe über den Verlauf eines Prüfzyklus (vgl. Tabelle 5-1) als dynamische Größe zu verstehen ist. Der anzahlbezogene Uniformitätsindex (aerodynamischer Durchmesser bis 10 μm) beträgt an Messposition 3 und unter Evakuierung in Fahrtrichtung ≤ 6 %. Damit ist die Skalierung des punktuell analysierten Teilvolumens auf das gesamte evakuierte Volumen mit einem geringen, jedoch akzeptablen Grad an Unschärfe möglich. Es konnte gezeigt werden, dass unter Evakuierung in Fahrtrichtung und Erhöhung des Evakuierungsvolumenstromes eine Erhöhung der aus der Umhausung evakuierten Massenanteile resultiert. Die Bestimmung eines massebezogenen Verhältnisfaktors $\text{PM}_{10}\text{-PM}_{2.5}$ ermöglicht eine Bewertung über Einflüsse des geometrischen Designs oder der Betriebsbedingungen und stellt ein Vergleichsnormale bei der Entwicklung und dem Vergleich von Probenahmesystemen dar. Es konnte gezeigt werden, dass Änderungen im Partikelverteilungsprofil und der Transporteffizienz besonders den massebezogenen PM_{10} -Emissionsfaktor beeinflussen. Aus der Analyse abgeschiedener Partikel konnte der Initialgeschwindigkeit, der Evakuierungsrichtung und dem Evakuierungsvolumenstrom ein hoher Einfluss auf die Partikelverteilung in Umhausung und Abluftkanal nachgewiesen werden. Insgesamt ist die Abscheidewahrscheinlichkeit im unteren Bereich der Abluftkanals für Partikel der Größenfraktion $> 2,5$ μm am höchsten, im oberen Bereich am niedrigsten. Die Abscheidewahrscheinlichkeit steigt unter Reduktion des Volumenstromes und der Initialgeschwindigkeit. Darauf aufbauend konnte mithilfe von In-situ-Visualisierungen abgeschiedener Partikel im Rohrquerschnitt ein direkter Zusammenhang

zwischen Abscheidengeschwindigkeit und Strömungsgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Ein Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit) und Abscheidewahrscheinlichkeit konnte nicht beobachtet werden. Folglich ist die Partikelabscheidung primär durch die vorliegenden Strömungsbedingungen gekennzeichnet. Durch die Bestimmung sektionaler Partikelabscheidungen konnte bestätigt werden, dass Anteile des Massenverlustes an den Komponenten des Bremssystems sowie auf der Innenseite des Probenahmesystems abgeschieden werden.

4.6 Konzeptionierung und Gestaltung eines Probenahmesystems

Aufbauend auf den vorgestellten Ergebnissen können entsprechend Tabelle 4-1 zwei unterschiedliche Konzepte von Konstantvolumen-Probenahmesystemen unterschieden werden. Die Unterscheidung erfolgt auf Basis eines flächenbezogenen Verhältnisfaktors $A_{1,2eff}$, welcher das Verhältnis zwischen effektiver Querschnittsfläche innerhalb der Umhausung im Bereich der Partikelinjektion A_{1eff} (abzüglich der aus der Geometrie des Bremssystems resultierenden Querschnittsfläche) mit der Querschnittsfläche des Abluftkanals A_{2eff} repräsentiert. Für die unterschiedlichen Konzepte liegen in Umhausung und Abluftkanal unterschiedliche Strömungsbedingungen vor, welche den Partikeltransport und die Partikelverteilung beeinflussen.

Tabelle 4-1: Konzepte zur Gestaltung und Betrieb eines Konstantvolumen-Probenahmesystems

Konzept 1: Verhältnisfaktor der effektiven Querschnittsflächen $A_{1,2eff} > 3$	
Merkmale	Deutliche Aufweitung des Abstandes zwischen Scheibe und Innenwand der Umhausung (radial), Verhältnisfaktor der effektiven Querschnittsflächen A_{eff} auch $\gg 3$. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der Partikelinjektion (ruhende Scheibe) ist ≤ 2 m/s, wobei im Übergangsbereich Umhausung–Abluftkanal eine hohe Beschleunigung (bis auf 15 m/s im Kanal) möglich ist.
Vorteile	Eine möglichst homogene Partikelverteilung über unterschiedlichste Geschwindigkeitsbereiche. Reduktion der Aufprallwahrscheinlichkeit auf der Innenwand der Umhausung unter hohen Initialgeschwindigkeiten (> 100 km/h).
Nachteile	Erhöhte Partikelverweilzeit und erhöhte Abscheiderate (Partikel $> 2,5$ μm) infolge des reduzierten Evakuierungsvolumenstromes Q bzw. der Strömungsgeschwindigkeit v um die Bremse.
Konzept 2: Verhältnisfaktor der effektiven Querschnittsflächen $A_{1,2eff} \leq 3$	
Merkmale	Geringe Aufweitung der Geometrie im Bereich der Partikelinjektion bei gleichzeitig hohen Strömungsgeschwindigkeiten von > 3 m/s (hohe Reynoldszahl). Die effektiven Querschnittsflächen im Zu-/Abluftkanal sowie in der Umhausung wichen um maximal den Faktor 3 voneinander ab.
Vorteile	Geringere Partikelverweilzeit bei vergleichbarem Evakuierungsvolumenstrom Q , die Auflösung dynamischer Konzentrationsprofile und verbesserte Kühlung der Bremse infolge erhöhter Strömungsgeschwindigkeit und reduziertem Gehäusevolumens.
Nachteile	Inhomogenere Partikelverteilung innerhalb der Umhausung, wodurch dem Abluftkanal primäre Bedeutung zur Gewährleistung einer uniformeren Partikelverteilung zuteil wird. Erhöhte Abscheiderate auf der Innenwand der Umhausung unter hohen Initialgeschwindigkeiten infolge des reduzierten radialen Abstandes. Für Partikel $> 2,5$ μm sind unter hohen Strömungsgeschwindigkeiten (> 10 m/s) infolge der Impaktion inhomogene Konzentrationsprofile durch Krümmungen und Bögen wahrscheinlich. Keine Adaption von Radträgeranbauten (Knuckle) möglich.

Unter Beachtung der in Tabelle 3-1 aufgeführten Hauptanforderungen erfolgt die Unterscheidung der Konzepte gemäß Abbildung 4-62 und Abbildung 4-63 neben der effektiven Querschnittsfläche insbesondere anhand der resultierenden Strömungsgeschwindigkeit $v_{1,2}$. Eine hohe Beschleunigung der Partikel im Übergangsbereich Umhausung–Abluftkanal sowie abrupte Querschnittsübergänge erhöhen z. B. den Einfluss der Wirbelträgheit und führen zu einer erhöhten Abscheidewahrscheinlichkeit. Dabei können für Konzepte 1 und 2 die Strömungsgeschwindigkeiten $v_{1,2}$ innerhalb des Abluftkanals, in Abhängigkeit von der angestrebten Verdünnungsrate, vergleichbar sein. Merkmale der Zulufführung bleiben bei der Unterscheidung der Konzepte unberücksichtigt. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Design entspricht Konzept 1 (vgl. Abbildung 4-64), wobei ein Einlassfilter integrativer Bestandteil ist und einlassseitig keine wesentliche Geometrieänderung vorliegt. Für diesen Fall ist $A_{1\text{eff}} \gg A_{2\text{eff}}$ sowie $v_1 \ll v_2$.

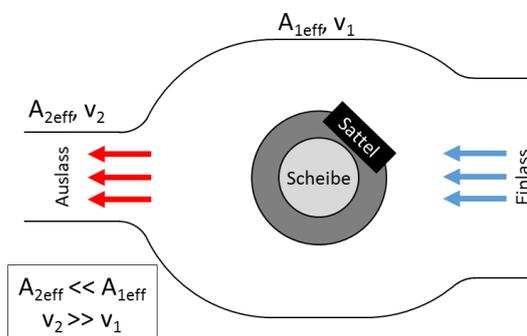


Abbildung 4-62: Konzept 1 eines Probenahmesystems – Fokussierung auf die Partikelverteilung

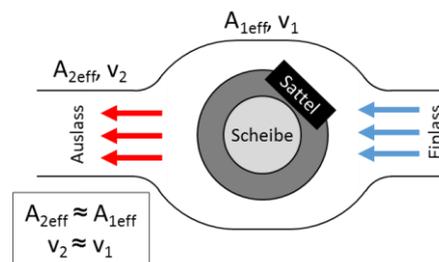


Abbildung 4-63: Konzept 2 eines Probenahmesystems – Linearisierung der Strömung um die Bremse

Zur Reduktion von Einflüssen durch Richtungsumkehr und Rückstromgebiete (z. B. bei seitlicher Einströmung) ist eine lineare Ausrichtung von Zuluftkanal, Rotationsachse (Bremse) und Abluftkanal gemäß der Darstellungen zu bevorzugen. Die Auswahl eines Konzeptes mit jeweils spezifischen Vorteilen liegt dem Anwendungszweck zugrunde und ist als Kompromissentscheidung zu werten. Insbesondere dort, wo eine maximale Bremsenkühlung und schnelle Evakuierung bei akzeptabler Verdünnungsrate angestrebt wird, empfiehlt sich Konzept 2.

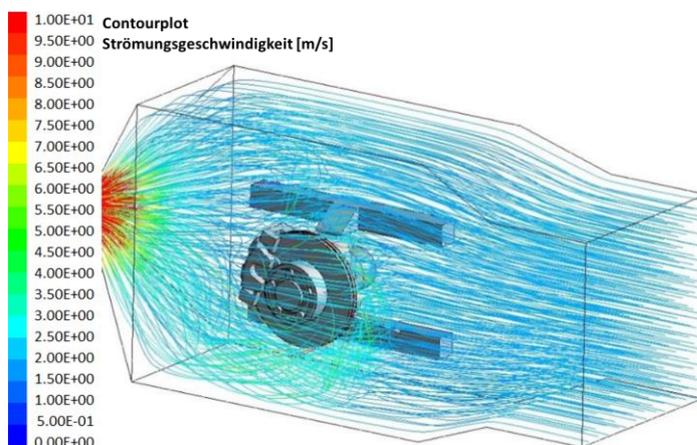


Abbildung 4-64: Strömungsgeschwindigkeit im Probenahmesystem nach Konzept 1 (850 m³/h) [FEI16]

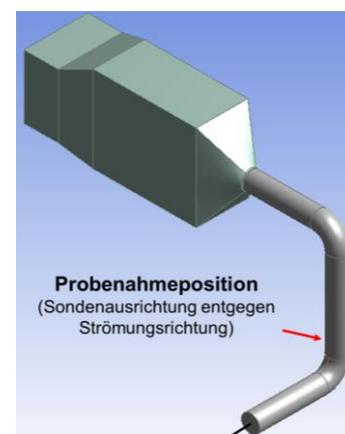


Abbildung 4-65: Konzept eines Probenahmesystems mit vertikalem Fallrohr

Wird ein maximaler Grad an Uniformität für eine möglichst repräsentative Probenahme angestrebt, empfiehlt sich Ansatz 1. Neben der beschriebenen Doppel-90°-Umlenkung ist auch ein

vertikales Teilstück (vgl. Abbildung 4-65) innerhalb des Abluftkanals denkbar. Unter niedriger Strömungsgeschwindigkeit und hoher Partikelverweilzeit können Einflüsse durch Sedimentation reduziert und die Repräsentativität der entnommenen Probe erhöht werden. Weiterhin können gemäß Tabelle 4-2 vorteilhafte und universelle Ansätze zum Design eines Probenahmesystems für stationäre Anwendungen abgeleitet werden. Das in Abschnitt 3.4 vorgestellte Probenahmesystem für die mobile Anwendung entspricht infolge der seitlichen Adaption von Zu- und Abluftkanal sowie der individuellen Sattelmontage und Geometriebeschränkungen je Fahrzeug einem Sonderfall. Im Vergleich zum SMP sind konstruktive Vorgaben deutlich individueller, um die in Abschnitt 3.4 beschriebenen Abscheideorte wirkungsvoll zu reduzieren.

Tabelle 4-2: Konstruktive und geometrische Merkmale eines Probenahmesystem

Nr.	Bezeichnung	Bewertung
1	Evakuierungsrichtung	Evakuierung in Fahrtrichtung und Orientierung der Auslassgeometrie in horizontaler Richtung zu bevorzugen.
2	Geometrie und Design des Abluftkanals	Horizontal-verlaufender Kanal mit Doppel-90°-Umlenkung zur Optimierung der Partikelverteilung unter Beachtung der nach GRPE-53-03 aufgeführten Vorgabe einer Kanallänge, die das 10–20-fache des Kanaldurchmessers beträgt; zur Erhöhung der Transporteffizienz (bis 10 µm) ist nach einem horizontal-verlaufendem Segment ein 90°-Bogen, gefolgt von einem vertikalen Fallrohr.
3	Probenahmeposition	Für eine repräsentative Probenahme mit minimal zwei Sonden (PN/PM), verteilt über den Querschnitt, ist ein anzahl- und massebezogener Uniformitätsindex $\leq 10\%$ erforderlich. Die Sicherstellung erfolgt vor Beginn eines Prüflaufs.
4	Krümmungsradien in Umhausung und Kanal	Zur Reduktion der turbulenten kinetischen Energie und des Problems turbulenter Strömungsabrissse, was zu lokal reduzierten Partikelverlusten führen kann.
5	Querschnittsverjüngungen am Kanalübergang mit flachem Öffnungswinkel	Durch eine stetige Verjüngung wird die Strömung beschleunigt (Wandel zwischen kinetischer Energie und Druckenergie); Vorteil ist eine Linearisierung der Strömung, welche besonders bei flachem Öffnungswinkel ($< 30^\circ$) vorliegt; der Vorteil auf den Transport ist als gering einzustufen, sofern es zur verstärkten Ausbildung der viskosen Grenzschicht im Übergangsbereich kommt.
6	Universale Bremsenaufnahme	Insbesondere für ein Homologationstool bietet dieser Ansatz eine vergleichbarere Beeinflussung der Strömungsbedingungen; Einfluss beschränkt sich auf die Geometrie der Prüflinge und des Sattels.
7	Identische Sattelposition und Rotationsrichtung	Steigerung der Vergleichbarkeit bezüglich Partikelinjektion- und Partikelverteilung; die Partikelinjektion in Evakuierungsrichtung (Sattelmontage zwischen 270° – 360°) ist infolge des Einflusses der Impaktion vorteilhaft.
8	Oberflächenbeschaffenheit und Rauigkeit	Nach Abschnitt 4.3 erfolgt die primäre Beeinflussung der Abscheidewahrscheinlichkeit durch die Strömungsbedingungen und die damit gekoppelte Ausbildung der viskosen Grenzschicht, welche zur Abbremsung und Abscheidung der Partikel führt. Zudem ist anzumerken, dass unter Zunahme der Rauigkeitserhebung der Einfluss der Haftkraft bei identischer Partikelgröße und Partikelform sinkt. Nach GRPE-53-03 werden glatte Innenflächen und Teile aus elektrisch leitfähigen Werkstoffen (z. B. Edelstahl) vorgegeben, die nicht mit den (Abgas-) Bestandteilen reagieren. Zur Reduktion elektrostatischer Effekte sind alle Komponenten zu erden. Diese Ansätze sind zu übernehmen.

5 Mess- und Klassifizierbarkeit

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften partikelförmiger Bremsenemissionen werden vornehmlich durch die Zusammensetzung der Reibpartner und dem Beanspruchungskollektiv wie der Rotationsgeschwindigkeit oder der Reibzonentemperatur bestimmt. Dazu werden die Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung des Reibbelages und der resultierenden Emissionscharakteristik vorgestellt, die Messfähigkeit unterschiedlicher physikalischer Messprinzipien überprüft sowie der Einfluss der Temperatur auf die Partikelbildung untersucht. Die Untersuchungen erfolgen auf Basis des stationären Konstantvolumen-Probenahmesystems.

5.1 Chemische Zusammensetzung der Reibpartner und emittierten Partikel

In diesem Abschnitt werden grundlegende Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung zweier Reibbeläge und dem Einfluss variierender Beanspruchungsparameter identifiziert. Die Untersuchung erfolgt anhand ECE-kh und NAO-kh, deren Belagmatrix in Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 (Rasterelektronenmikroskopie) gegenübergestellt sind. Als metallischer Grundkörper dient eine konventionelle Graugussscheibe (GG 15 HC).

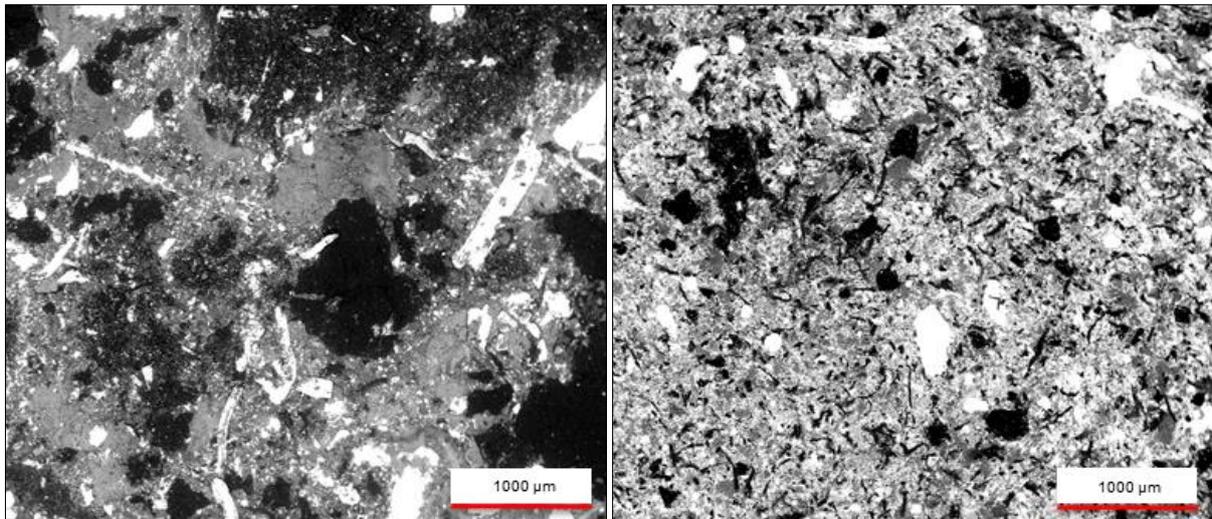


Abbildung 5-1: REM-Aufnahme (30-fach) der Belagmatrix des ECE-kh – abgefräst

Abbildung 5-2: REM-Aufnahme (30-fach) der Belagmatrix des NAO-kh – abgefräst

Darüber hinaus kommt im Rahmen dieser Arbeit ein kupferfreier Low-Steel-Belag (ECE-kf) zur Anwendung. Weiterhin werden die Potenziale alternativer Scheibenkonzepte auf Basis einer wolframkarbidbeschichteten Scheibe (HMB) und eines dazu kompatiblen ECE-kh (HMB) untersucht. Gemäß Abbildung 5-3 weist die Belagmatrix des ECE-kh im Vergleich zum NAO-kh deutlich ausgeprägtere, schieferförmige Kohlenstoffplateaus und Eisenspäne auf. Die Belagmatrix des NAO-kh weist feine, homogen verteilte Fragmente wie Eisen, Silizium, Magnesium und Aluminium mit Ausnahme von Kupfer auf. Tiefgreifende Untersuchungen zur Zusammensetzung und Struktur einer Belagmatrix sind [GRA14] zu entnehmen.

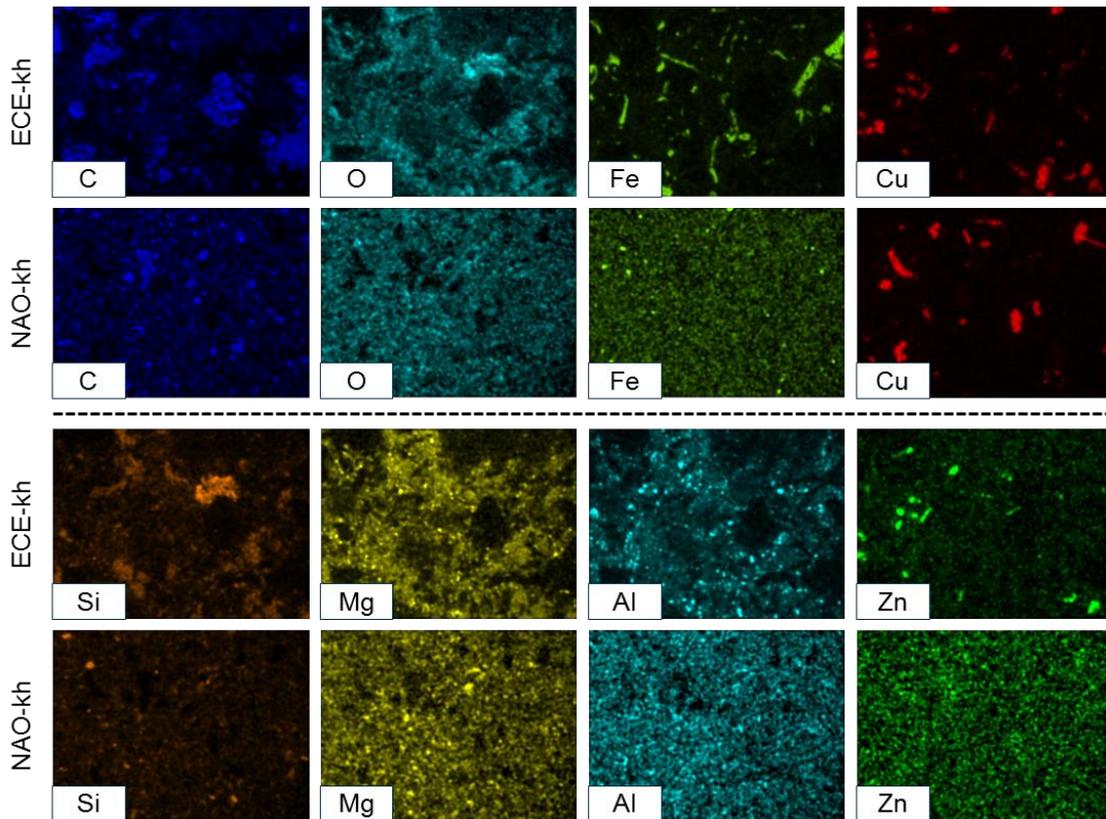


Abbildung 5-3: EDX-map (30-fach) der Belagmatrix – ECE-kh und NAO-kh

Die atomaren Konzentrationen (normiert) der im ECE-kh und NAO-kh enthaltenen Elemente sind in Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 gegenübergestellt. Die Analyse erfolgt mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX), wobei die von Festkörpern bei Elektronenbeschuss emittierte, charakteristische Röntgenstrahlung spezifischer Energie zur Elementdetektion genutzt wird. Die Messung erfolgt im Strahlengang des Rasterelektronenmikroskops (REM). Die analysierte Schichtdicke beträgt bis zu 1,5 µm (bei 20 keV).

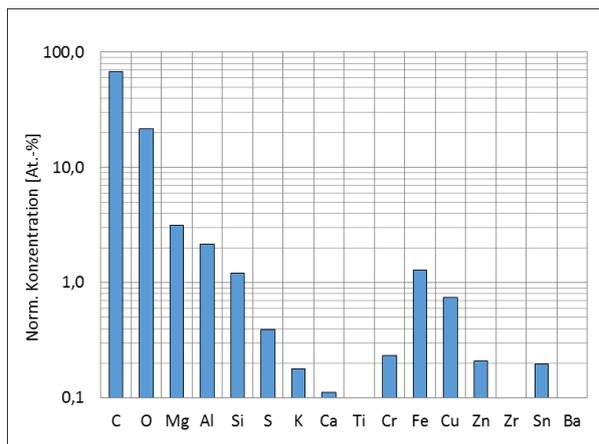


Abbildung 5-4: At.-Konzentration (normiert), bestimmt mittels EDX-Analyse – ECE-kh

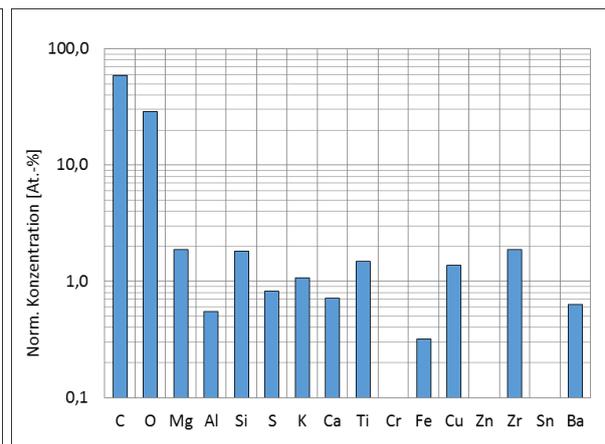


Abbildung 5-5: At.-Konzentration (normiert), bestimmt mittels EDX-Analyse – NAO-kh

Infolge der Eindringtiefe in das Probenmaterial, die bei der energiedispersiven Röntgenspektroskopie vornehmlich bei Partikelgrößenfraktionen < 3 µm vorliegt, ist ein Überstrahlen bzw. Wechselwirken mit dem Volumen des Trägermaterials nicht auszuschließen. Neben hohen Kohlenstoff- und Sauerstoffkonzentrationen weist der ECE-kh erhöhte Konzentrationen an

Magnesium, Aluminium, Chrom, Eisen und Zinn auf. Für den NAO-kh ist Silizium, Schwefel, Kalium, Kalzium, Titan, Kupfer, Zirkonium und Barium nachweisbar. Der ECE-kf ist im Vergleich zum ECE-kh durch einen erhöhten Eisenanteil (Faktor 2 in At.-%) in Form ausgeprägter Eisenspäne sowie Barium und Titan charakterisiert. Der ECE-kh (HMB) weist neben Kupfer zusätzlich Eisen, Chrom und Zinn (Zinnsulfid als fester Schmierstoff zur Reduktion des adhäsiven Verschleißes) auf. Der bereits beschriebene 14-stufige Niederdruck-Kaskadenimpaktor (ELPI) dient zur gröÙenselektiven Fraktionierung über einen Partikelgrößenbereich von 0,006–10 µm. Die mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie detektierten Elementkonzentrationen je Größenfraktion erlauben die Erstellung einer spezifischen Elementverteilung je Beanspruchungsszenario. Die Untersuchungen erfolgen anhand von Testzyklen, welche Realfahrtbedingungen (WLTC) repräsentieren und anhand von Sektionen aus der AK-Master-Prüfprozedur [AKM98]. Aus letzterer dienen die Fadingreihe (Sektion 9) zur Untersuchung hoher thermischer Bedingungen bis 600 °C und die Druckreihen 4.1–4.5 (10 – 80 bar) zur Untersuchung hoher mechanischer Beanspruchungen. Gemäß Abbildung 5-6 bis Abbildung 5-11 können alle in der Reibmatrix enthaltenen Elemente in unterschiedlichen Konzentrationen im partikelförmigen Verschleißprodukt nachgewiesen werden.

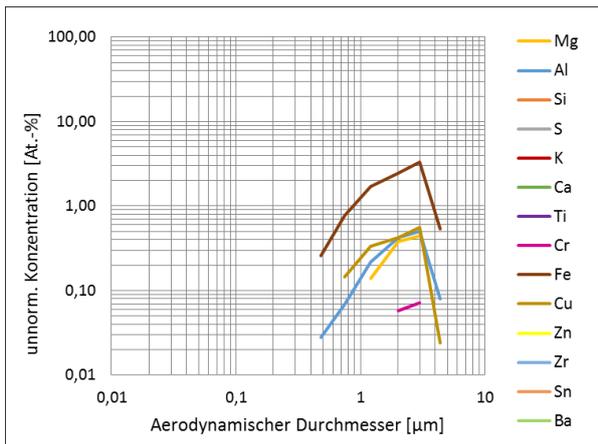


Abbildung 5-6: At.-Konzentration über WLTC (Klasse 3) – ECE-kh

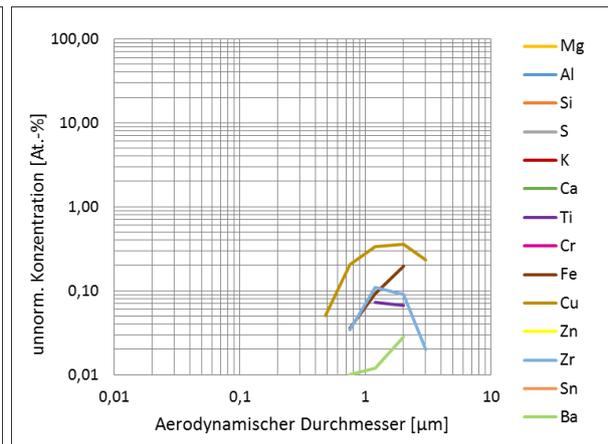


Abbildung 5-7: At.-Konzentration über WLTC (Klasse 3) – NAO-kh

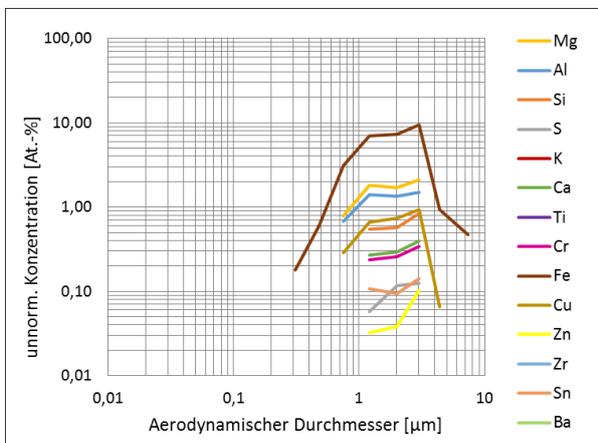


Abbildung 5-8: At.-Konzentration über AK-Master-Druckreihen 4.1–4.5 – ECE-kh

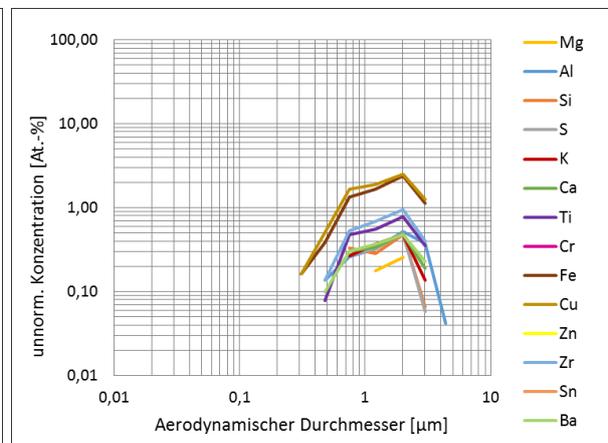


Abbildung 5-9: At.-Konzentration über AK-Master-Druckreihen 4.1–4.5 – NAO-kh

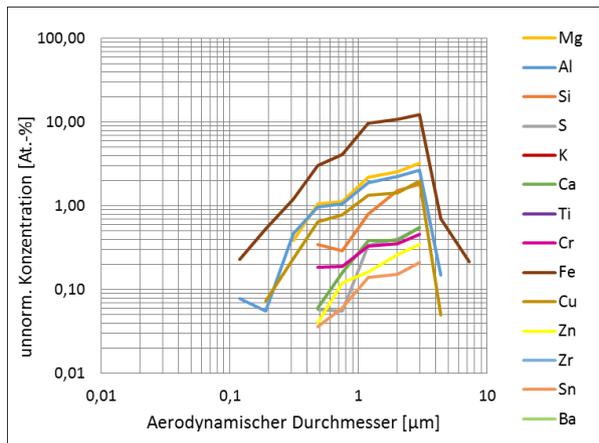


Abbildung 5-10: At.-Konzentration über AK-Master-Fadingreihe – ECE-kh

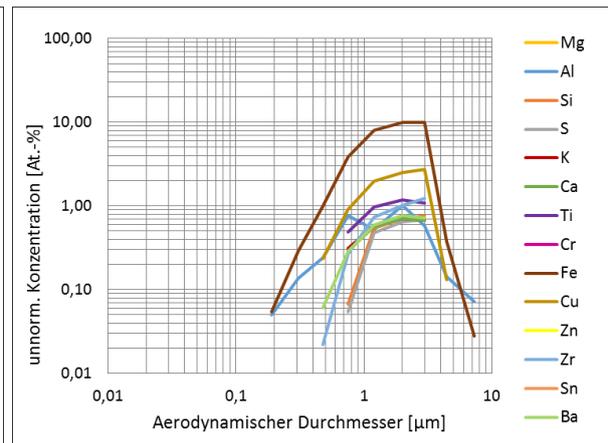


Abbildung 5-11: At.-Konzentration über AK-Master-Fadingreihe – NAO-kh

Es erfolgte keine Normierung oder Korrektur hinsichtlich der tatsächlich analysierten Probenmenge bzw. des Einflusses des Hintergrundes. Die Größenfraktion, in der die Elemente vorliegen, wird nur gering von der vorliegenden Beanspruchung beeinflusst. Die maximalen Elementkonzentrationen können einem Trenndurchmesser d_i von 2–3 μm (ECE-kh) bzw. 1–3 μm (NAO-kh) zugewiesen werden. Für den ECE-kh sind über alle Szenarien relativ erhöhte Eisenkonzentrationen messbar, was dem Verschleißvolumen der Scheibe zuzuweisen ist. Unter Realfahrtbedingungen (vgl. Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7) und höheren Drücken (vgl. Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9) zeigt der NAO-kh Vorteile hinsichtlich des relativen Eisenanteils bzw. des Verschleißvolumens der Scheibe. Die maximale Konzentration an Eisen ist einem Trenndurchmesser von 2,0 μm zuzuweisen und fällt gegenüber dem ECE-kh geringer aus. Über die Druckreihen kann ein nahezu identischer Anteil an Eisen und Kupfer im Verschleißprodukt des NAO-kh nachgewiesen werden. In den Temperaturprofilen (ECE-kh und NAO-kh) als auch den Druckreihen (ECE-kh) übersteigt der relative Eisenanteil des Verschleißproduktes deutlich den der Belagmatrix, was auf ein Verschleißvolumen beider Reibpartner schließen lässt. Auffällig ist, dass im Falle der Temperaturprofile bis 600 $^{\circ}\text{C}$ (Fadingreihe) Eisenkonzentrationen für ECE-kh und NAO-kh ab Trenndurchmesser von 0,1–0,2 μm erfasst werden können, was mit hohen Anzahlkonzentrationen zu verbinden ist. Zudem liegt neben Aluminium- und Magnesiumanteilen ein auffällig hoher Siliziumanteil vor. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Zusammensetzung des Verschleißproduktes sowie die damit korrelierende spezifische Partikeldichte von der vorliegenden Beanspruchung beeinflusst wird. In Abbildung 5-12 sind Partikelfragmente unter Verwendung des ECE-kh (größen selektive Fraktionierung mittels Kaskadenimpaktor; d_i : 3,0 μm) dargestellt. Die Partikel weisen inhomogene Formen und Strukturen auf. Die temporäre Emission von Partikelfragmenten $> 100 \mu\text{m}$ über die AK-Master-Druckreihe 4.5 (200 \rightarrow 170 km/h) ist in Abbildung 5-13 erkennbar (markierter Bereich). Die Erfassung erfolgte mittels Thermografiekamera. Die Spitztemperatur dieser Fragmente beträgt ca. 320 $^{\circ}\text{C}$, wobei die Partikelbildung die Folge tribochemischer Reaktionen (vgl. Abschnitt 2.3.1) ist.

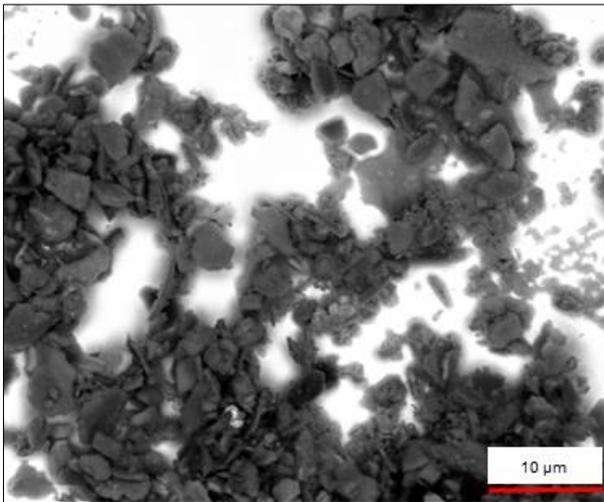


Abbildung 5-12: Partikel (ECE-kh) auf Au-beschichtetem Si-Wafer (1.000-fach); WLTC – d: 3,00 µm

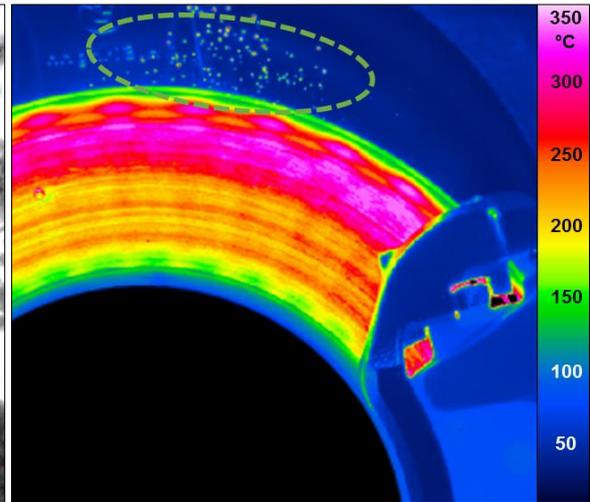


Abbildung 5-13: Thermografieaufnahme und Visualisierung emittierter Partikelfragmente > 100 µm

Abbildung 5-14 (nach WLTC) und Abbildung 5-15 (nach AK-Master-Fadingreihe) stellen REM-Aufnahmen der Reibzone des ECE-kh dar, die bei hohem Temperatureinfluss eine deutlich homogenere Oberflächenstruktur (vgl. Abbildung 5-16; EDX-map) mit stark verteilten Eisen- und Sauerstoffkonzentrationen (Eisenoxid) aufweisen. Wenngleich die Versuche durch unterschiedliche Reibenergien bzw. Reibleistungen gekennzeichnet sind, können charakteristische Bereiche mit erhöhten Konzentrationen an Kupfer, Magnesium und Silizium herausgestellt werden [GRA14, JUS17]. Die Einlaufprozedur der Reibpartner war jeweils identisch.

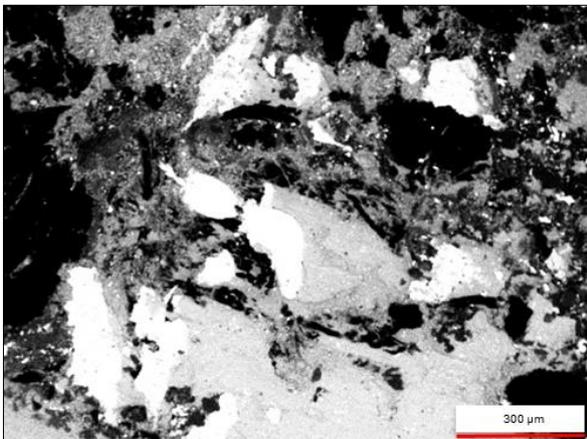


Abbildung 5-14: REM-Aufnahme (100-fach) der Belagmatrix des ECE-kh – nach WLTC

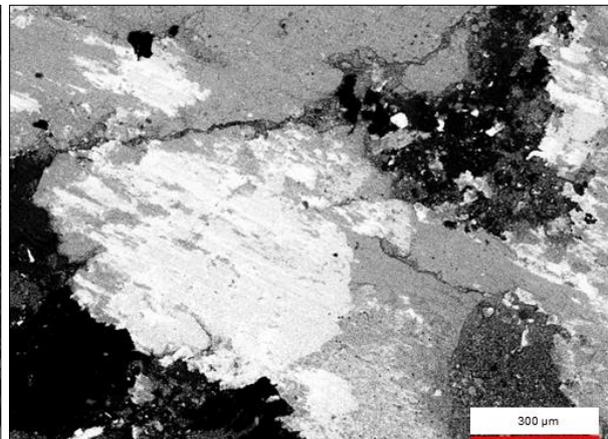


Abbildung 5-15: REM-Aufnahme (100-fach) der Belagmatrix des ECE-kh – nach AK-Master-Fadingreihe

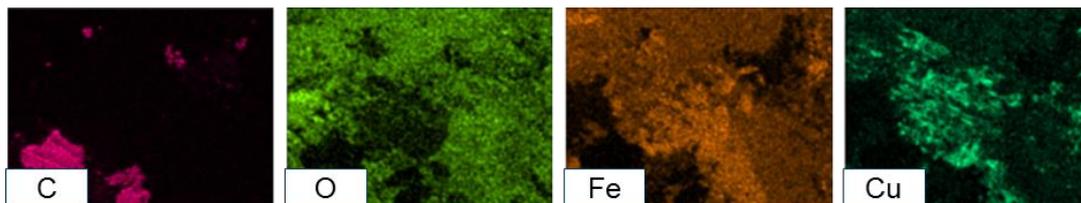


Abbildung 5-16: EDX-map (30-fach) des ECE-kh – nach AK-Master Fadingreihe

Die qualitative Oberflächenanalyse (elementspezifisch), insbesondere zur Detektion von Kohlenstoffverbindungen und Metalloxiden, erfolgt mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie

(engl. X-ray Photoelectron Spectroscopy/XPS). Bei dieser oberflächenintensiven Analyse- methode wird die Probe einer monochromatischen Röntgenstrahlung ($h\nu$) ausgesetzt, wodurch Elektronen im Festkörper angeregt und herausgelöst werden (Probentiefe bis 10 nm). Die kinetische Energie E_{kin} der Photoelektronen ist als Funktion der elementspezifischen Bindungs- energie E_{bin} zu betrachten. Damit lässt sich der Elementnachweis eindeutig führen. Über die Austrittsarbeit $\Phi_{Spektrometer}$ des Spektrometers wird erstere in letztere umgerechnet [TUF18].

$$E_{kin} = h\nu - \Phi_{Spektrometer} - E_{bin} \quad (5.1)$$

Die bei der Quantifizierung der Oberflächenzusammensetzung einer Probe zu bestimmende Intensität wird aus der Fläche unter der Emissionslinie abzüglich des Sekundärelektronenun- tergrundes abgeleitet. Der Hauptanteil des Untergrundes besteht aus Photoelektronen mit ge- ringerer kinetischer Energie infolge von Stoßprozessen und einem Nebenanteil infolge von Bremsstrahlung nichtmonochromatischer Röntgenquellen. Die in Abbildung 5-17 und Abbil- dung 5-18 dargestellten Spektren der Emissionslinien für Kohlenstoff (C1s)- und Sauerstoff- schale (O1s) zeigen im Falle des ECE-kh und WLTC (Trenndurchmesser d_i : 3 μm) vorrangig Kohlenstoffeinfachbindungen (C–C), aber auch Kohlenstoff-Sauerstoff-Doppelbindungen (C=O). Unter hohem Temperatureinfluss können geringe Intensitäten an Kohlenstoff-Sauer- stoff-Einfachbindungen (C–O) in Größenfraktionen $< 0,3 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden.

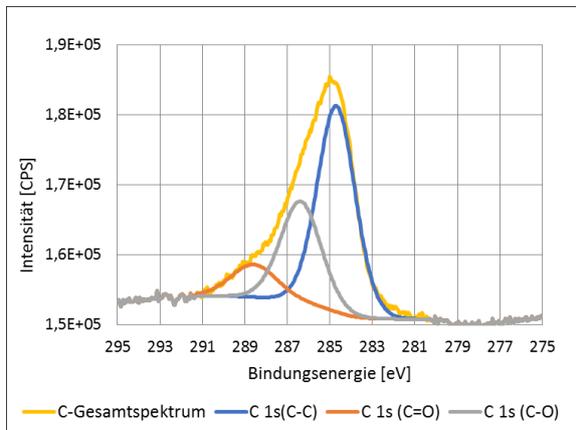


Abbildung 5-17: XPS-Spektren C1s, ECE-kh (WLTC-Zyklus; Klasse 3)

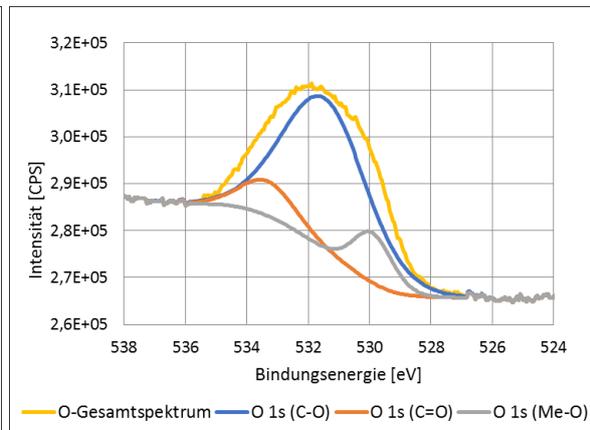


Abbildung 5-18: XPS-Spektren O1s, ECE-kh (WLTC-Zyklus; Klasse 3)

Kohlenstoffeinfachbindungen (vgl. Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20) sind typisch für organischen Kohlenstoff (OC) und im Emissionsprodukt des ECE-kh deutlicher ausgeprägt. Sehr hohe Intensitäten an Kohlenstoff-Sauerstoff-Doppelbindungen, die ebenfalls organischer Spezies zugeordnet werden können, konnten im Bremsstaub des NAO-kh ($< 0,3 \mu\text{m}$) nachgewiesen werden. Zudem zeigt sich in beiden Fällen ein deutlicher Anstieg der Intensität in Größenbereichen um 1–2 μm , wobei ebenso Unterschiede in Abhängigkeit vom Belastungskollektiv ersichtlich sind. Darüber hinaus liegen Metalloxide, insbesondere Eisen (Fe 2p $_{3/2}$) und Kupfer (Cu 2p $_{3/2}$) im oberflächennahen Bereich vor. Auffällig ist, dass Spuren von Kupfer bei niedrigem, speziell jedoch bei hohem Temperatureinfluss (Fade) in Größenfraktionen ab 0,05 μm nachgewiesen werden kann. Eisen liegt in Größenfraktionen ab 0,1 μm (ECE) bzw. 0,5 μm

(NAO) vor. Maximale Intensitäten, insbesondere bezüglich Realfahrtbedingungen (WLTC), liegen vergleichbar zu den EDX-Analysen im Größenbereich 2–3 μm vor.

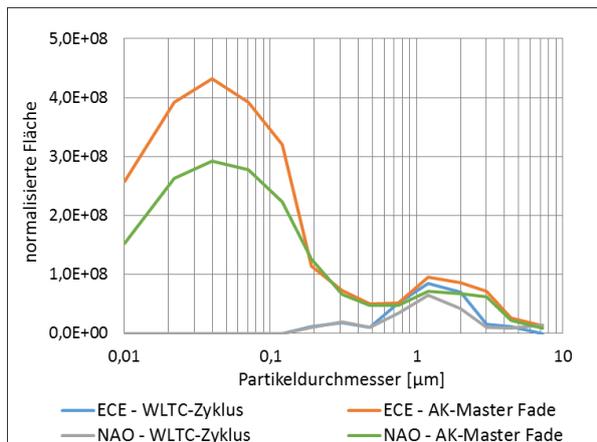


Abbildung 5-19: XPS-Analyse bei variierenden Beanspruchungen (C–C) – normalisierte Fläche

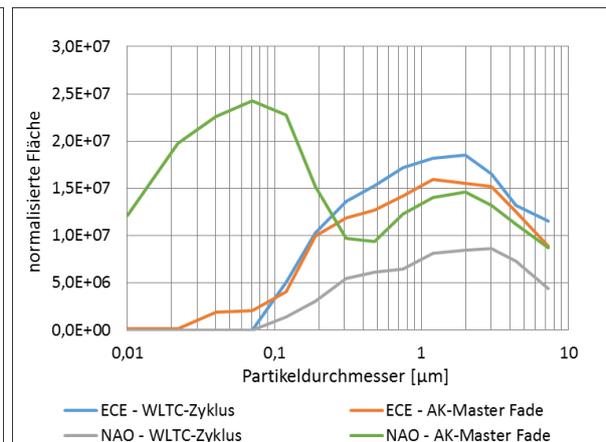


Abbildung 5-20: XPS-Analyse bei variierenden Beanspruchungen C1s (C=O) – normalisierte Fläche

5.2 Bestimmung physikalischer Eigenschaften

In diesem Abschnitt folgt eine Untersuchung zur Messfähigkeit der vornehmlich für den Anwendungsfall verbrennungsmotorischer Abgasemissionen entwickelten Partikelmesssysteme für die Analyse partikelförmiger Bremsenemissionen am Schwungmassen-Bremsenprüfstand (SMP). Das Ziel ist die Untersuchung von Einflussgrößen und Wechselwirkungen am Beispiel unterschiedlicher physikalischer Messprinzipien sowie die Ableitung eines Setups für die Durchführung repräsentativer und reproduzierbarer Messungen. Darüber hinaus werden komplexe Zusammenhänge und Auffälligkeiten vorgestellt, welche bei der Detektion partikelförmiger Bremsenemissionen vorliegen. Die Gestaltung und Auslegung der Probenahmesonden für die Probenahme nach isokinetischen und isoaxialen Bedingungen erfolgte gemäß VDI 2066, EN 13284-1 und EN 16911-1. Die Filterung der Zuluft erfolgt mittels HEPA-Filtern (H13) nach EN 1822. Neben der zeitlichen Gegenüberstellung der Anzahl- und Massenkonzentration werden folgende Emissionskennwerte für den weiteren Verlauf dieser Arbeit definiert:

- Emissionsfaktor (EF): Anzahl/Masse der Partikel je Zykluskilometer ($\#/km$ bzw. mg/km) (verdünnungs- und hintergrundkorrigiert (vgl. Tabelle 7-6)) als Integral der Anzahl- und Massenkonzentration unter Beachtung des Teilvolumens und Evakuierungsstroms
- Emissionskennzahl als Partikelanzahl oder Partikelmasse je Bremsung ($\#/Bremsung$ bzw. $mg/Bremsung$): Gesamtanzahl (verdünnungs- und hintergrundbereinigt) detektierter Partikel bzw. Partikelmasse je Einzelbremsung
- Größenverteilungsdichte bzw. größen aufgelöste Anzahlkonzentration: Partikel eines zu messenden Äquivalentdurchmessers unterteilt in definierte Klassen

Je Kennwert erfolgt die Skalierung des analysierten Teilvolumens (Teilstromentnahme gemäß Abschnitt 4 an Messposition 3) auf das gesamte evakuierte Volumen. Die korrekte Skalierung des mittels Partikelmesssystem (Anzahl/Masse) analysierten Teilvolumens wird neben der

Transporteffizienz vom spezifischen Uniformitätsindex beeinflusst. Gemäß der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Ergebnisse zur Partikelverteilung ist unter Verwendung eines stationären Probenahmesystems von einem anzahlbezogenen Uniformitätsindex $\leq 6\%$ an Messposition 3 auszugehen. Der kalkulierte Wert eines Emissionsfaktors ist damit durch einen geringen, jedoch akzeptablen Grad an Unschärfe charakterisiert. Es ist anzumerken, dass über den weiteren Verlauf dieser Arbeit die angegebenen Emissionskennzahlen das Emissionsverhalten einer (Vorderachs-) Bremse wiedergeben. Es erfolgt keine Abschätzung über Emissionsfaktoren des Gesamtfahrzeuges. Dies erfordert zusätzlich die Bestimmung des Emissionsverhaltens einer Hinterradbremse unter Berücksichtigung der VA/HA-Bremskraftanteile (BKV). Die Untersuchungen erfolgen einerseits anhand des WLTC (Klasse 3) und des JRC-novel cycle (auch WLTP brake cycle), welche bezüglich Temperatur, Rotationsgeschwindigkeit und Flächenpressung einen Direktbezug zu Realfahrtbedingungen darstellen. Eine Gegenüberstellung erfolgt in Tabelle 5-1, wobei zur Berechnung der je Zyklus umgesetzten Reibenergie für die in diesem Abschnitt verwendete Einkolben-Schwimmsattelbremse (Bremse 1) ein Trägheitsmoment von $73,33 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ und ein Bremskraftanteil (VA) von $68,3\%$ berücksichtigt wird. Der JRC-novel cycle ist durch die PMP-Task Force 1 auf Grundlage der WLTP-Datenbasis entwickelt [MAT18]. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich auf die Sektion 10, welche durch höchste Fahrgeschwindigkeiten (bis 132 km/h) und Peak-Konzentrationen charakterisiert ist. Aufbauend auf den chemisch-physikalischen Untersuchungen dienen die AK-Master-Druckreihen (4.1–4.5) und -Fadingreihe (sek. 9) zur Bewertung der Messfähigkeit unter hohem Temperatur- und Bremsdruckeinfluss.

Tabelle 5-1: Parametrisierung WLTC und JRC-novel cycle (sek. 10) [MAT18]

	Mittl. Verzögerung [m/s^2]	Zeit [s]	Distanz [km]	Bremsenergie je Zyklus [kJ]
WLTC (Klasse 3)	0,45	1.800	23,262	2.230
JRC-novel cycle (sek. 10)	1,00	5.272	64,8	3.533

5.2.1 Messung der Partikelanzahlkonzentration

Kondensationspartikelzähler (CPC) stellen in Bezug auf Sensitivität, Reaktionszeit und Zähl-effizienz die Referenz zur Bestimmung einer Partikelanzahlkonzentration ($\#/ \text{cm}^3$) dar. Das messprinzipbedingte Aufkondensieren geht mit einem Verlust der Größeninformation einher, weshalb zur Bestimmung einer größen aufgelösten Anzahlkonzentration auf elektrisch basierte Messsysteme zurückzugreifen ist. In diesem Abschnitt werden optische und elektrisch basierte Messsysteme vergleichend bewertet, Zusammenhänge herausgearbeitet und ein Setup für die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Vergleichsuntersuchungen definiert. Darüber hinaus werden vergleichende Untersuchungen zum Einfluss des kalibrierten Cut-off-Durchmessers (d_{50}) von $2,5 \text{ nm}$, 10 nm (post EURO 6) und 23 nm (Euro 6) gemäß Kalibrierung nach ISO 27891, der Verdünnungsrate des Aerosols und der thermischen Vorkonditionierung in den

Gesamtvergleich integriert. Die Eigenschaften der verwendeten Messsysteme sind Tabelle 5-2 zu entnehmen. Die Bereitstellung der Probe erfolgt unter Verwendung eines Konstantvolumen-Probenahmesystems gemäß des in Abbildung 5-21 dargestellten Versuchsaufbaus als Teilstromentnahme, wodurch eine robuste und reproduzierbare Probenahme sowie ein konstantes Verdünnungsverhältnis über den Testzyklus gewährleistet wird.

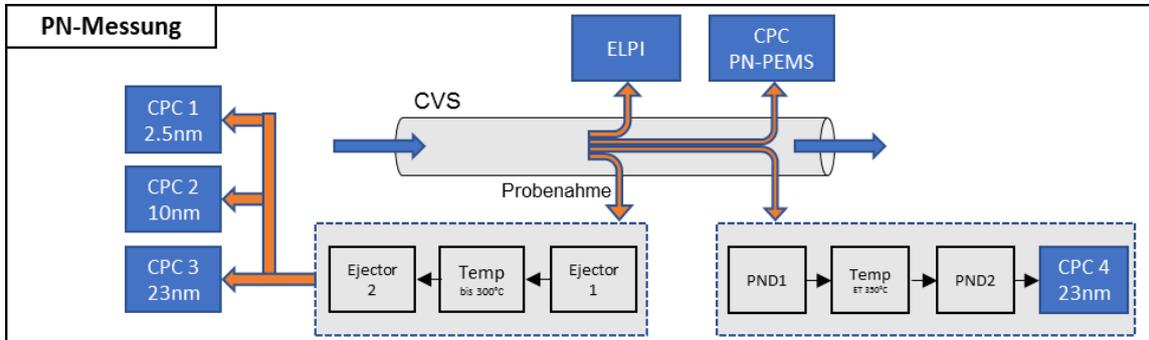


Abbildung 5-21: Messsetup PN-Messung und Verifizierung von Messtechnik

Die Probenahme erfolgt jeweils isokinetisch, wobei zur parallelen Messung der CPC ein Flussteiler zur Anwendung kommt. Abgeleitet aus der Reglementierung verbrennungsmotorischer Abgasemissionen (UN/ECE R83) stellt ein 23 nm-CPC (CPC 3) zur Detektion der non-volatilen Partikelkonzentration (Festkörperpartikel) den Bezug zum vorgeschriebenen Partikelgrößenbereich dar. Die Zähleffizienz beträgt $50\% \pm 12\%$ bei 23 nm (d_{50}) bzw. $> 90\%$ bei 41 nm. Zudem kommt ein 2,5 nm-CPC (CPC 1) und ein 10 nm-CPC (CPC 2) zur Anwendung, wodurch der Einfluss des CPC Cut-offs unter variierenden Prüfbedingungen bewertet werden kann. Auf die Verwendung eines Vorabscheiders (Zyklon) wird verzichtet.

Tabelle 5-2: Eigenschaften der verwendeten Partikelmesssysteme

	Messbarer Größenbereich [μm]	Max. Konzentration [$\#/\text{cm}^3$]	Sample flow [l/min]	Verdünnungsfaktor (intern) [-]
CPC 1	0,0025 (d_{50}) - >3	$3\text{E}+05$	1,5	-
CPC 2	0,010 (d_{50}) - >3	$1\text{E}+04$	1	-
CPC 3	0,023 (d_{50}) - >3	$1\text{E}+04$	1	-
CPC 4	0,023 (d_{50}) - $>2,5$	$1\text{E}+06$	6	100
PN-PEMS	0,010 (d_{50}) - >1	$1\text{E}+05$	2,5	10

Zur Erweiterung des Messbereiches kommt temporär eine Sekundärverdünnung aus zwei Injektorverdünnern zur Anwendung. Zusätzlich wird auf einen 23 nm-CPC (CPC 4) zurückgegriffen, welcher gemäß UN/ECE R83 zwei vorgeschaltete Verdünnungsstufen (PND1/2), eine beheizte Evaporation tube ($350\text{ }^\circ\text{C}$) zur Abscheidung volatiler Bestandteile (volatile particle remover) sowie einen vorgeschalteten Zyklon zur Abscheidung von Partikeln $> 2,5\ \mu\text{m}$ aufweist. Für die in Abschnitt 7.1 vorgestellten Fahrversuche zur Bestimmung realer Emissionsfaktoren kommt ein mobiles CPC (PN-PEMS) auf Isopropanol-Basis zur Anwendung. Die Linearität je CPC beträgt $> 95\%$ für die angegebenen Konzentrationsbereiche. Der bereits in Abschnitt 4.1.3 und 4.2.1 beschriebene elektrische Niederdruck-Kaskadenimpaktor (ELPI)

dient zur Bestimmung einer größen aufgelösten Anzahlkonzentration. Die Berechnung, basierend auf der elektrischen Mobilität, erfolgt unter Vorgabe einer spezifischen Partikeldichte. In der Realität ist je nach Zusammensetzung der Reibpartner und der Prüfbedingungen von einer Änderung der chemisch-physikalischen Partikeleigenschaften (besonders unter erhöhter Beanspruchung) auszugehen. Aus einer Änderung der spezifischen Partikeldichte folgt gemäß Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23 eine Änderung der Größenverteilung (elektrische Mobilität) und des kalkulierten CMDs. Zudem folgt aus einer Erhöhung der spezifischen Partikeldichte (z. B. 5 g/cm³) eine Zunahme der kalkulierten Anzahlkonzentration, was die universelle Anwendbarkeit dieser Methode in Frage stellt [MAM19]. Für eine korrekte Bestimmung sind demnach möglichst exakte Daten über die spezifischen Partikeleigenschaften erforderlich.

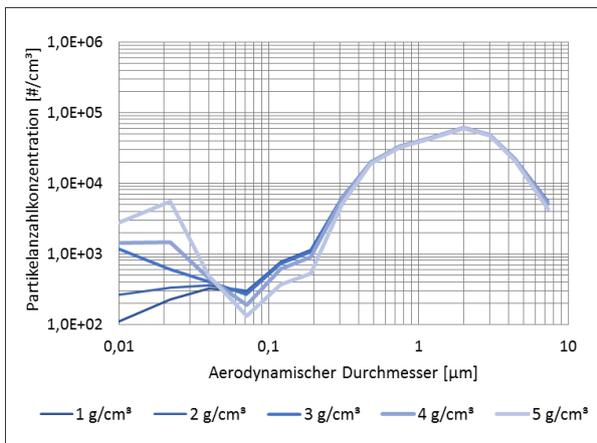


Abbildung 5-22: Kalk. Größenverteilung unter Variation der Partikeldichte (120 → 80 km/h, 30 bar) – ECE-kh

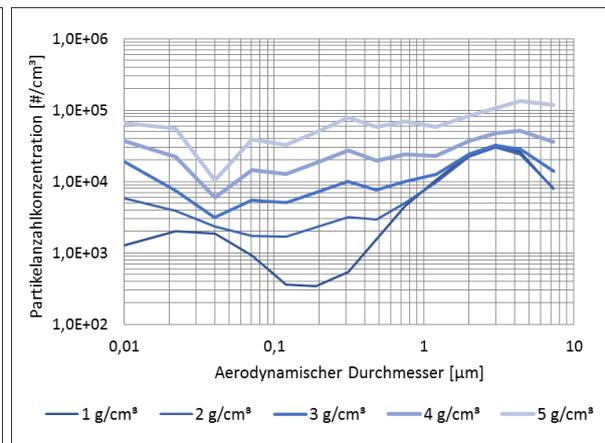


Abbildung 5-23: Kalk. Größenverteilung unter Variation der Partikeldichte (AK-Master-Fade) – ECE-kh

Damit im Rahmen dieser Arbeit dennoch von einer einheitlichen Datenbasis ausgegangen werden kann, bleibt eine dynamische Änderung der Partikeldichte bei der Kalkulation einer größen aufgelösten Anzahlkonzentration unberücksichtigt. Die Datenkalkulation basiert auf dem aerodynamischen Durchmesser (Normdichte: 1 g/cm³) und ermöglicht damit einen Direktbezug zu den Feinstaubklassen [SAN03, MAM19]. Gemäß der in Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25 dargestellten Temperaturverläufe über den WLTC und JRC-novel cycle (Sek. 10) liegen die Spitzentemperaturen in Sektionen erhöhter Geschwindigkeit bzw. Reibenergie vor.

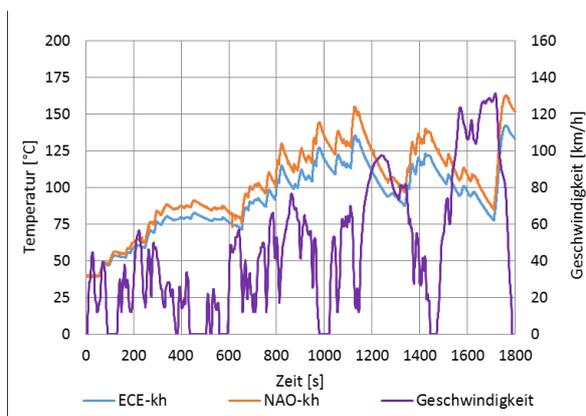


Abbildung 5-24: Temperaturverlauf WLTC (Klasse 3); ECE-kh und NAO-kh

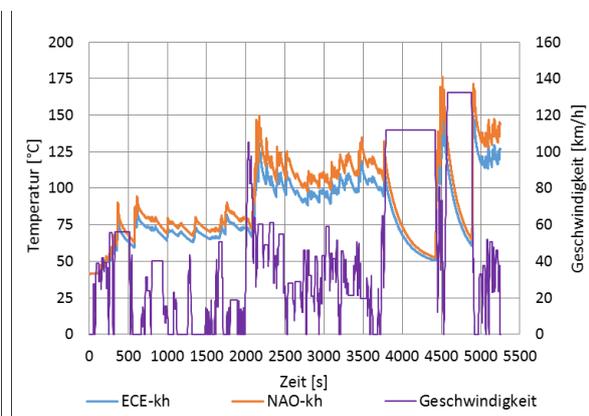


Abbildung 5-25: Temperaturverlauf JRC-novel cycle (Sektion 10); ECE-kh und NAO-kh

Unter Verwendung des NAO-kh ist ein höheres Temperaturniveau gegenüber dem ECE-kh messbar, wobei die Abweichung bis zu 28 °C (WLTC) beträgt. In Abbildung 5-26 sind Anzahlkonzentrationsverläufe über JRC-novel cycle, erfasst mittels 23 nm-CPC, und ELPI am Beispiel des ECE-kh gegenübergestellt. Die Hintergrundkonzentration beträgt etwa 30 #/cm³, welche von der Dichtheit des Systems und der Filtereffizienz beeinflusst wird.

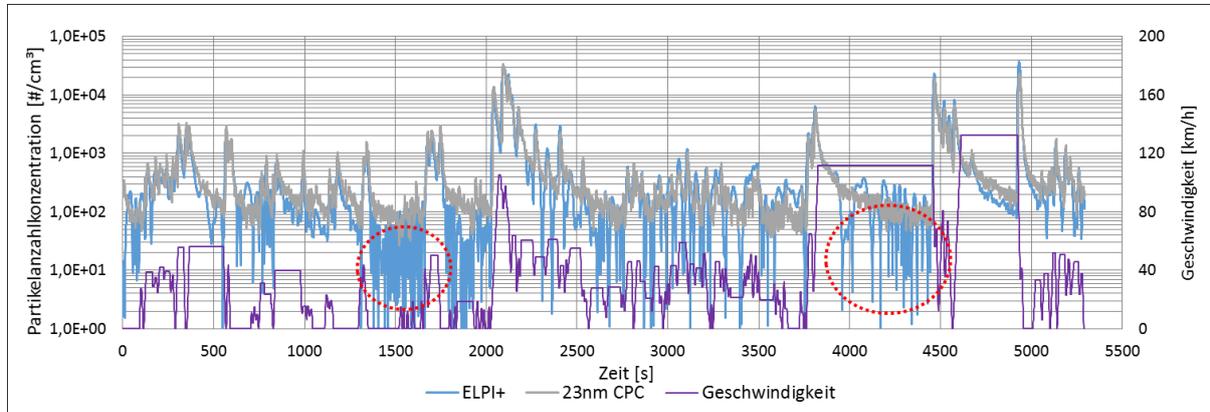


Abbildung 5-26: Partikelanzahlkonzentration 23 nm-CPC vs. ELPI (JRC-novel cycle) – ECE-kh

Die verdünnungskorrigierten Spitzenkonzentrationen betragen 1,5E+04 #/cm³ (WLTC) bzw. 5E+04 #/cm³ (JRC). Unter Beachtung des Single count mode folgt hieraus die Notwendigkeit zur Verdünnung vor Einlass in die Zähleinheit (minimaler Gesamtverdünnungsfaktor: 10). Der Konzentrationsvergleich zeigt die messprinzipbedingte hohe Messgenauigkeit des Kondensationspartikelzählers bis zu niedrigsten Anzahlkonzentrationen. Der Einfluss von Partikel-Partikel-Interaktionen (z. B. Koagulation) ist unter den untersuchten Realfahrtbedingungen (WLTP-Datenbasis) als gering zu klassifizieren. Der Vergleich mit dem elektrisch basierten Messsystem verdeutlicht messprinzipbedingte Abweichungen für Konzentrationen $\leq 5E+02$ #/cm³ (Abbildung 5-26: rote Markierung). Diese Anzahlkonzentrationen sind typisch für Stillstand- und Rollphasen sowie Bremsungen mit geringen Initialgeschwindigkeiten (≤ 30 km/h). Insgesamt ist gemäß Abbildung 5-27 und Abbildung 5-28 ein hoher Grad an Linearität nachweisbar.

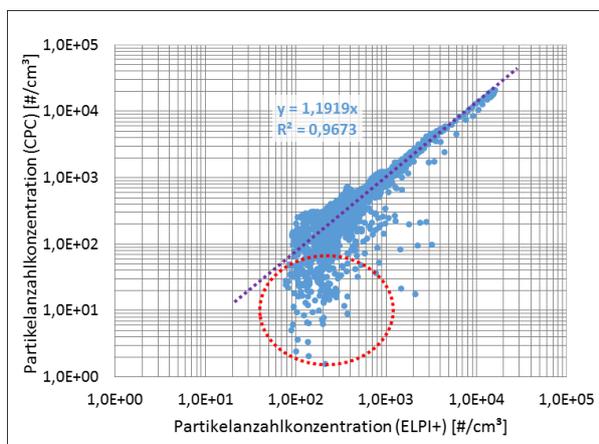


Abbildung 5-27: Linearität 23 nm-CPC vs. ELPI (WLTC – Klasse 3) – ECE-kh

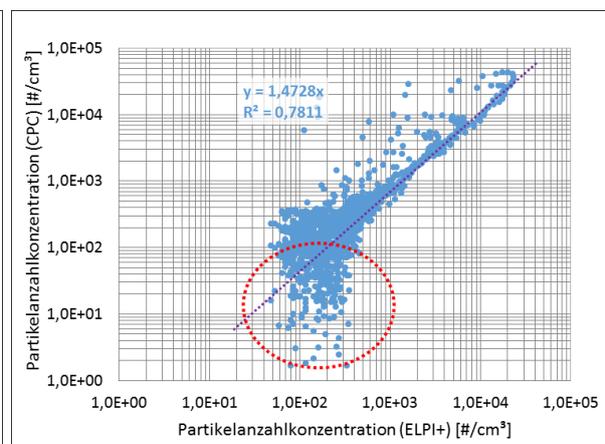


Abbildung 5-28: Linearität 23 nm-CPC vs. ELPI (JRC-novel cycle; sek. 10) – ECE-kh

Auffällig ist, dass die Linearität über den JRC-novel cycle geringer ausfällt, was durch erhöhte Zeitbereiche ohne Bremsenaktuierung und daraus resultierenden Konzentrationen

$\leq 5E+02 \text{ \#/cm}^3$ folgt. Gemäß der in Abschnitt 5.1 vorgestellten mikroskopischen Untersuchungen, können minimale Partikeldurchmesser von $0,2 \text{ \mu m}$ unter Verwendung des ECE-kh nachgewiesen werden. Demnach zeigt der Vergleich unterschiedlich kalibrierter CPC Cut-offs (vgl. Abbildung 5-29 und Abbildung 5-30) ohne thermische Vorkonditionierung (total PN) über den WLTC und JRC-novel cycle (Sektion 10) keine signifikanten Unterschiede. Es liegt ein hoher Grad an Linearität vor. Das $2,5 \text{ nm-CPC}$ ($4,2 \%$ im Vergleich zum 23 nm-CPC) detektiert eine leicht erhöhte Konzentration, wobei R^2 je Zyklus- und CPC-Vergleich grundsätzlich $> 0,99$ ist. Der Unterschied zwischen $2,5 \text{ nm-CPC}$ und 10 nm-CPC beträgt ca. $2,2 \%$. Die Unterschiede zwischen den unterschiedlich kalibrierten CPC sind folglich als gering zu klassifizieren. Neben geometrischen Einflüssen im Aufbau des CPC ist bei identischer Leitungslänge der Einfluss der Probenflussteilung mittels Flow-splitter bei teils unterschiedlichen Flussraten je CPC als Erklärung anzunehmen. Insgesamt ist zu bestätigen, dass unter den analysierten Realfahrtbedingungen kein nennenswerter Anteil an Partikeln $\leq 23 \text{ nm}$ emittiert wird.

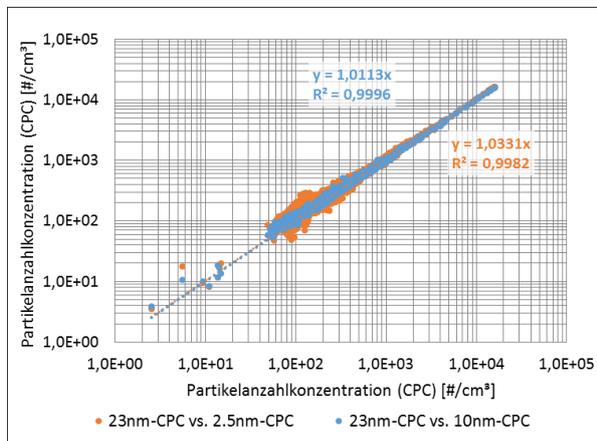


Abbildung 5-29: Linearität CPC (2,5 nm, 10 nm und 23 nm) WLTC-cycle (Klasse 3) – ECE-kh

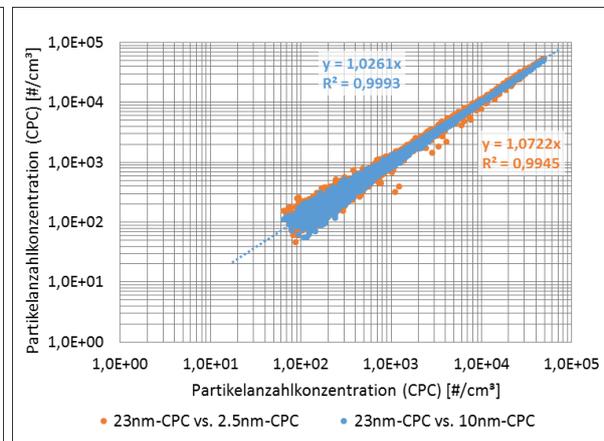


Abbildung 5-30: Linearität CPC (2,5 nm, 10 nm und 23 nm) JRC-novel cycle (sek. 10) – ECE-kh

Die mit der Rotationsgeschwindigkeit korrelierende Reibenergie bewirkt im Falle eines Anstieges eine Zunahme der Verschleißrate und der resultierenden Anzahlkonzentration. Der in Abbildung 5-31 dargestellte Konzentrationsverlauf über 8 Einzelbremsungen der Druckreihe 4.5 ($200 \rightarrow 170 \text{ km/h}$; $10\text{--}80 \text{ bar}$) verdeutlicht eine Überhöhung der vom $2,5 \text{ nm-CPC}$ und 10 nm-CPC detektierten Konzentration im Vergleich zum Messwert des 23 nm-CPC . Diese Konzentrationsunterschiede resultieren aus lokalen Spitzentemperaturen innerhalb der Reibzone, wobei durch Überschreiten einer kritischen Temperaturschwelle eine Änderung der Partikeleigenschaften und der Größenverteilung folgt. Eine bimodale Verteilung ist demnach als Charakteristikum für die Konzentrationsüberhöhungen zu definieren, welche insgesamt dem volatilen Spektrum zuzuordnen sind. Eine ausführliche Beschreibung zum Einfluss der Temperatur folgt in Abschnitt 5.2.2. Das $2,5 \text{ nm-CPC}$ detektiert eine verdünnungskorrigierte Anzahlkonzentration von bis zu $2E+06 \text{ \#/cm}^3$ (80 bar), das 10 nm-CPC bis zu $8E+05 \text{ \#/cm}^3$ und das 23 nm-CPC bis zu $2E+05 \text{ \#/cm}^3$ (vgl. Abbildung 5-31: grüne Markierung).

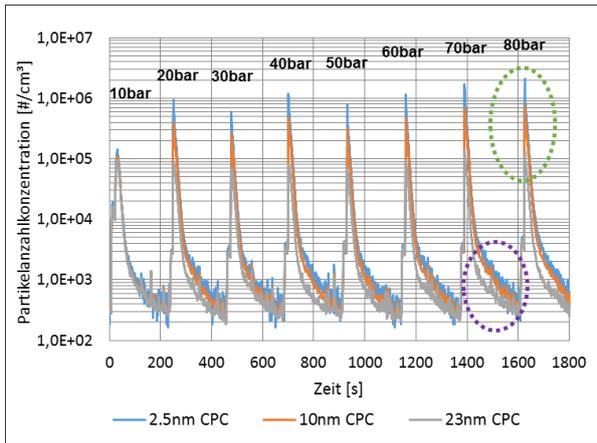


Abbildung 5-31: Anzahlkonzentration CPC (2,5, 10 und 23 nm) über Druckreihe 4.5 (200 → 170 km/h) – ECE-kh

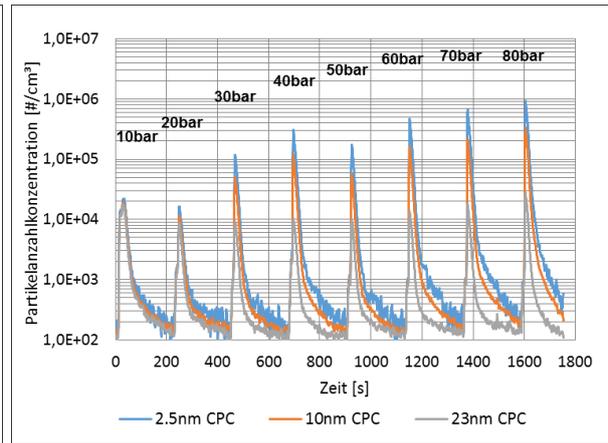


Abbildung 5-32: Anzahlkonzentration CPC (2,5, 10 und 23 nm) über Druckreihe 4.5 (200 → 170 km/h) – NAO-kh

Darüber hinaus sind die Konzentrationsüberhöhungen dynamisch und auch über den Zeitraum des Überschreitens der kritischen Temperaturschwelle hinaus messbar. Das 2,5 nm-CPC besitzt eine Anstiegszeit T90 von < 0,8 s bei 1,5 l/min und detektiert innerhalb von 2 s einen Konzentrationsanstieg um den Faktor 420 (5,0E+03 #/cm³ → 2,1E+06 #/cm³), was durch die Partikelverweilzeit (vgl. Abschnitt 4.1) bestimmt wird und nicht der realen Emissionscharakteristik entspricht. Im Falle des NAO-kh ist die Abweichung zwischen den CPC noch deutlicher ausgeprägt. Das 2,5 nm-CPC detektiert bei 80 bar eine temporär um den Faktor 30 höhere Konzentration gegenüber dem 23 nm-CPC (Vergleich ECE-kh: Faktor 13). Unter Verwendung des NAO-kh resultiert demnach ein erhöhtes Potenzial zur Partikelbildung < 23 nm, was primär auf das Verdampfen organischer Bestandteile (z. B. Phenolharze aus Bindemitteln) zurückzuführen ist und in Abschnitt 5.2.2 näher beschrieben wird. Aus dem Vergleich der Konzentrationsprofile leitet sich die Notwendigkeit zur Vorverdünnung des Aerosols mit einem Gesamtverdünnungsfaktor ≥ 100 ab. Dazu ist in Abbildung 5-33 und Abbildung 5-34 die Partikelanzahl je Bremsung (ECE-kh), erfasst mittels 2,5 nm-CPC und 23 nm-CPC, gegenübergestellt.

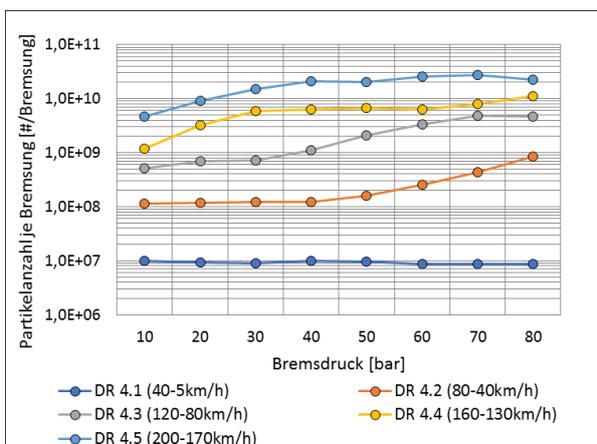


Abbildung 5-33: Emissionskennzahl Druckreihen 4.1–4.5, erfasst mittels 2,5 nm-CPC – ECE-kh

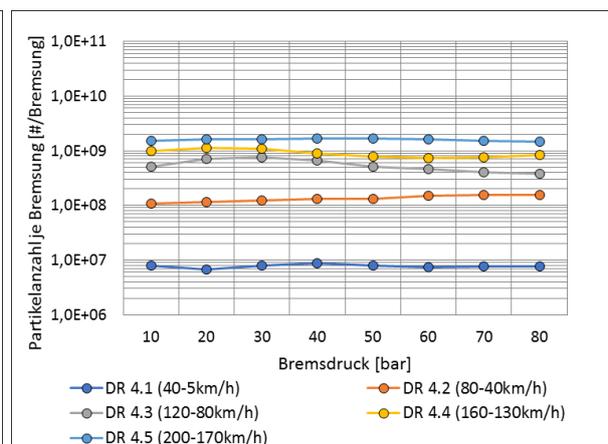


Abbildung 5-34: Emissionskennzahl Druckreihen 4.1–4.5, erfasst mittels 23 nm-CPC – ECE-kh

Im Falle der Druckreihe 4.2 (80 → 40 km/h) ist für Bremsdrücke ≥ 50 bar eine Konzentrationsüberhöhung erkennbar. Diese nimmt in Korrelation mit der Rotationsgeschwindigkeit und dem

Bremsdruck zu und erreicht bei höchster Beanspruchung ein Maximum. Detektiert das 2,5 nm-CPC im Falle der Druckreihe 4.2 und 80 bar eine um den Faktor 4 erhöhte Emissionskennzahl, beträgt der Unterschied für Druckreihe 4.5 und 70 bar bereits Faktor 20. Insgesamt zeigt sich bei einer linearen Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit eine Erhöhung des Emissionsfaktors um Faktor 5–20 (DR 4.1 → DR 4.5), wobei unter Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit der Intensitätsanstieg abnimmt. Aus den mittels 23 nm-CPC detektierten Emissionskennzahlen ist eine schwache Abhängigkeit vom Bremsdruck abzuleiten.

Aus dem Direktvergleich der verwendeten CPC mit dem elektrisch basierten Messsystem (vgl. Abbildung 5-35 und Abbildung 5-36) ist der höchste Grad an Linearität zwischen ELPI und 23 nm-CPC abzuleiten, was durch ein Bestimmtheitsmaß R^2 von bis zu 0,9914 (NAO-kh) bestätigt wird. Die Linearität ist am Beispiel des NAO-kh im Vergleich zum ECE-kh höher, was durch einen homogenen Verschleißprozess infolge einer homogenen Belagzusammensetzung zu erklären ist. Weiterführende Untersuchungen folgen in Abschnitt 6.2.

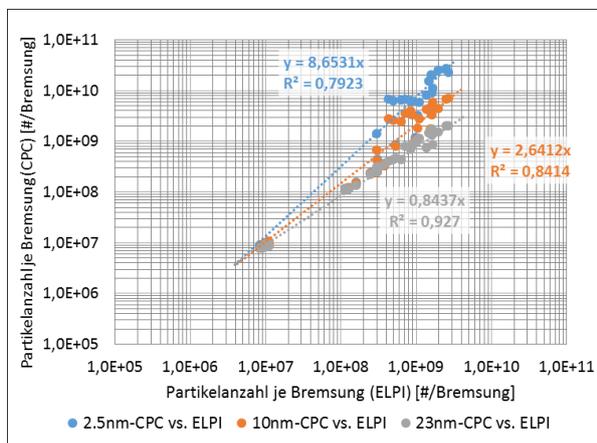


Abbildung 5-35: Linearität CPC (2,5 nm, 10 nm und 23 nm) vs. ELPI über Druckreihen 4.1–4.5 – ECE-kh

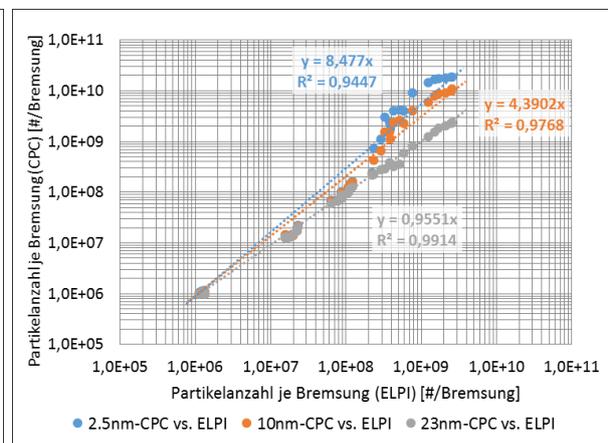


Abbildung 5-36: Linearität CPC (2,5 nm, 10 nm und 23 nm) vs. ELPI über Druckreihen 4.1–4.5 – NAO-kh

Neben dem Vergleich stationärer Messsysteme folgt ein Vergleich zwischen 10 nm-CPC (stationär) und mobilem PN-PEMS (jeweils $R^2 > 95\%$), welches für die Bestimmung von Emissionsfaktoren im realen Fahrversuch (vgl. Abschnitt 7.1) zur Anwendung kommt. Gemäß Abbildung 5-37 ist für den WLTC ein deutlich erhöhter Grad an Linearität messbar ($R^2 = 0,9839$). Aus dem Vergleich der 10 nm-CPCs geht über den WLTC und die AK-Master-Druckreihen ein hoher Grad an Linearität hervor und aus dem Vergleich mit dem 2,5 nm-CPC die bereits beschriebenen Abhängigkeiten. Untersuchungen zur Messfähigkeit optischer und elektrisch basierter Messsysteme über einen Temperaturbereich von bis zu 600 °C erfolgen anhand der AK-Master-Fadingreihe. Die daraus resultierenden Konzentrationsverläufe sind in Abbildung 5-39 und Abbildung 5-40 gegenübergestellt (Abbildung 5-43 stellt den Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur dar). Die vom elektrisch basierten Messsystem (ELPI) detektierte Anzahlkonzentration korreliert auch unter höchstem Temperatureinfluss mit dem Messsignal des 23 nm-CPCs. Das 2,5 nm-CPC und 10 nm-CPC detektieren ab Temperaturen $> 400\text{ °C}$ eine um bis zu Faktor 100 erhöhte Konzentration gegenüber dem 23 nm-CPC (non-

volatile Fraktion). Weiterhin dient die AK-Master-Fadingreihe zur Bewertung des Einflusses der thermischen Vorkonditionierung auf die detektierte Anzahlkonzentration. Aufbauend auf dem in Abbildung 5-21 vorgestellten Setup werden zwei 23 nm-CPCs parallel betrieben, wobei jeweils eines mit einer vorgeschalteten vpr (CPC4) ausgestattet ist.

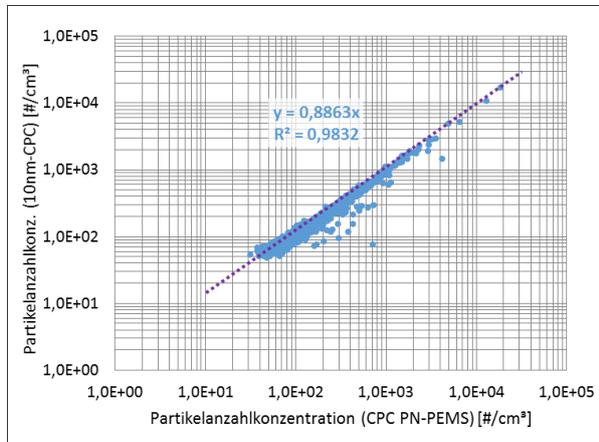


Abbildung 5-37: Linearität stationäres CPC (10 nm) vs. mobiles CPC (PN-PEMS, 10 nm) – WLTC (ECE-kh)

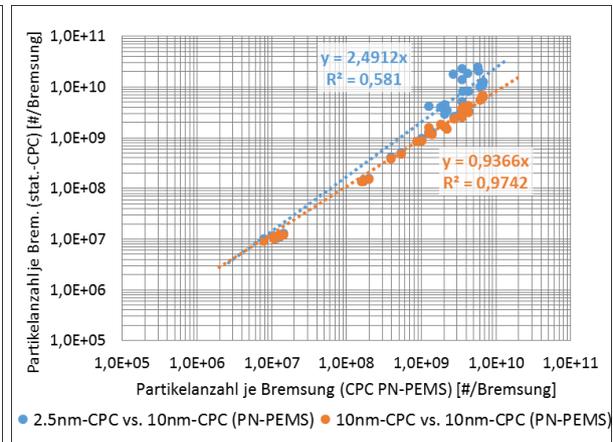


Abbildung 5-38: Linearität stat. CPC (2,5 und 10 nm) vs. mobiles CPC (PN-PEMS, 10 nm) – DR 4.1–4.5 (ECE-kh)

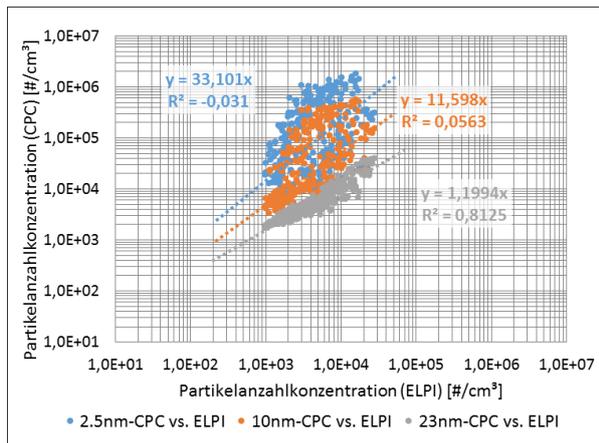


Abbildung 5-39: Linearität CPC (2,5 nm, 10 nm und 23 nm) vs. ELPI über AK-Master-Fade (Sek. 9) – ECE-kh

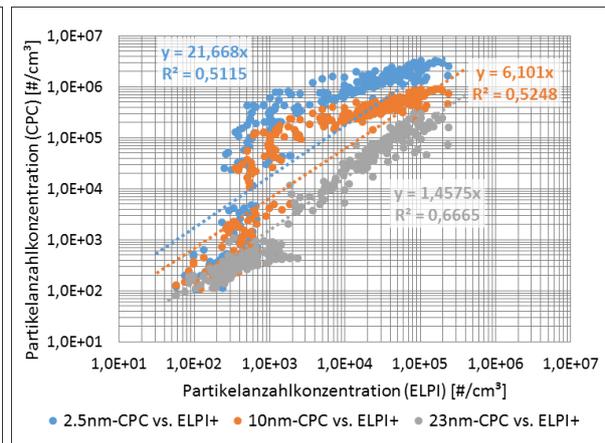


Abbildung 5-40: Linearität CPC (2,5 nm, 10 nm und 23 nm) vs. ELPI über AK-Master-Fade (Sek. 9) – NAO-kh

Diese besteht aus einer ersten Verdünnungsstufe PND1, einem auf 350 °C temperierten Verdampfungsrohr (engl. evaporation tube/ET) sowie einer zweiten Verdünnungsstufe PND2. Aus dem Vergleich der 23 nm-CPC (vgl. Abbildung 5-41 und Abbildung 5-42) sind ausgeprägte nichtlineare Verläufe erkennbar. Demnach detektiert das 23 nm-CPC ohne vorgeschaltete ET temporär, d. h. in den rot markierten Bereichen eine erhöhte Konzentration. Gemäß des in Abbildung 5-43 dargestellten Temperaturverlaufes treten diese Konzentrationsüberhöhungen ab Temperaturen ≥ 350 °C auf, was oberhalb der Arbeitstemperatur der ET liegt. Damit ist festzuhalten, dass durch die thermische Konditionierung mittels Verdampfungsrohres Bestandteile des ultrafeinen Spektrums aus dem Aerosol eliminiert werden können, wobei die Abscheideeffizienz für Temperaturbereiche $\gg 350$ °C (oberhalb der Arbeitstemperatur der ET) mit zunehmender Temperatur kontinuierlich abnimmt.

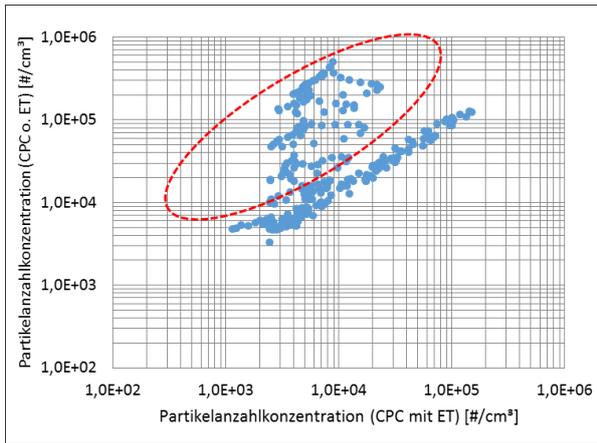


Abbildung 5-41: Linearität 23 nm-CPC mit/ohne Evaporation tube 350 °C über AK-Master-Fade (Sek. 9) – ECE-kh

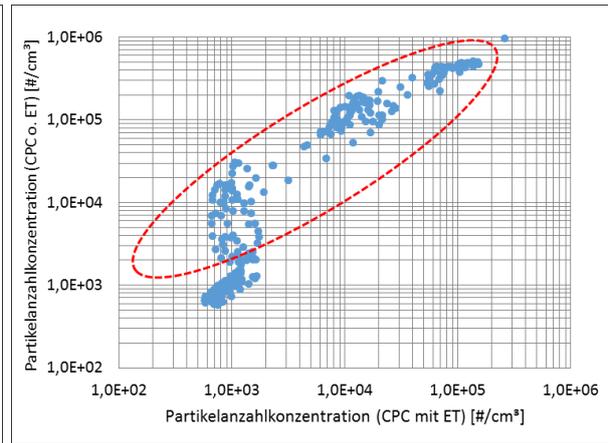


Abbildung 5-42: Linearität 23 nm-CPC mit/ohne Evaporation tube 350 °C über AK-Master-Fade (Sek. 9) – NAO-kh

5.2.2 Einfluss der Temperatur auf die Bildung nanoskaliger Partikel

Auf Grundlage der in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Korrelationen zwischen Reibzonentemperatur und Partikelbildung des ultrafeinen Spektrums folgt eine Analyse zu kritischen Schwellentemperaturen, wobei die Nutzung einer evaporation tube ausbleibt. Aus Abbildung 5-43 (ECE-kh) ist der Einfluss der Reibzonentemperatur auf die Partikelbildung am Beispiel der AK-Master-Fadingreihe abzuleiten. Für die verwendeten CPC mit unterschiedlich kalibriertem Cut-off (d_{50}) ist für Temperaturen > 170 °C (Schwelle 1) ein differenziertes Konzentrationsniveau erkennbar. Detektiert das 23 nm-CPC bei Bremsung 2 ($t = 22$ s) eine maximale verdünnungskorrigierte Anzahlkonzentration von ca. $4E+04$ $\#/cm^3$, ist gleichzeitig die vom 2,5 nm-CPC detektierte Anzahlkonzentration um den Faktor 9 (ca. $3,5E+05$ $\#/cm^3$) erhöht. Unter weiterer Temperaturzunahme folgt eine Reduktion der Anzahlkonzentration, wobei ab ca. 500 °C (Schwelle 2) ein erneuter Anstieg (2,5 nm-CPC und 10 nm-CPC) vorliegt. Die vom 23 nm-CPC detektierte Konzentration verläuft etwa auf einem konstanten Niveau.

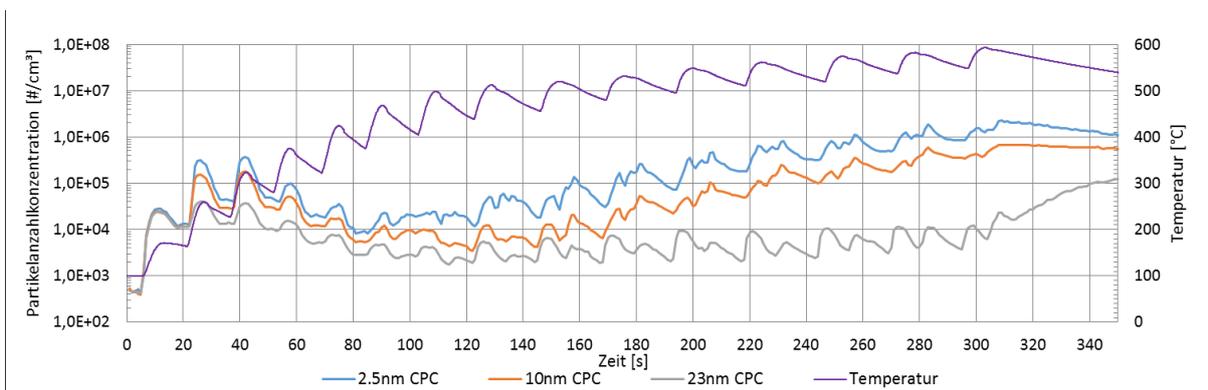


Abbildung 5-43: Partikelanzahlkonzentration CPC (2,5 nm, 10 nm, 23 nm) über AK-Master-Fade (Sek. 9) – ECE-kh

Für den ECE-kh können damit zwei charakteristische Temperaturschwellen mit jeweils differenziertem Partikelspektrum identifiziert werden. Auffällig ist der ab $t = 310$ s erfasste Konzentrationsverlauf im Falle einer ruhenden Bremsscheibe. Daraus folgt, dass der Bildungsprozess der Partikel der ultrafeinen Fraktion besonders auf die Verdampfung organischer Bestandteile

der Belagmatrix (z. B. Phenolharze in Bindemitteln) zurückzuführen ist. Entsprechend Abschnitt 5.1 konnten unter thermischer Beanspruchung besonders Kohlenstoffeinfachbindungen (C–C) im Partikelgrößenbereich $< 0,1 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden, welche typisch für organischen Kohlenstoff (OC) sind. Im Emissionsprodukt des NAO-kh wurden zudem Kohlenstoff-Sauerstoff-Doppelbindungen (C=O) erfasst, die ebenfalls organischer Spezies zugeordnet werden können. Auch in [PLA17] wurden die flüchtigen organischen Verbindungen unter thermischer Beanspruchung untersucht. Dabei konnten BTEX- (Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole) und PAK-Gruppen (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) detektiert werden. Der Einfluss der Temperatur in Abhängigkeit der jeweiligen Komponenten der Belagmatrix auf die Bildung nanoskaliger Partikel ist jedoch weitgehend unerforscht. Zur Bewertung sind in Abbildung 5-44 und Abbildung 5-45 die Größenverteilungsdichten für die Beläge ECE-kh und NAO-kh bei maximaler Temperatur je Einzelbremsung über den Verlauf der AK-Master-Fadingreihe (Bremsung 1–8) gegenübergestellt. Aufbauend auf den in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Emissionscharakteristiken ist für den ECE-kh ab einer Temperatur von ca. $170 \text{ }^\circ\text{C}$ ein Konzentrationsanstieg mit einem Maximum zwischen 30 und 60 nm (Charakteristikum 1) bis etwa $350 \text{ }^\circ\text{C}$ messbar. Ab ca. $450 \text{ }^\circ\text{C}$ kann ein erneuter Konzentrationsanstieg mit einem Peak im Größenbereich $< 20 \text{ nm}$ (Charakteristikum 2) bestimmt werden, welcher bis zum Ende des Temperaturprofils (ca. $600 \text{ }^\circ\text{C}$) kontinuierlich ansteigt. Im Falle des NAO-kh ist das Charakteristikum 1 (Spitzenkonzentration zwischen 30 und 60 nm) nicht nachweisbar. Ab Temperaturen von 180 – $230 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt ein Konzentrationsanstieg mit einer Peak-Konzentration im Partikelgrößenbereich $< 20 \text{ nm}$ vor, wobei sich ab $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ein globaler Konzentrationsanstieg einstellt.

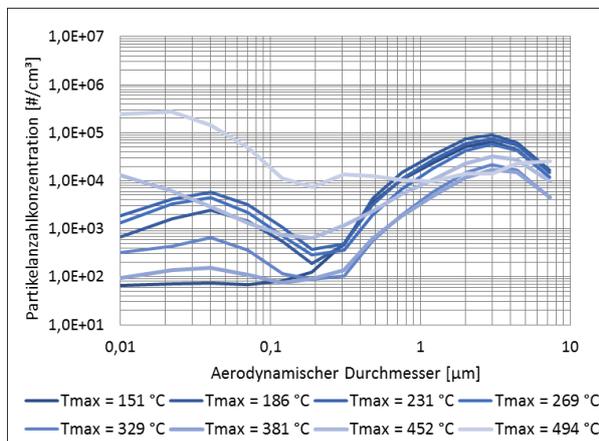


Abbildung 5-44: Verlauf der Größenverteilungsdichte (ELPI) über AK-Master-Fade (Sek. 9) – ECE-kh

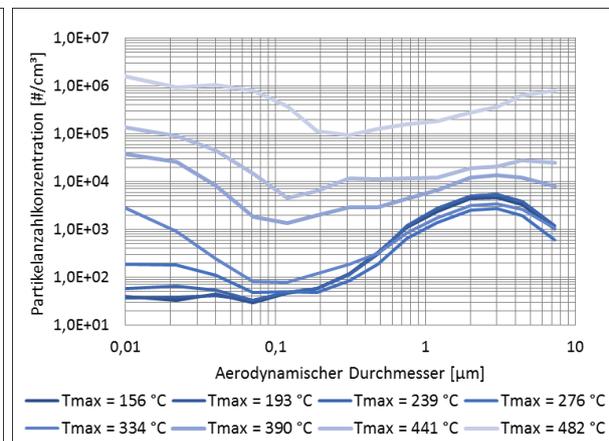


Abbildung 5-45: Verlauf der Größenverteilungsdichte (ELPI) über AK-Master-Fade (Sek. 9) – NAO-kh

Insgesamt ist festzuhalten, dass der Partikelbildungsprozess stark von der materiellen Zusammensetzung des Reibbelages sowie der umgesetzten Reibenergie bzw. Reibleistung abhängt. Für die untersuchten Reibbeläge ergeben sich spezifische Konzentrationsanstiege, wobei die Peak-Konzentrationen im Falle des NAO-kh insgesamt höher gegenüber dem ECE-kh ausfallen. Zur Verifizierung des thermischen Einflusses erfolgt aufbauend auf Abbildung 5-43 und unter Verwendung eines NAO-kh ein Vergleich zweier in direkter Reihenfolge durchgeführter

AK-Master-Fadingreihen (Sek. 9). Die Erfassung der Anzahlkonzentration erfolgt mittels 2,5 nm-CPC (CPC 1) und 23 nm-CPC (CPC 3). Gemäß des in Abbildung 5-46 dargestellten verdünnungskorrigierten Konzentrationsverlaufes kann aufbauend zu den oben beschriebenen Erkenntnissen ein temperaturabhängiger Konzentrationsanstieg durch das 2,5 nm-CPC bei ca. 230 °C nachgewiesen werden. Die Anzahlkonzentration liegt im Bereich der CPC-Sättigung, wobei der Konzentrationsbereich von $3,0E+05 \text{ \#/cm}^3$ (single count mode) deutlich überschritten wird. Die Messung 2 weist hingegen eine Abweichung der durch die verwendeten CPC detektierten Anzahlkonzentrationen auf, welche bei deutlich höheren Temperaturen (ca. 400 °C) einsetzt. Darüber hinaus sind die Peak-Konzentrationen über den gesamten Temperaturbereich niedriger gegenüber Messung 1. Daraus ist abzuleiten, dass durch die thermische Beanspruchung eine Beeinflussung des Entstehungsprozesses von Partikeln des ultrafeinen Spektrums und ein Anstieg der Temperaturschwelle resultiert, was als temporäre Schädigung der in tribologischen Kontakt befindlichen Bereiche anzusehen sind. Weitere Erkenntnisse zum Einfluss der Vorkonditionierung werden in Abschnitt 6.3 vorgestellt.

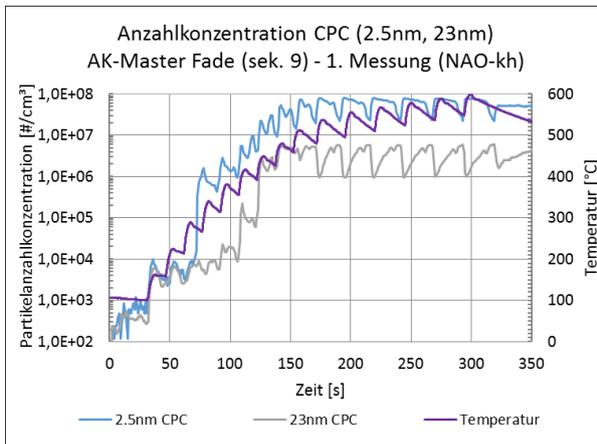


Abbildung 5-46: Einfluss der Beanspruchungshistorie auf den Partikelbildungsprozess – 1. Messung

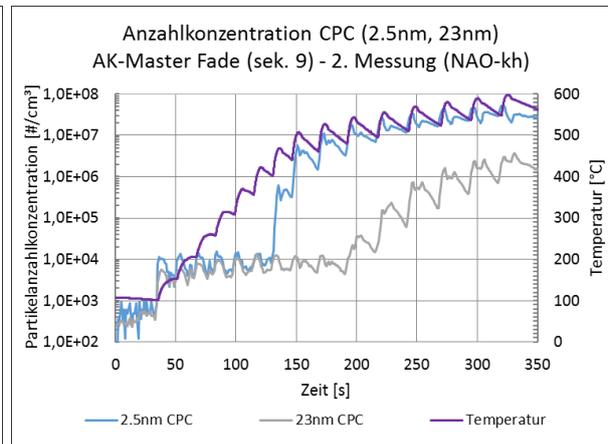


Abbildung 5-47: Einfluss der Beanspruchungshistorie auf den Partikelbildungsprozess – 2. Messung

Zur Bewertung des Einflusses von Rotationsgeschwindigkeit und Bremsdruck sind in Abbildung 5-48 und Abbildung 5-49 die Größenverteilungsdichten über die AK-Master-Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5 gegenübergestellt.

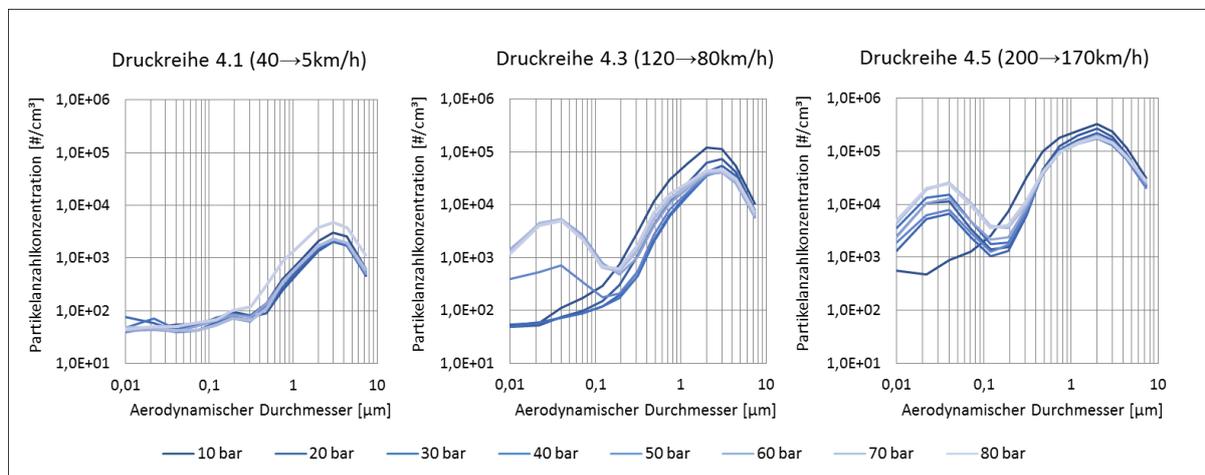


Abbildung 5-48: Mittlere Größenverteilungsdichte je Bremsung über AK-Master-Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5 – ECE-kh

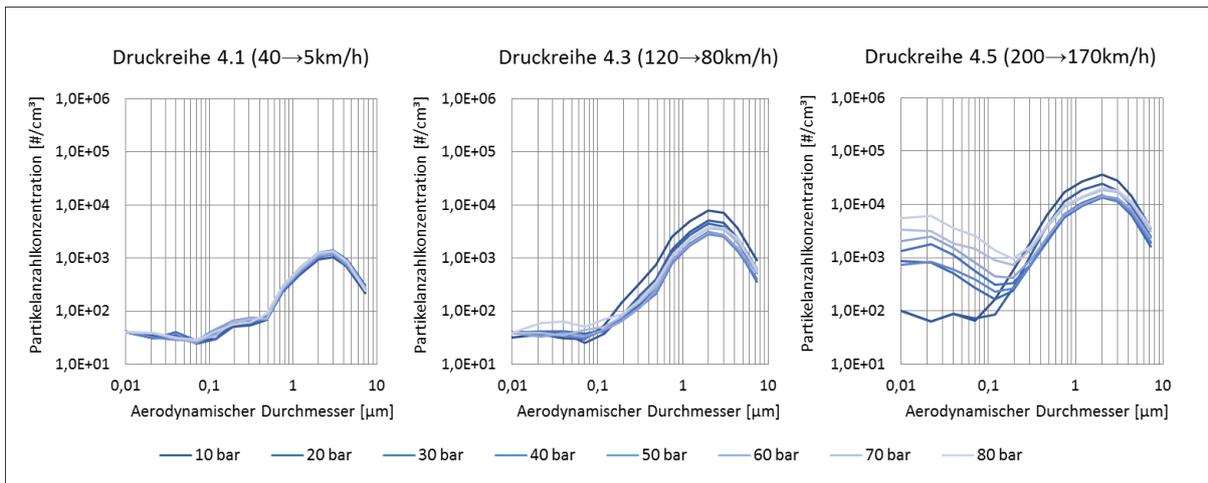


Abbildung 5-49: Mittlere Größenverteilungsdichte je Bremsung über AK-Master-Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5 – NAO-kh

Im Falle des ECE-kh ist ab Druckreihe 4.3 und 70 bar (Reibenergie: 196,3 kJ bzw. Reibleistung: ≥ 212 kW) ein charakteristischer Konzentrationsanstieg über einen Größenbereich von 10 nm bis 0,1 μm messbar (Peak-Konzentrationsbereich: 20–60 nm). Dieser ist im Falle des NAO-kh über Druckreihe 4.4 ab einem Bremsdruck von 40 bar (Reibenergie: 272,4 kJ bzw. Reibleistung: $\geq 88,2$ kW) bei einer Peak-Konzentration zwischen 10 und 30 nm zu beobachten. Über Druckreihe 4.1 liegt eine monomodale Verteilung mit einem Peak-Konzentrationsbereich zwischen 1 und 4 μm vor. Das Partikelspektrum erstreckt sich über einen Partikelgrößenbereich von 0,19 bis $\geq 7,3$ μm . Die je Geschwindigkeits-Druckstufe berechneten CMDs (vgl. Abbildung 5-50 und Abbildung 5-51) bestätigen eine Reduktion des Durchmessers unter Zunahme der Reibenergie und gemäß Abbildung 5-23 eine Änderung der Partikeleigenschaften unter Berücksichtigung einer konstanten Partikeldichte (1 g/cm³). Für den NAO-kh kann bei einer geringeren Schwankungsbreite ein kleinerer CMD ohne Bechtung der Temperatur bestimmt werden, welcher von 1,9 μm (Druckreihe 4.1) auf 1,4 μm (Druckreihe 4.5) abfällt.

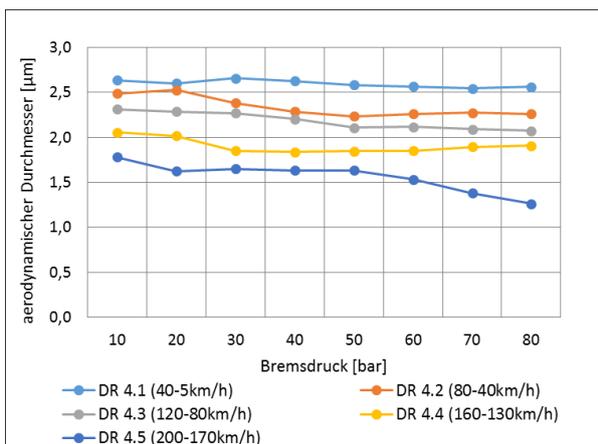


Abbildung 5-50: Median-Partikeldurchmesser (CMD) über AK-Master-Druckreihen – ECE-kh

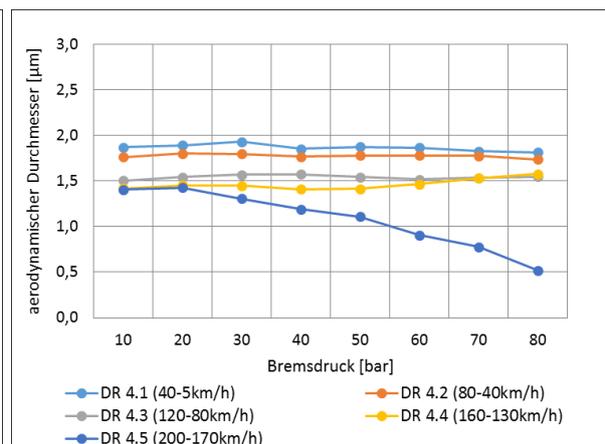


Abbildung 5-51: Median-Partikeldurchmesser (CMD) über AK-Master-Druckreihen – NAO-kh

Für ECE-kh können über die Druckreihen 4.1–4.2 CMD zwischen 2,2 und 2,6 μm bestimmt werden. Unter maximaler Beanspruchung (Druckreihe 4.5: 80 bar) sinkt dieser auf 1,1 μm ab. Der über die Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5 gemessene Temperaturverlauf (Initialtemperatur:

100 °C) ist in Abbildung 5-52 und Abbildung 5-53 gegenübergestellt. Unter Zunahme von Reibenergie und Reibleistung folgt ein Anstieg des Temperaturgradienten und der Peak-Temperatur bei jeweils charakteristischen Temperaturverläufen. Für Druckreihe 4.3 ergeben sich Spitzentemperaturen von 185 °C (ECE-kh) bzw. 193 °C (NAO-kh). Im Falle der Druckreihe 4.5 sind Spitzentemperaturen > 200 °C messbar. Gemäß der in Abbildung 5-50 und Abbildung 5-51 gegenübergestellten CMD folgt aus einer Reibringtemperatur > 180 °C die Bildung einer bimodalen Verteilung (Konzentrationsanstieg < 0,1 µm).

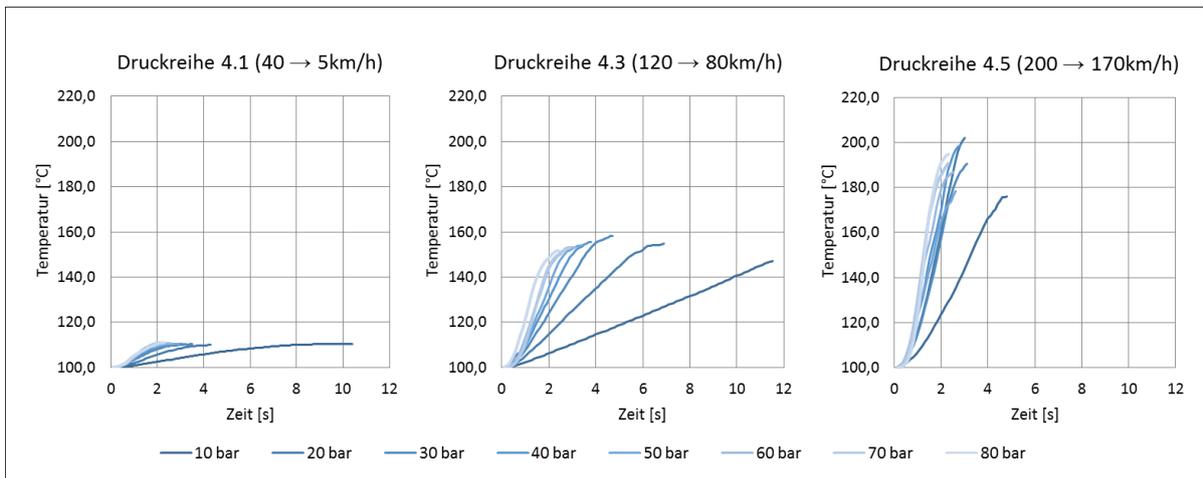


Abbildung 5-52: Reibringtemperatur über AK-Master-Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5 – ECE-kh

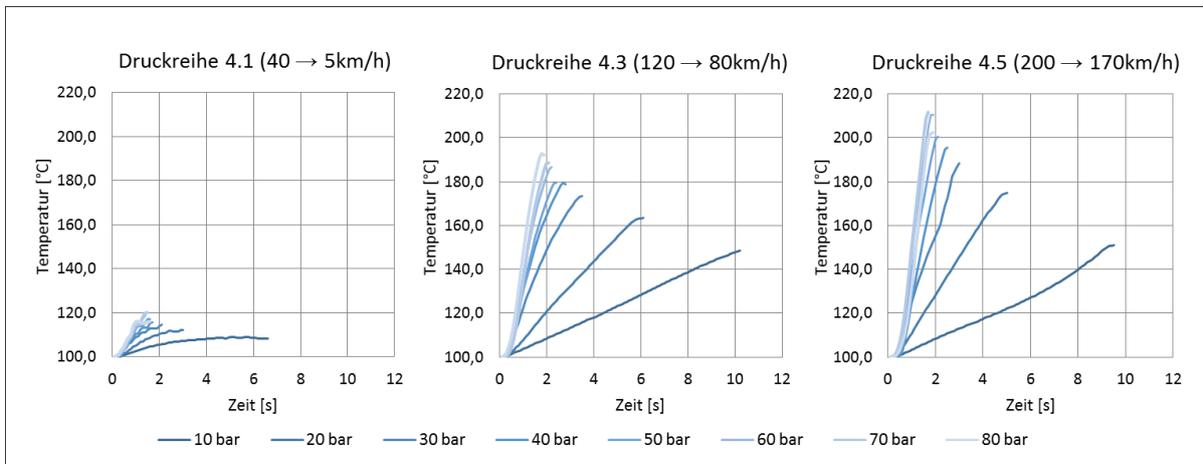


Abbildung 5-53: Reibringtemperatur über AK-Master-Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5 – NAO-kh

Da die Temperaturmessung mittels eingestemtem Thermoelement bei zeitlich kurzen Bremsmanövern und hohen Energiedichten (z. B. ab Druckreihe 4.3) die Erfassung der realen oberflächennahen Spitzentemperaturen ausschließt, ist der Fokus zur Bewertung kritischer Temperaturschwellen auf die Temperaturmessung mittels Thermografiekamera zu legen. Zur Anwendung kommt ein Infrarot-Thermografiesystem mit einem Spektralbereich von 2,0 bis 5,7 µm, einer Detektorauflösung von 640 x 512 IR-Pixel, einer IR-Bildfrequenz von 355 Hz und einer Messgenauigkeit von ± 1 °C. Der Temperaturbereich wird für die Anwendungen auf maximal 350 °C vordefiniert. Emissionsgrade von Materialien variieren im Infrarotspektrum, wodurch auch eine Abweichung in der Wärmestrahlung folgt. Zudem kann externe Wärmestrahlung reflektiert oder auch gestreut werden. Dabei auftretende Fehler können umso größer

werden, desto niedriger der Emissionsgrad ist und desto weniger genau die Wärmestrahlung der Umgebung abgeschätzt werden kann. Für die in Abbildung 5-54 bis Abbildung 5-57 gegenübergestellten Temperaturprofile des Reibrings (Fingerseite) für ECE-kh und NAO-kh wird aufgrund identischer Konfiguration des Kamerasystems und Messaufbaus sowie identischem Scheibenmaterials von einem konstanten Emissionsgrad ausgegangen, was einen Direktvergleich ermöglicht. Aus dem Vergleich geht eine charakteristische, von Rotationsgeschwindigkeit und Bremsdruck beeinflusste Temperaturverteilung hervor. Neben der Korrelation mit der Reibenergie sind unter Zunahme des Bremsdruckes ein Anstieg der Spitzentemperaturen und eine Verschiebung der Hotbands in Richtung des äußeren Reibringes auszumachen. Letzteres resultiert u. a. durch die Aufweitung des Brems sattels [DEG07].

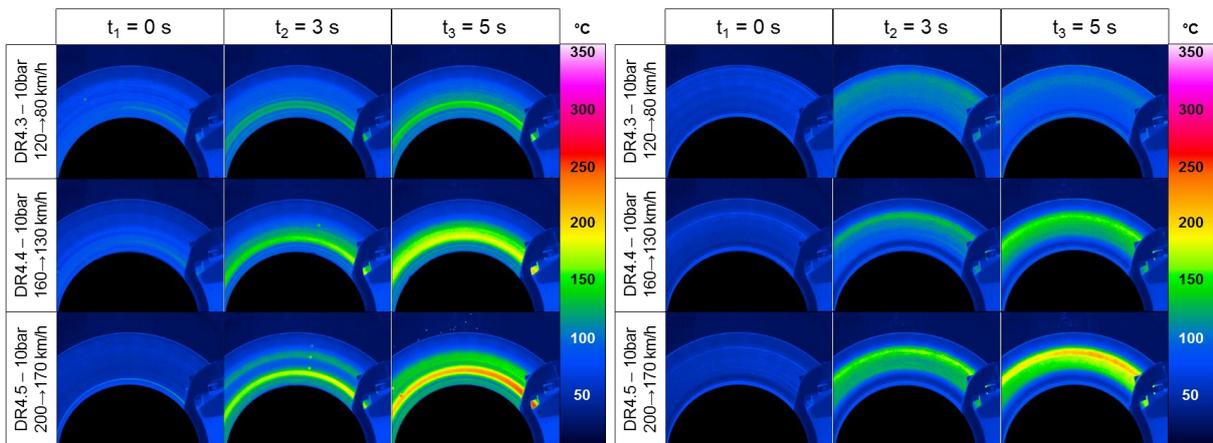


Abbildung 5-54: Temperaturverteilung über die Reibfläche – DR 4.3–4.5 bei 10 bar (ECE-kh)

Abbildung 5-55: Temperaturverteilung über die Reibfläche – DR 4.3–4.5 bei 10 bar (NAO-kh)

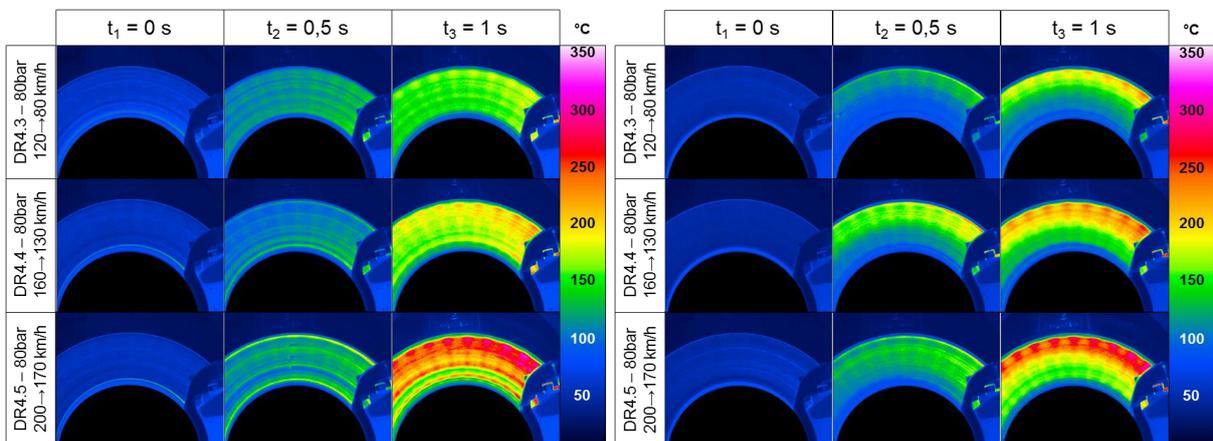


Abbildung 5-56: Temperaturverteilung über die Reibfläche – DR 4.3–4.5 bei 80 bar (ECE-kh)

Abbildung 5-57: Temperaturverteilung über die Reibfläche – DR 4.3–4.5 bei 80 bar (NAO-kh)

In diesem Zusammenhang steht auch die dynamische, bremsdruckabhängige Änderung der lokalen Momentenübertragung, welche im Falle maximaler Bremsdrücke für die verwendete Schwimmsattelbremse primär über den Außenring erfolgt [KLE06]. Die daraus resultierenden Hotbands entstehen infolge einer ungleichförmigen Verteilung der Flächenpressung auf einzelne Kontaktbereiche durch Dissipationsenergie über den zeitlichen Verlauf einer Bremsung. Sie beeinflussen die lokale, positionsabhängige Temperaturerfassung mittels eingestemmt

Thermoelement signifikant, was besonders bei regulatorischen Messungen bei der Bewertung zulässiger Temperaturbereiche zu beachten ist. Dabei ist die lokale Ausprägung der Hotbands infolge des dynamischen Auf- und Abbaus der Patches lediglich als Momentaufnahme zu verstehen. Entsprechende Untersuchungen zur Entstehung und Dynamik von Hotbands und Hotspots sind [SAR09] und [FUE12] zu entnehmen. Für die verwendeten Reibbeläge stellen sich entsprechend der reibwertabhängigen Reibleistung unterschiedliche Temperaturniveaus ein. Die Peak-Temperaturen erreichen im Falle maximaler Reibenergie 325 °C (ECE-kh) bzw. 305 °C (NAO-kh) und übersteigen die mittels eingestemmtem Thermoelement erfassten Peak-Temperaturen deutlich. Die Temperaturen steigen über den Bremsverlauf bis zu einem Maximum an, um vor Abfall des Bremsdruckes infolge reduzierter Reibenergie bzw. Wärmeleitung an benachbarte Bereiche zu sinken. Die Wärmeleitung gehört zu den stoffgebundenen Wärmeübertragungsmechanismen und beschreibt den Energietransport zwischen benachbarten Molekülen aufgrund eines im Material vorhandenen Temperaturgradienten [FUE12]. Die Differenz zwischen den Messtechnologien steigt unter Zunahme der geschwindigkeits- und bremsdruckabhängigen Reibleistung an. Die maximale Differenz beträgt 120 °C. Aus dem Vergleich der Messtechnologien ist dennoch eine materialabhängige kritische Temperaturschwelle zwischen 170 und 230 °C zu bestätigen, ab der die Partikelbildung $< 0,1 \mu\text{m}$ begünstigt wird. Dieser Bereich kann durch die Literatur (vgl. Abschnitt 2.3) bestätigt werden [SAC16, FAR19a]. Unterschiede der lokalen Spitzentemperaturen resultieren aus der reibwertabhängigen Reibleistung bzw. kontaktabhängigen Energiedichte, welche im Falle des NAO-kh insgesamt geringer ausfällt. Die Intensität der Anzahlkonzentration $< 0,1 \mu\text{m}$ wird von der zeitlichen Komponente und der lokalen Ausbildung der Hotbands beeinflusst. Zur Auflösung der Temperaturabhängigkeit sind in Abbildung 5-58 und Abbildung 5-59 Größenverteilungsdichten im Abstand von jeweils 0,3 s gegenübergestellt.

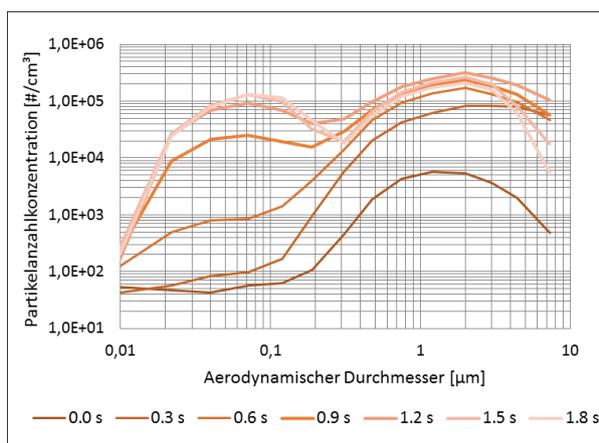


Abbildung 5-58: Verlauf der Größenverteilungsdichte über Druckreihe 4.5 (200 → 170 km/h) 30 bar – ECE-kh

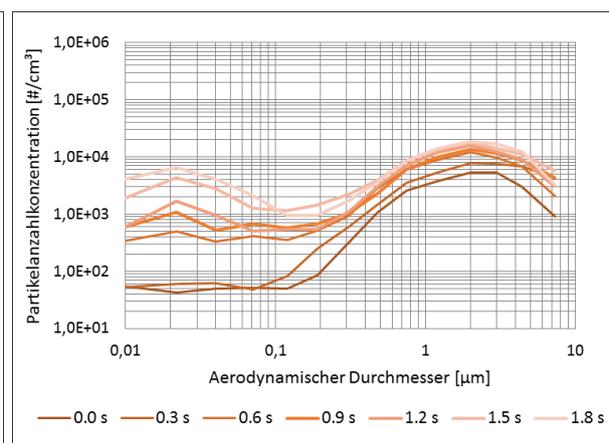


Abbildung 5-59: Verlauf der Größenverteilungsdichte über Druckreihe 4.5 (200 → 170 km/h) 30 bar – NAO-kh

Es wird ersichtlich, dass der charakteristische Anstieg an Partikeln $< 0,1 \mu\text{m}$ bzw. die Ausbildung einer bimodalen Verteilung zeitverzögert nach dem Konzentrationsanstieg der Festkörperfraktion ($> 0,3 \mu\text{m}$) erfolgt. Während für Partikel $> 0,3 \mu\text{m}$ bereits nach 1,2 s ein Maximum

vorliegt, steigt die Konzentration der zweiten Mode ($< 0,1 \mu\text{m}$) bis 1,8 s nach Detektion der verzögerungsbedingten Konzentration kontinuierlich an, beeinflusst durch das Temperaturniveau innerhalb des Reibkontaktes. Aus den je Reibbelag differenzierten Größenverteilungsdichten ist erneut ein materialabhängiger Einfluss auf Bildung der Partikel des ultrafeinen Spektrums abzuleiten.

Aufbauend auf den beschriebenen Partikelbildungsprozess folgt eine Bewertung zum Einfluss des lokalen Reibkontaktes am Beispiel des JRC-novel cycle. Im Rahmen dieser Untersuchung kommt der in Abschnitt 5.1 beschriebene ECE-kf zur Anwendung, welcher gegenüber dem ECE-kh durch einen um Faktor 2 erhöhten Eisenanteil (At.-%) gekennzeichnet ist. In Abbildung 5-60 sind die mittels 2,5 nm-CPC und 23 nm-CPC (jeweils ohne vorgeschaltete vpr) detektierten Konzentrationsverläufe für einen Ausschnitt des Testzyklus dargestellt. Es ist erkennbar, dass in Phasen (konstant-) erhöhter Geschwindigkeiten $> 115 \text{ km/h}$ die Konzentrationsverläufe auseinanderdriften. Das 2,5 nm-CPC detektiert temporär eine um bis zu Faktor 10 (Zeitpunkt: 4.800 s) erhöhte Anzahlkonzentration, was auf lokale Spitzentemperaturen $> 170 \text{ }^\circ\text{C}$ (Schwelle 1) infolge eines lokalen Reibkontaktes (vgl. Abbildung 4-12) während konstanter Scheibenrotation zurückzuführen ist. Der Anteil am anzahlbezogenen Emissionsfaktor (2,5 nm-CPC) beträgt ca. 7 %. Auch in einem Abgleich mittels 10 nm-CPC ohne integrierte vpr konnte ein Anteil von 5 % nachgewiesen werden. Über den weiteren Verlauf des Zyklus, besonders im Falle von Bremsmanövern, ist der bereits bekannte hohe Grad an Linearität (Partikeldurchmesser $\gg 23 \text{ nm}$) zu bestätigen (vgl. Abbildung 5-61).

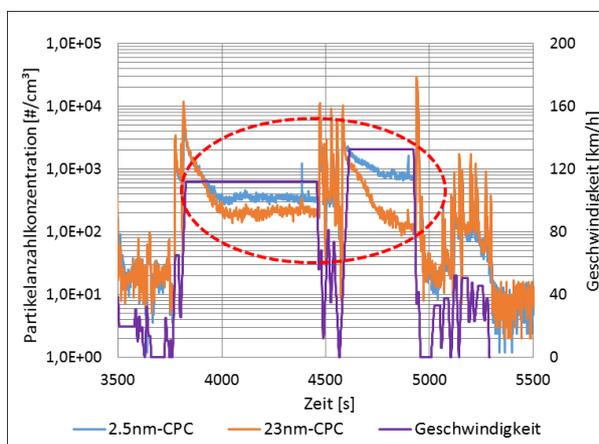


Abbildung 5-60: Partikelbildung $< 23 \text{ nm}$ über Phasen konst. Geschwindigkeit – JRC-novel cycle – ECE-kf

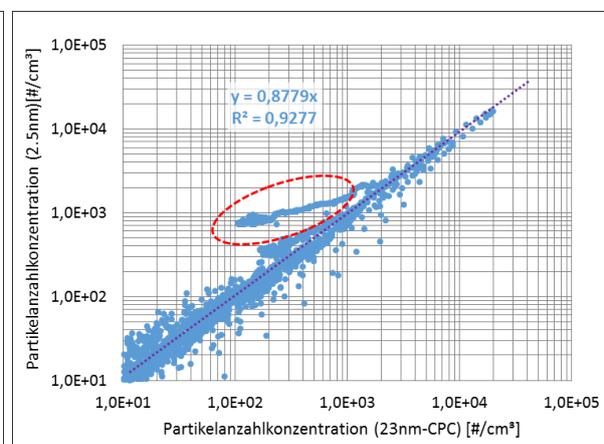


Abbildung 5-61: Linearitätsvergleich CPC (2,5 nm und 23 nm) über JRC-novel cycle (Sek. 10) – ECE-kf

Im Unterschied zu dem in Abbildung 5-30 dargestellten Linearitätsvergleich (ECE-kh) ist besonders der hohe Eisenanteil innerhalb der Belagmatrix des getesteten ECE-kf als Erklärung für die lokale Temperaturousbildung der in Kontakt stehenden Bereiche zu nennen. Damit konnte neben Sekundärpartikelemissionen eine temperaturabhängige Emission von Partikeln $< 23 \text{ nm}$ infolge eines lokalen Reibkontaktes nachgewiesen werden. Für den Fall regulatorischer Messungen, bei denen die Erfassung von Feststoff-PN von Interesse ist, ist zur Eliminierung dieser temperaturabhängigen Artefakte sowie zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit

gemäß Abschnitt 5.2.2 die Zähleinheit mit einer vpr (z. B. Evaporation tube: 300–400 °C) auszustatten, welche den in GRPE-53-03 beschriebenen Anforderungen entspricht. Für den Fall regulatorischer Messungen, bei denen das gesamte Partikelspektrum (total PN) von Interesse ist, empfiehlt sich zur Bewertung der Artefakte eine parallele Messung, z. B. anhand von zwei 10 nm-CPC (Cut-off post Euro 6) mit bzw. ohne vorgeschaltete vpr.

5.2.3 Bestimmung der Partikelmassenkonzentration

Neben der Partikelanzahlkonzentration dient die Bestimmung der Partikelmassenkonzentration zur Berechnung partikelmassebezogener Emissionsfaktoren (mg/km) und erweitert damit die Verifizierung von Konzentrationsprofilen innerhalb des in Abschnitt 3 und 4 beschriebenen stationären Probenahmesystems. Nachfolgend ist die zur Messung von Rußpartikel-Massekonzentrationen bekannte photoakustische Spektroskopie (PAS; vgl. Abschnitt 2.4) bezüglich der Messfähigkeit zu prüfen. Dabei wird die Probe mittels moduliertem Laserstrahl beleuchtet. Schwarze Partikel (Rußpartikel) absorbieren den periodisch modulierten Laserstrahl, woraus eine periodische Erwärmung und Abkühlung der Partikel bei einer Ausdehnung und Kontraktion des Trägergases resultiert. Die Bestimmung des lichtabsorbierenden Anteils erfolgt für unterschiedliche Fahrscenarien am Beispiel des ECE-kh und NAO-kh. Die Referenz zum zeit aufgelösten Signal bildet der Massezuwachs eines Filters (47 mm TX40-Filter), bestimmt über die Gravimetrie. Dies ermöglicht die Bestimmung eines Masse-Verhältnissfaktors sowie die Überprüfung der Signalqualität. Die Berechnung der lichtabsorbierenden Fraktion erfolgt aus dem Integral der detektierten Massenkonzentration zu dem Massezuwachs des Filters.

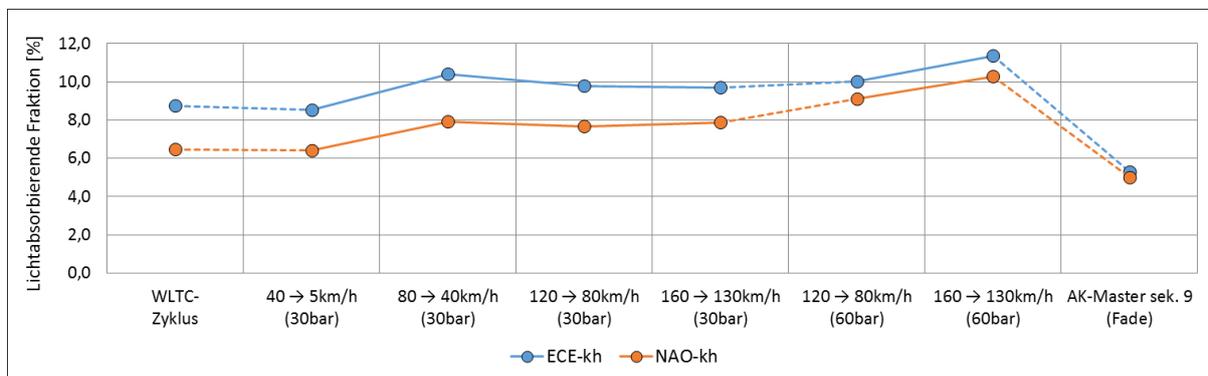


Abbildung 5-62: Lichtabsorbierende Fraktion – PAS-Signal zu gravimetrisch best. Partikelmasse (ECE-kh und NAO-kh)

Die Probenahme erfolgt isokinetisch als Teilstromentnahme ohne gröÑenselektive Fraktionierung. Neben dem WLTC, welcher durch ein niedriges Temperatur- und Bremsdruckniveau charakterisiert ist, werden Untersuchungen anhand einzelner Sektionen der AK-Master-Prüfprozedur durchgeführt. Gemäß des in Abbildung 5-62 dargestellten Vergleiches zwischen dem Signal des Photoakustiksensors und der gravimetrisch bestimmten Partikelmasse kann eine lichtabsorbierende Fraktion von 5–12 % bestimmt werden, wobei der Anteil im Falle des ECE-kh um 0,5–2 % oberhalb des mittels NAO-kh bestimmten Messwertes liegt. Der Anteil steigt unter Zunahme der Beanspruchung (60 bar) und erreicht für den Geschwindigkeitsbereich

160 → 130 km/h ein Maximum. Unter hohem Temperatureinfluss liegt ein Abfall auf ein Minimum von ca. 5 % vor. Damit kann für das vorliegende Messprinzip eine Abhängigkeit von der thermisch-mechanischen Beanspruchung und den Eigenschaften der emittierten Partikel nachgewiesen werden. Der primäre Anteil unterscheidet sich demnach chemisch von schwarzen, stark absorbierenden Rußpartikeln, wobei die Absorption und Erwärmung der Partikel sowie die Ausdehnung des umgebenden Gases differenziert erfolgt. Damit ist die Detektion und Applikation zur kontinuierlichen Bestimmung einer Massenkonzentration erwartungsgemäß einschränkt. Letzteres setzt die Berücksichtigung eines Korrekturfaktors unter Annahme konstanter Partikeleigenschaften zur Bestimmung von Emissionsfaktoren voraus, was, vergleichbar zu elektrisch basierten Messsystemen bei der Bestimmung einer Anzahlkonzentration, nur eingeschränkte Praxistauglichkeit aufweist.

5.2.4 Gegenüberstellung von Partikelanzahl und Partikelmasse

Zur qualitativen Abschätzung des PAS-Signals folgt zunächst ein Direktvergleich mit der Partikelanzahlkonzentration, detektiert mittels 23 nm-CPC (CPC 3) mit vorgeschaltetem Sekundärverdünner (Verdünnungsfaktor 10) und Zyklon (10 µm) auf Basis von WLTC und JRC-novel cycle. Ein Linearitätsvergleich (vgl. Abbildung 5-63 und Abbildung 5-64) zeigt im Bereich niedriger Konzentration (< 1E+02 #/cm³ bzw. < 5E-07 mg/cm³) teils signifikante Unterschiede. Änderungen der modalen Verteilung können für das vorliegende Fahrkollektiv hingegen nicht nachgewiesen werden. Darauf aufbauend erfolgt eine parallele Messung massebezogener Emissionsfaktoren mittels Filterhalter gemäß GRPE-53-03, was neben der in Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Methodik mittels dreistufigem Kaskadenimpaktors einen weiteren Ansatz zur Bestimmung der Partikelmasse darstellt. Zur Vorabscheidung kommen jeweils Zyklone mit Trenndurchmessern (d₅₀) von 2,5 und 10 µm zur Anwendung.

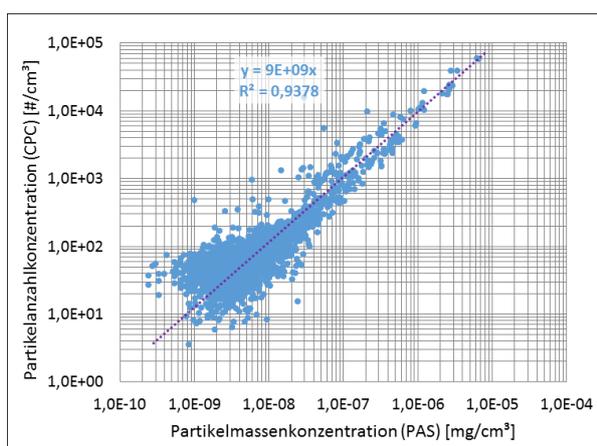


Abbildung 5-63: Linearität CPC (23 nm) vs. PAS über JRC-novel cycle – ECE-kh

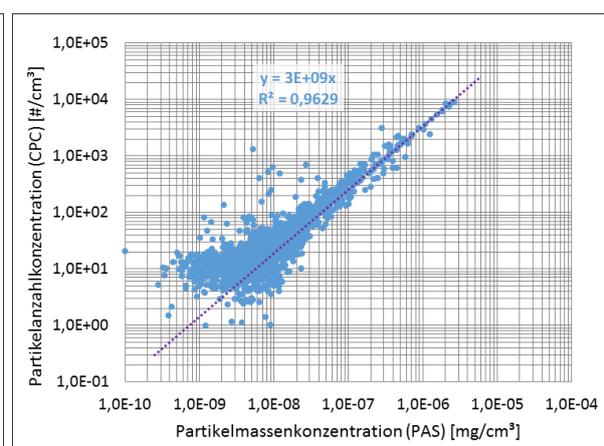


Abbildung 5-64: Linearität CPC (23 nm) vs. PAS über WLTC (Klasse 3) – ECE-kh

Die Probenahme erfolgt über zwei Sonden in einem Abstand von je 0,5 cm vom Kanalzentrum. Am Beispiel des ECE-kh und NAO-kh sind in Abbildung 5-65 und Abbildung 5-66 die massebezogenen PM₁₀- und PM_{2.5}-Emissionsfaktoren sowie die jeweiligen Verhältnissfaktoren über

10x JRC-novel cycle gegenübergestellt. Die Untersuchungen wurden jeweils mit werksneuen Scheiben und Belägen durchgeführt, wobei die Scheiben mit einer Korrosionsschutzschicht versehen sind. Es ist erkennbar, dass unter Zunahme der Zyklenanzahl die massebezogenen Emissionsfaktoren sinken, wobei der stärkste Abfall über die Zyklen 1–3 erfolgt. Dieser Effekt ist dem tribologischen Einlaufvorgang zuzuschreiben und wird in Abschnitt 6.1 weiterführend bewertet. Für beide Belagqualitäten ist ein reproduzierbares Emissionsniveau nach > 8 Zyklen (Distanz: ca. 518 km) zu beobachten. Der bereits in Abschnitt 4.2.4 beschriebene massebezogene Verhältnisfaktor bleibt über die Gesamtanzahl der Testzyklen näherungsweise konstant. Im Falle des ECE-kh kann ein gegenüber dem NAO-kh erhöhter Verhältnisfaktor bestimmt werden, was auf den erhöhten Anteil an Abrasivstoffen zurückzuführen ist [MAM20]. Aus Abschnitt 3 (vgl. Abbildung 3-33 und Abbildung 3-34) ist bekannt, dass die Transporteffizienz unter Zunahme des Partikeldurchmessers (> 2,5 µm) sinkt. Für 5 µm-Partikel konnte eine Transporteffizienz von 65–71 % und für 10 µm-Partikel von 28–40 % nachgewiesen werden, wohingegen die Beeinflussung für Partikel < 2,5 µm insgesamt gering ausfällt.

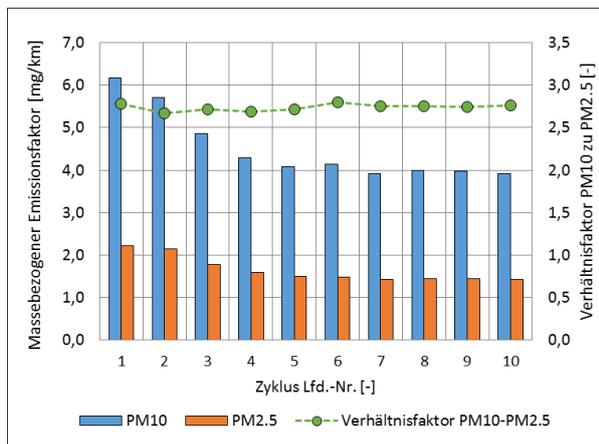


Abbildung 5-65: Massebezogene Emissionsfaktoren PM10/PM2.5 über JRC-novel cycle (Sek. 10) – ECE-kh

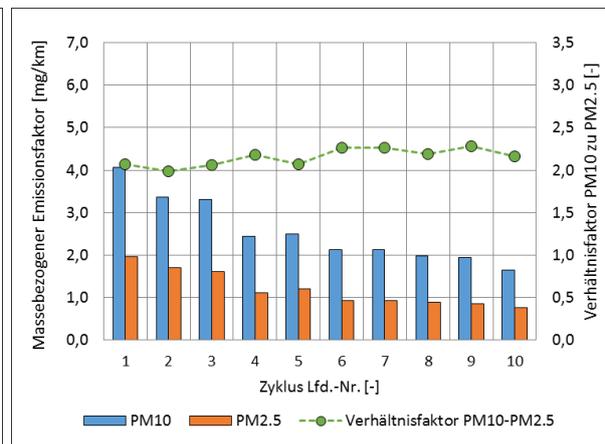


Abbildung 5-66: Massebezogene Emissionsfaktoren PM10/PM2.5 über JRC-novel cycle (Sek. 10) – NAO-kh

Damit ist von einem höheren, realen Verhältnisfaktor zwischen PM10- und PM2.5-Anteilen infolge von Partikelverlusten im Probenahmesystem auszugehen. Die Partikelverluste innerhalb der Transportleitung sind im Vergleich geringer einzustufen (5–10 % für PM10) [MAR76]. Die daraus resultierenden anzahl- und massebezogenen Emissionsfaktoren sind in Tabelle 5-3 gegenübergestellt. Aus dem Vergleich geht ein anzahlbezogener Emissionsfaktor je Bremse hervor, welcher im Falle des ECE-kh um ca. Faktor 250 unterhalb des nach Euro 6d Temp gültigen Grenzwertes verbrennungsmotorischer Abgasemissionen (6,0E+11 #/km) liegt.

Tabelle 5-3: Partikelanzahl- und Partikelmassenwerte (JRC-novel cycle und WLTC)

	Emissionsfaktor – Mittelwert Zyklus 6–10	ECE-kh	NAO-kh
JRC-novel cycle (Sek. 10)	PN (2,5 µm) [# /km/Bremse]	2,34E+09	1,373E+09
	PM10 [mg/km/Bremse]	3,995	1,987
	PM2.5 [mg/km/Bremse]	1,422	0,877

Die massenbezogenen PM_{2.5}-Emissionsfaktoren liegen für eine Vorderachsbremse um etwa Faktor 3 unterhalb des Grenzwertes von 4,5 mg/km (PM_{2.5}). Der massebezogene PM₁₀-Emissionsfaktor liegt hingegen für eine Bremse bereits im Bereich des Grenzwertes. Die Unterschiede zwischen Bremsenemissionen und verbrennungsmotorischen Emissionen resultieren gemäß der vorangegangenen Untersuchungen aus abweichenden Partikeldurchmessern, Partikeldichten und Partikelformen, weshalb unterschiedliche Bezugswerte Gültigkeit finden. Dies unterstreicht die ungleiche Bewertung anzahl- und massebezogener Emissionsfaktoren mit Bezug auf die Feinstaubklassen. Aufbauend auf den in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Einfluss der Scheibenrotation auf die Emission von Sekundärpartikeln (ohne Druckaktuierung in der offbrake-Phase) folgt am Beispiel des JRC-novel cycle (Sek. 10) eine Unterteilung in Anteile von Primär- und Sekundärpartikeln. Gemäß des in Abbildung 5-67 dargestellten Konzentrationsverlaufes ist im Bereich konstanter Fahrgeschwindigkeiten (rot markiert für 112 und 132 km/h) ein Konzentrationsniveau messbar, welches einen signifikanten Anteil am Gesamtbudget hat. Die Konzentration nimmt mit fortlaufender Zeitdauer kontinuierlich ab, erreicht jedoch unter konstanter Geschwindigkeit zu keinem Zeitpunkt das Ausgangsniveau. Den Sekundärpartikelemissionen kann aus dieser Untersuchung ein Anteil zwischen 16 und 22 % am anzahl- und massenbezogenen Emissionsfaktor zugewiesen werden [FAR19b] [HAG16].

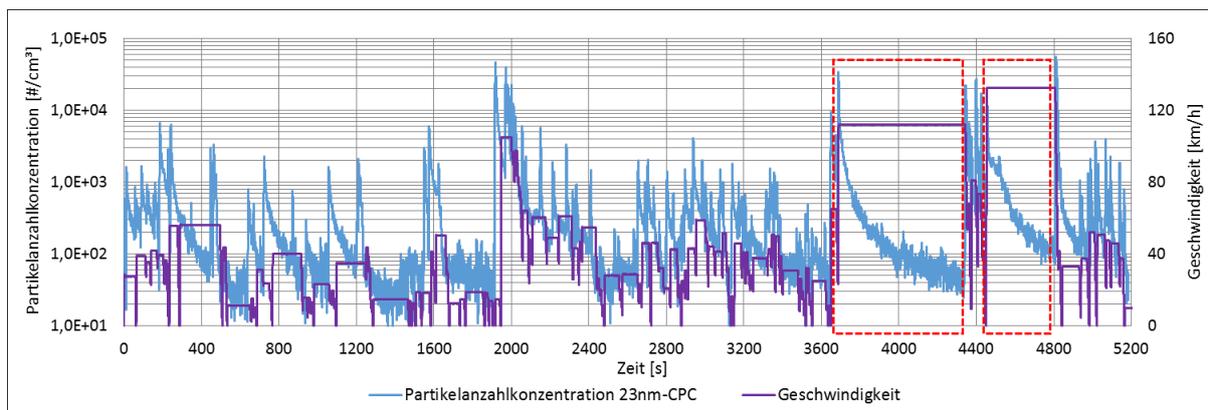


Abbildung 5-67: Sekundärpartikelemissionen über den Verlauf des JRC-novel cycle (Sek. 10) – ECE-kh [HES19b]

Eine Gegenüberstellung anzahl- und massebezogener Emissionskennzahlen zur Bewertung der Linearität über die AK-Master-Druckreihen folgt in Abbildung 5-68 und Abbildung 5-69. Für Druckreihe 4.1 und 4.2 (ECE-kh) bzw. 4.3 (NAO-kh) liegt zunächst ein hoher Grad an Linearität vor, welcher unter weiterer Zunahme von Reibenergie bzw. Reibleistung kontinuierlich abnimmt. Für den ECE-kh sind über die Druckreihen 4.3–4.5 erhöhte massebezogene Emissionskennzahlen bei vergleichbaren anzahlbezogenen Emissionskennzahlen im Vergleich zum NAO-kh messbar. Unter Verwendung eines 2,5 nm-CPC bzw. 10 nm-CPC steigen die anzahlbezogenen Emissionskennzahlen an, was nicht direkt auf die massebezogene Emissionskennzahl übertragen werden kann. Abweichende Anzahl-Massenkorrelationen resultieren vornehmlich aus Änderungen der chemischen Zusammensetzung (z. B. der spezifischen Partikeldichte) bei gleichzeitiger Änderung der Partikelgrößenverteilung.

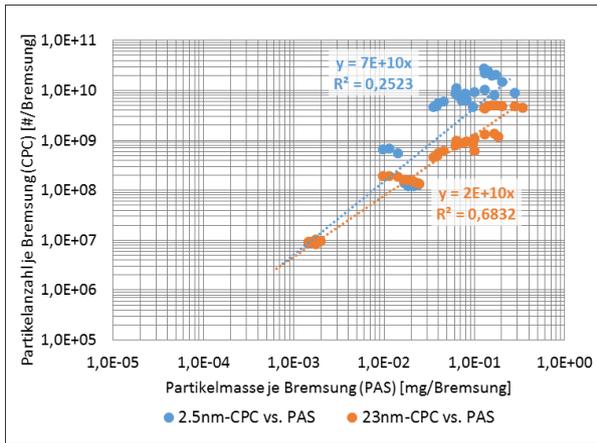


Abbildung 5-68: Linearität CPC (2,5 nm, 23 nm) vs. PAS-Signal über AK-Master-Druckreihen 4.1–4.5 (ECE-kh)

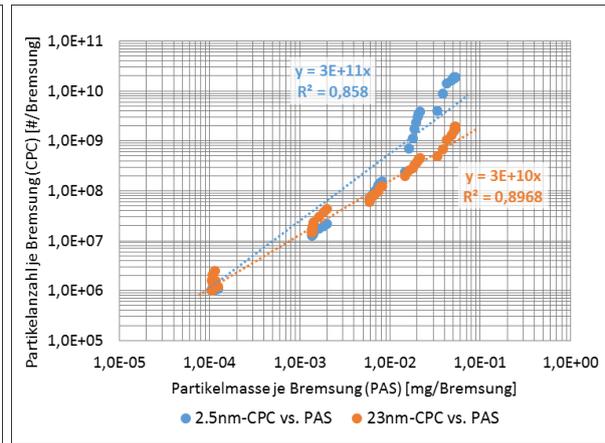


Abbildung 5-69: Linearität CPC (2,5 nm, 23 nm) vs. PAS-Signal über AK-Master-Druckreihen 4.1–4.5 (NAO-kh)

Am Beispiel eines Bremsdruckes von 30 bar können unter Korrektur der lichtabsorbierenden Fraktion mit der gravimetrisch bestimmten Partikelmasse (PM2.5) die in Tabelle 5-4 aufgeführten Emissionskennzahlen bestimmt werden (Messung der Partikelanzahl mittels 23 nm-CPC).

Tabelle 5-4: Partikelanzahl- und korr. Partikelmassenwerte je Einzelbremsung (AK-Master Druckreihen)

	Anzahl/Masse je Bremsung	40 → 5 km/h (30 bar)	80 → 40 km/h (30 bar)	120 → 80 km/h (30 bar)	160 → 130 km/h (30 bar)
ECE-kh	PN [# /Bremsung]	9,87E+06	1,51E+08	9,23E+08	1,33E+09
	PM [mg/Bremsung]	0,019	0,204	0,802	1,325
NAO-kh	PN [# /Bremsung]	1,56E+06	0,17E+08	0,79E+08	0,29E+09
	PM [mg/Bremsung]	0,002	0,017	0,081	0,227

Auf eine Einzelbremsung von 120 → 80 km/h und ECE-kh ist ca. 18 % bzw. von 160 → 130 km/h ist ca. 30 % des derzeit gültigen massebezogenen Emissionsfaktors von 4,5 mg/km (Euro 6d Temp) zurückzuführen. Die anzahlbasierte Emissionskennzahl entspricht hingegen nur 0,15 % (120 → 80 km/h) bzw. 0,22 % (160 → 130 km/h) des anzahlbezogenen Emissionsfaktors von 6,0E+11 #/km, was die aufweichenden Relationen erneut unterstreicht.

5.3 Fazit zur Mess- und Klassifizierbarkeit

Gemäß Abschnitt 5.1 und 5.2 werden die chemisch-physikalischen Eigenschaften partikelförmiger Bremsenemissionen vor allem durch die Zusammensetzung der Reibpartner und die Beanspruchungsintensität bestimmt. Damit können je nach Fahrkollektiv über den Verlauf eines Zyklus einerseits die Transporteffizienz und andererseits auch die Messfähigkeit eines Partikelmesssystems variieren. Daher sind die zur Bestimmung von Emissionsfaktoren verbrennungsmotorischer Abgasemissionen bekannten Messmethoden und physikalischen Messprinzipien hinsichtlich der Anwendbarkeit zu prüfen. Zudem stellen Transportverluste supermikroner Partikel innerhalb des Messsystems neue Anforderungen an die Bestimmung von Korrekturfaktoren, welche in Abschnitt 8.2 beschrieben werden. Damit ist besonderer Wert auf

den Partikeltransport und die Repräsentativität der entnommenen Teilprobe (vgl. Abschnitt 3 und 4), den Partikeltransport innerhalb des Messsystems, die Konditionierung bzw. Vorbehandlung des Aerosols sowie die Spezifikationen des Partikelmesssystems zu legen. Eine Gegenüberstellung ist Abbildung 5-70 zu entnehmen. Entsprechende Ansätze einer isokinetischen (max. zulässige Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeit: -5% bis $+15\%$) und isoaxialen Probenahme sowie die Ausrichtung und Gestaltung der Transportleitung können gemäß VDI 2066, EN 13284-1 und EN 16911-1 übernommen werden.



Abbildung 5-70: Einflussgrößen auf die Bestimmung physikalischer Partikeleigenschaften

Aus den Ergebnissen ist abzuleiten, dass mit dem Kondensationspartikelzähler (CPC) ein Messsystem zur Verfügung steht, welches in Bezug auf Sensitivität (Einzelpartikeldetektion) und Zähleffizienz eine Referenz für die Partikelzählung darstellt. Eine Abhängigkeit vom kalibrierten Cut-off konnte besonders unter hohem Temperatureinfluss nachgewiesen werden. Unter Anwendung eines 23 nm-CPC (non-volatile Fraktion) werden Temperatureffekte deutlich reduziert. Unter WLTP-Datenbasis, nachgebildet durch den WLTC Klasse 3 und JRC-novel cycle (Sek. 10) mit Peak-Temperaturen $< 180\text{ °C}$, können Partikel $> 23\text{ nm}$ bzw. 55 nm (Plateau der CPC-Effizienzkurve) erfasst werden. Aus Messungen zur Größenverteilungsdichte mittels elektrischem Niederdruck-Kaskadenimpaktor (ELPI) sind für ECE-kh und NAO-kh Konzentrationspeaks zwischen $0,8$ und $3\text{ }\mu\text{m}$ (monomodale Verteilung) bei einer unteren Grenze von $0,2\text{--}0,3\text{ }\mu\text{m}$ abzuleiten.

Unter hohem Temperatureinfluss bzw. hohen Energiedichten, welche am Beispiel der AK-Master-Fadingreihe und -Druckreihen 4.1–4.5 untersucht wurden, konnte ein signifikanter Anteil von Partikeln $< 23\text{ nm}$ am gesamten Partikelspektrum erfasst werden. Die Partikelbildung resultiert aus lokal auftretenden Spitzentemperaturen (Hotbands) bzw. globalen Reibringtemperaturen (Fadingreihe) $> 200\text{ °C}$ (Schwelle 1). Eine weitere kritische Schwellentemperatur konnte einem Temperaturbereich zwischen 450 und 500 °C zugewiesen werden. Die Erfassung oberflächennaher Spitzentemperaturen mittels eingestemmter Thermoelemente, welche durch eine dynamische Änderung in radialer Richtung des Reibringes charakterisiert sind, ist nur begrenzt mit dem Partikelbildungsprozess bzw. den kritischen Temperaturschwellen in

Einklang zu bringen. Dieser Umstand ist besonders bei der Vorgabe von z. B. maximal zulässigen Temperaturen für den Fall regulatorischer Messungen zu berücksichtigen [KON10]. Anhand von Messungen mittels thermischer Vorkonditionierung (vpr) konnte nachgewiesen werden, dass ein signifikanter Anteil < 23 nm-Partikel durch eine auf 350 °C temperierte Evaporation tube eliminiert werden kann. Konzentrationsüberhöhungen konnten über den Verlauf der Fadingreihe ab Temperaturen erfasst werden, welche oberhalb der Arbeitstemperatur der Evaporation tube liegen (> 350 °C). Diese Temperaturbereiche (auch lokal) können im Falle eines Zyklus gemäß WLTP-Datenbasis nahezu ausgeschlossen werden. Damit ist die aus der verbrennungsmotorischen Abgasgesetzgebung UN/ECE-R83 bekannte Anzahlmesstechnik in der Lage, Partikel des ultrafeinen Spektrums zu eliminieren und damit ausreichend robust für regulatorische Messungen. Je nach Intensität der Beanspruchung kann eine Verdünnung des Aerosols vor Eintritt in die Zähleinheit erforderlich sein. Für hohe Beanspruchungen (wie AK-Master) empfiehlt sich ein Gesamtverdünnungsfaktor > 10. Der elektrische Niederdruck-Kaskadenimpaktor ist unter der Voraussetzung einer Mindestkonzentration von $5E+02 \text{ \#/cm}^3$ und unter Annahme einer Standarddichte von 1 g/cm^3 durch eine hohe Linearität zur non-volatilen Fraktion (23 nm-CPC) gekennzeichnet.

Aus den Untersuchungen zur Bestimmung massebezogener Emissionsfaktoren ist die Gravimetrie als Referenz zu definieren. Die photoakustische Spektroskopie bietet unter niedrigem Temperatureinfluss (< 180 °C entsprechend WLTC – Klasse 3 oder JRC-novel cycle) und Berücksichtigung eines Korrekturfaktors einen hohen Grad an Linearität im Vergleich zur Partikelanzahlmessung mittels CPC. Steigt die Temperatur über eine kritische Temperaturschwelle, sinkt die Linearität deutlich ab. Aus der Bestimmung massebezogener PM10- und PM2.5-Emissionsfaktoren konnten je nach Belagqualität differenzierte Verhältnisfaktoren von 2,8 (ECE-kh) und 2,3 (NAO-kh) für unterschiedliche Belagzusammensetzungen bestimmt werden, was die Erkenntnisse der mittels elektrischem Niederdruck-Kaskadenimpaktor bestimmten Größenverteilungen bestätigt. Bereits für eine Vorderachsbremse konnte ein massebezogener PM2.5-Emissionsfaktor bestimmt werden, welcher etwa 32 % des derzeit gültigen Emissionsfaktors für verbrennungsmotorische Abgasemissionen (Gesamtfahrzeug) entspricht. Es ist weiterhin festzuhalten, dass auch der Verhältnisfaktor zwischen massebezogenen PM10- und PM2.5-Emissionsfaktoren ein Maßstab zur Bewertung der Transporteffizienz und Uniformität innerhalb eines Probenahmesystems darstellt. Damit können Einflüsse variierender Parameter (z. B. Evakuierungsvolumenstrom) zielführend bewertet werden. Insgesamt stehen damit Entwicklungsmethoden sowie ein ganzheitliches Prüf- und Messsystem zur Verfügung, welches durch das Konstantvolumen-Probenahmesystem und die notwendige Partikelmess-technik zur Bestimmung anzahl- und massebezogener Emissionsfaktoren repräsentiert wird.

6 Bewertung von Einflussgrößen auf das Partikelemissionsverhalten

In den vorangegangenen Abschnitten konnten zahlreiche Einflussgrößen definiert werden, welche das Partikelemissionsverhalten in unterschiedlicher Intensität beeinflussen. Darauf aufbauend folgt in diesem Abschnitt eine Einflussbewertung zum Einlauf- und Konditionierungszustand, zur Belagzusammensetzung, zum Scheibenkonzept (z. B. Beschichtung) als auch zur Belageometrie auf das Partikelemissionsverhalten. Den Abschluss bilden Untersuchungen zum Einfluss des regenerativen Bremsens.

6.1 Partikelemissionsverhalten über den tribologischen Einlaufvorgang

Aufbauend auf den Arbeiten von [GRA14, OST09, POE05, SCH06] folgt in diesem Abschnitt eine Bewertung des Partikelemissionsverhaltens über den tribologischen Einlaufprozess am Beispiel der Bremse 2 und ECE-kf (vgl. Abschnitt 5.1), ECE-kh sowie NAO-kh mit unbeschichteter Grauguss-scheibe. Als Referenz dient eine wolframkarbidbeschichtete Scheibe (HMB) mit ECE-kh (vgl. Abschnitt 5.1). Die Untersuchungen erfolgen am Beispiel des WLTC (Klasse 3) und eines 30 bar-Bremsdruckprofils ($80 \rightarrow 30 \text{ km/h}$; $T_{\text{init}} = 100 \text{ °C}$). Durch konstante Reibenergie je Zyklus bzw. Einzelbremsung wird eine zeitabhängige Analyse der Emissions- und Reibwertdynamik ermöglicht. Die Messung der Partikelanzahl erfolgt mittels CPC 2 (10 nm). Entsprechend des in Abbildung 6-1 dargestellten Emissionsverhaltens über 30x WLTC, ist für ECE-kf und ECE-kh ein Abfall um Faktor 4,7 (ECE-kf) bzw. 4,2 (ECE-kh) bis zum Erreichen eines konstanten, reproduzierbaren Emissionsniveaus (9–12 Zyklen) messbar. Der Aufbau der Reibschicht ist ab diesem Zeitpunkt abgeschlossen und ein quasistationärer Zustand (Verschleißrate; vgl. Abschnitt 2.3.1) erreicht. Für den NAO-kh liegt eine abweichende Emissionsdynamik vor. Nach einer initialen Reduktion bis Zyklus 3 folgt eine kontinuierliche Zunahme.

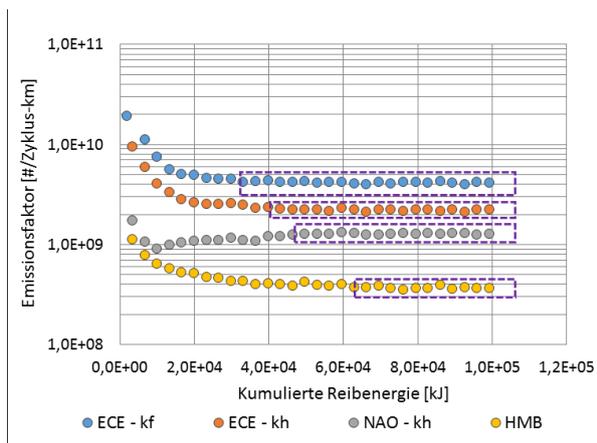


Abbildung 6-1: Einlaufverhalten: Anzahlbezogene Emissionsfaktoren vs. kumulierte Reibenergie (30x WLTC)

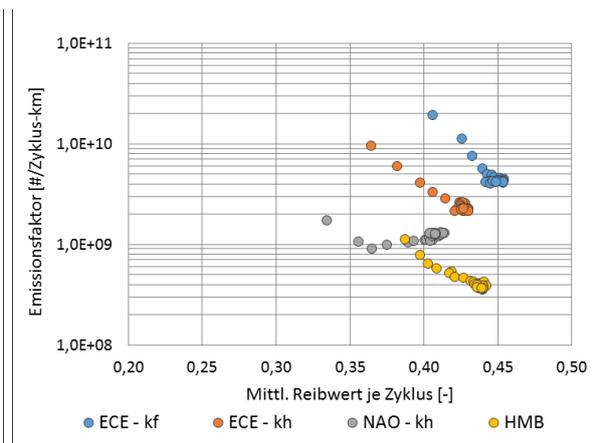


Abbildung 6-2: Einlaufverhalten: Emissionsfaktor vs. mittl. Reibwert je Zyklus (30x WLTC)

Der Einlaufvorgang erscheint ab Zyklus 14 abgeschlossen, wohingegen im Falle der HMB eine wiederum deutlich erhöhte Anzahl an Zyklen (Reibenergie) zum Erreichen eines konstanten Emissionsniveaus erforderlich ist. Die in Abbildung 6-2 den anzahlbezogenen Emissionsfaktoren gegenübergestellten mittleren Reibwerte je Zyklus steigen global über die Dauer des

tribologischen Einlaufvorganges an und weisen materialspezifische Verläufe auf. Wenngleich für den NAO-kh eine abweichende Dynamik bestimmt werden kann, ist grundsätzlich eine Korrelation zwischen Reib- und Verschleißverhalten je Belag-Scheibenkonzept über den tribologischen Einlaufvorgang zu bestätigen. Die HMB weist unter konstantem Emissionsniveau einen um Faktor 10 geringeren Emissionsfaktor im Vergleich zum ECE-kf und Grauguss-scheibe bei geringfügig reduziertem Reibwert auf. Damit ist festzuhalten, dass die bis zum Abschluss des tribologischen Einlaufvorganges umgesetzte Reibenergie ein Materialcharakteristikum darstellt, welches besonders von der Verschleißrate beeinflusst wird. Vergleichbare Aussagen können für das 30 bar-Druckprofil (vgl. Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4) getroffen werden, wobei aus der abweichenden Beanspruchung eine abweichende Emissionsdynamik folgt. Dabei können charakteristische Verläufe der Emissionskennzahlen und mittleren Reibwerte bestimmt werden. Ein reproduzierbares Emissions- und Reibwertniveau liegt für den ECE-kf und ECE-kh nach ca. 100 Bremsungen vor, wohingegen für die HMB etwa 250 Bremsungen erforderlich sind. Im direkten Vergleich fällt die erforderliche Reibenergie gegenüber dem WLTC geringer aus, was auf eine erhöhte Reibleistung zurückzuführen ist.

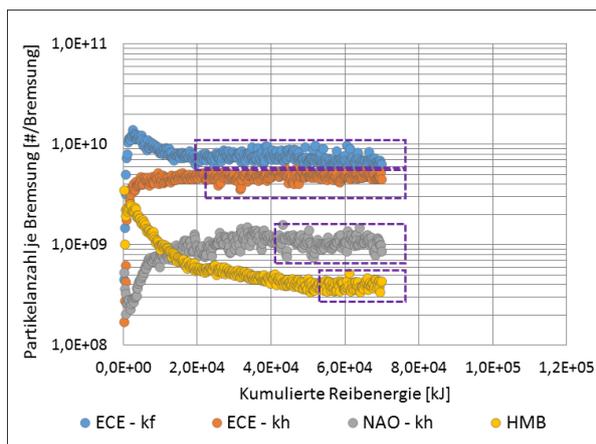


Abbildung 6-3: Einlaufverhalten: Anzahlbez. Emissionskennzahl vs. kumulierte Reibenergie (350 x 80→30 km/h)

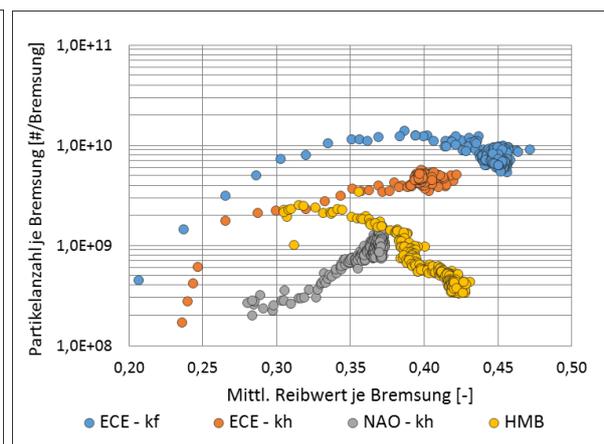


Abbildung 6-4: Einlaufverhalten: Partikelanzahl vs. mittl. Reibwert je Bremsung (350 x 80→30 km/h)

Aufbauend auf das in Abschnitt 4.2.4 beschriebene Verhältnis zwischen Verschleißmasse und massebezogenen Emissionsfaktoren ist in Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 der Massenverlust für die untersuchten Reibsysteme gegenübergestellt. Der Massenverlust der Scheibe beträgt im Falle des ECE-kf das etwa 2-fache des Massenverlustes je Belag. Im Falle der HMB ist dieser Anteil deutlich reduziert (bis 30 %), was darauf hinweist, dass der Gesamtverschleiß zum überwiegenden Anteil durch die Beläge repräsentiert wird. Die über den Verlauf eines WLTC umgesetzte Reibenergie beträgt 3.305,2 kJ (VA). Die über die 30 bar-Bremsdruckprofile umgesetzte Energie entspricht 199,9 kJ, die Reibleistung liegt im Bereich zwischen 60,6 kW (grüner Zustand, maximale Bremsdauer; 5,98 W/mm²) und 28,9 kW (2,86 W/mm²). Damit ist die erforderliche Reibenergie je Belag-Scheibenkonzept als individuelle Größe zu bewerten und die Modellierung des Reib- und Verschleißverhaltens, insbesondere in Bezug auf alternative Reibmaterialien, als Herausforderung anzusehen (vgl. Abschnitt 6.2).

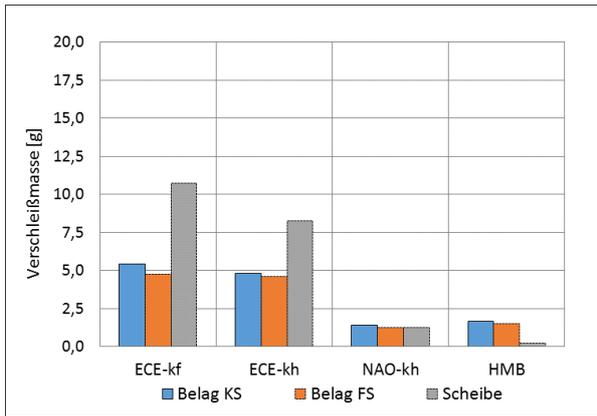


Abbildung 6-5: Massenverschleiß an Scheibe und Belägen über 30x WLTC-Zyklus

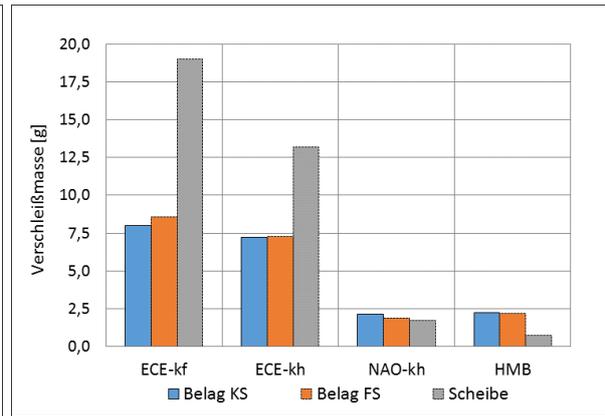


Abbildung 6-6: Massenverschleiß an Scheibe und Belägen über 350 x 30 bar-Bremsdruckprofil (80 → 30 km/h)

Zur Bewertung der Partikelgrößenverteilung über den tribologischen Einlaufprozess, ist in Abbildung 6-7 der Verlauf des CMD je Bremsung und Belag-Scheibenkonzept über 50x 30 bar-Bremsdruckprofil, erfasst mittels ELPI (vgl. Abschnitt 5.2), gegenübergestellt. Nach einem teils starken Abfall in der initialen Phase (Bremsung 1-3) ist global ein teils geringer Anstieg bis zum Abschluss des tribologischen Einlaufvorganges messbar, welcher primär als Folge der in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Sensitivität des Messsystems zu werten ist.

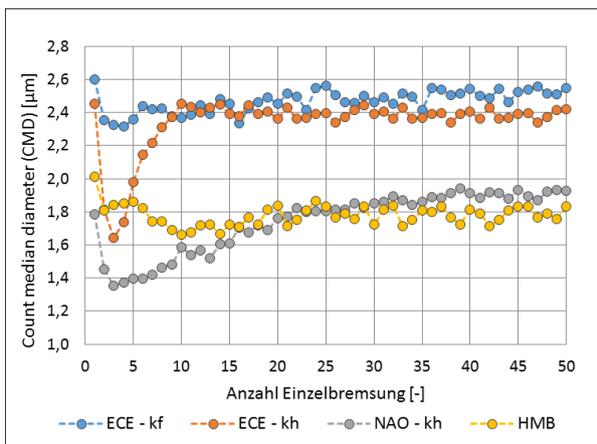


Abbildung 6-7: Einlaufverhalten: CMD über 30 bar-Bremsdruckprofil (80 → 30 km/h)

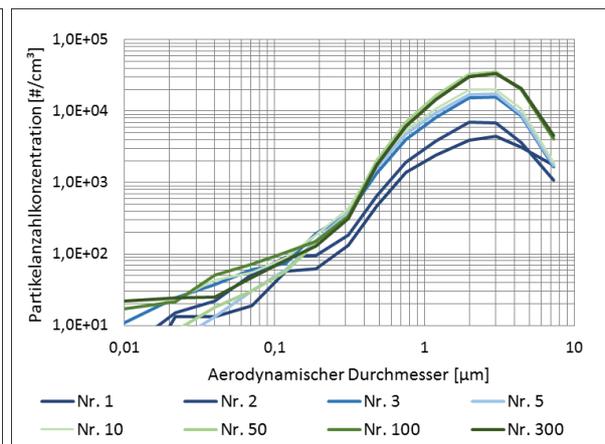


Abbildung 6-8: Einlaufverhalten: Mittl. GVD über 30bar-Bremsdruckprofil (80 → 30 km/h) – ECE-kf

Ein eindeutiger Nachweis kann damit nicht erbracht werden. Dennoch können insgesamt erhöhte CMDs für ECE-kf und ECE-kh bestimmt werden, welche als Folge eines erhöhten Anteils an Abrasivstoffen (z. B. Eisenspäne) zu erklären sind. Aus dem Vergleich der Größenverteilungsdichten (vgl. Abbildung 6-8) geht für den ECE-kf, ECE-kh und NAO-kh eine erhöhte Konzentration an Partikeln > 3 µm über die Bremsung 1 hervor, welche über den weiteren Verlauf abnimmt. Über den Verlauf der WLTC-Zyklen konnten keine signifikanten Änderungen nachgewiesen werden, was die Erkenntnisse aus den in Abbildung 5-65 und Abbildung 5-66 dargestellten Verläufen massebezogener Verhältnisfaktoren bestätigt. Abschließend erfolgt eine Abschätzung über den Einfluss einer auf dem Reibring aufgetragenen Korrosionsschutzschicht auf den Verlauf des tribologischen Einlaufvorganges. Die Untersuchung sieht einen

Vergleich zwischen beschichteter und unbeschichteter Grauguss-scheibe mit jeweils werkneuen Belägen (ECE-kh) vor. Gemäß Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10 können je Test Abweichungen von bis zu Faktor 5 erfasst werden. Unter Zunahme der je Test umgesetzten Reibenergie amortisiert sich der Einfluss, d. h. die Emissionskennzahlen nähern sich den Referenzwerten an. Damit ist festzuhalten, dass durch die Beschichtung der tribologische Einlaufprozess temporär beeinflusst wird und die notwendige Reibenergie zum Einstellen eines stationären Zustandes ansteigt. Auch für alternative Reibmaterialien, bei denen die Kontaktfläche durch eine hohe Härte und Verschleißbeständigkeit gekennzeichnet ist, konnte die Notwendigkeit eines erhöhten Energieumsatzes zur Ausbildung der Reibschicht und Reduktion der mikroskopischen Kontaktdrücke nachgewiesen werden.

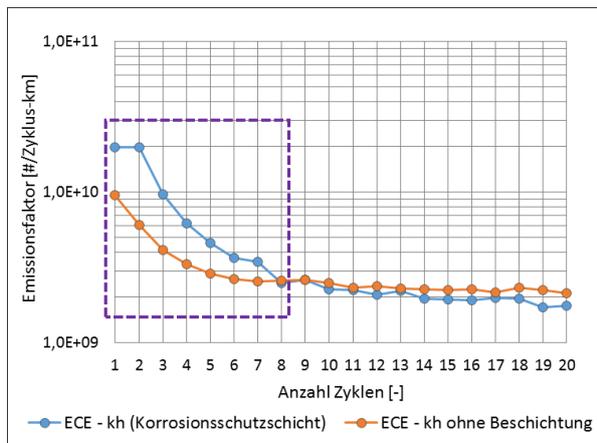


Abbildung 6-9: Einlaufverhalten: Anzahlbezogener Emissionsfaktor mit/ohne Korrosionsschutzschicht – 20x WLTC (ECE-kf)

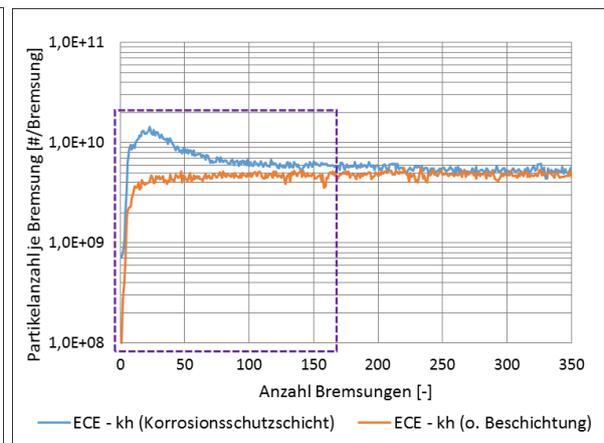


Abbildung 6-10: Einlaufverhalten: Emissionskennzahl mit/ohne Korrosionsschutzschicht – 80 → 30 km/h, 30 bar (ECE-kf)

Zu beachten ist dies bei der Definition einer robusten Einlaufprozedur für den Fall regulatorischer Messungen, für die es erforderlich ist, einem der Gesamtlebensdauer repräsentativen Emissionsfaktor zu bestimmen. Anstelle einer vordefinierten Anzahl an Testzyklen empfiehlt sich eine statistische Auswertung anhand einer Emissions-Trendanalyse (vgl. Abschnitt 8.2).

6.2 Vergleich unterschiedlicher Belag- und Scheibenkonzepte

Auf Grundlage der in Abschnitt 6.1 beschriebenen Belag-Scheibenkonzepte (Bremsse 2) folgt in diesem Abschnitt eine Untersuchung zur Korrelation von Beanspruchungsparameter und Emissionscharakteristik. Die Untersuchung erfolgt am Beispiel der AK-Master-Druckreihen, die Messung der Partikelanzahl mittels CPC 2 (10 nm). Die Konditionierung zwischen den einzelnen Druckreihen erfolgt zur Gewährleistung vergleichbarer Prüfbedingungen anhand des in Abschnitt 6.1 beschriebenen 30 bar-Bremsdruckprofils. Gemäß der in Abbildung 6-11 gegenübergestellten Emissionskennzahlen (Mittelwert aus jeweils 3 Messungen) der Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5 liegt ein dynamisches Emissionsverhalten je Belag-Scheibenkonzept vor, welches primär von der Initialgeschwindigkeit bzw. der Reibenergie bestimmt wird. Mit Ausnahme des ECE-kf ist über die Druckreihen 4.1–4.3 (10–80 bar) global ein näherungsweise konstantes Emissionsniveau messbar. Aus einer weiteren Zunahme der Initialgeschwindigkeit

folgt ein teils exponentieller Anstieg der Emissionskennzahl (Druckreihe 4.4), welcher dem in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Temperatureinfluss (lokale Spitzentemperaturen) bei gleichzeitiger Änderung der modalen Verteilung für ECE-kf, ECE-kh und NAO-kh zuzuschreiben ist.

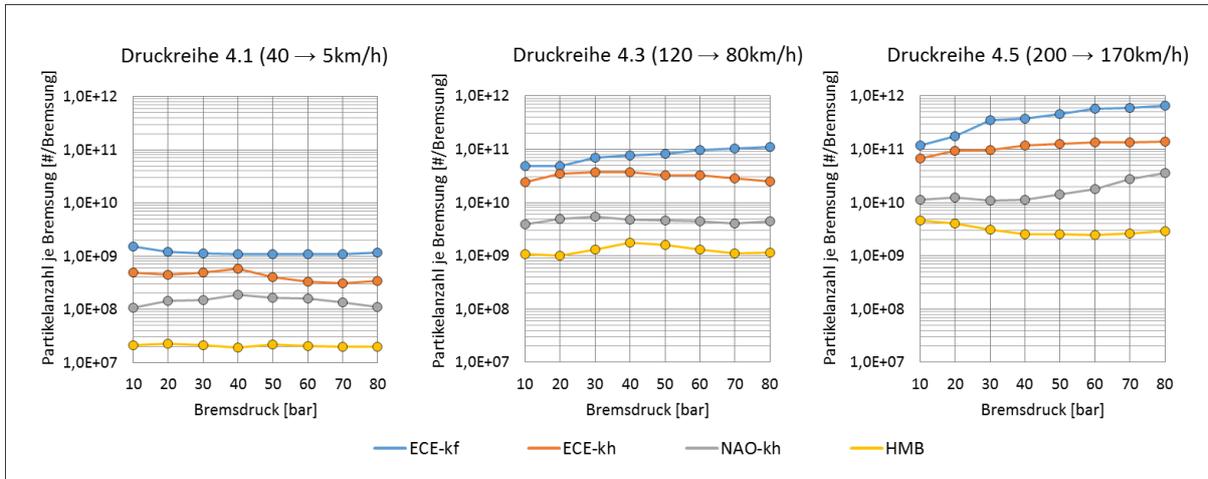


Abbildung 6-11: Vergleich der Emissionskennzahl über AK-Master-DR 4.1, 4.3 und 4.5 [AUG20, AUG19a, AUG19b]

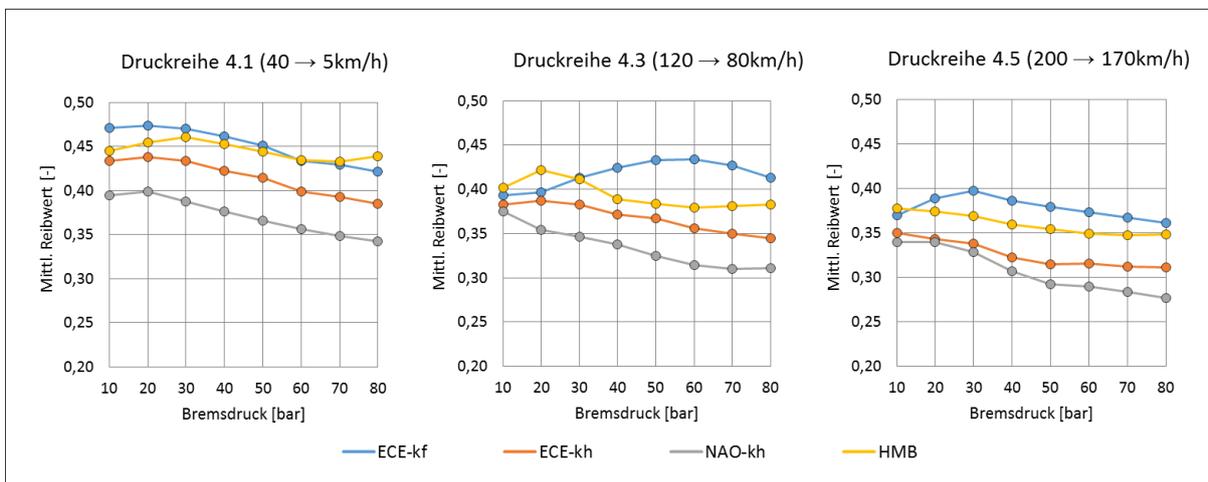


Abbildung 6-12: Vergleich der Reibwerte über AK-Master-Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5

Für die HMB ist erst über die Druckreihe 4.5 eine Tendenz zum Anstieg der Emissionskennzahl infolge einer Änderung der modalen Verteilung nachweisbar. Damit ist der hartmetallbeschichteten Scheibe eine erhöhte Stabilität gegenüber mechanischer Beanspruchung zuzuweisen, wodurch im Vergleich zur konventionellen Grauguss-scheibe mit ECE-kf Emissionsminderungspotenziale bis > 90 % möglich sind. Neben Vorteilen in Bezug auf den partikelförmigen Verschleiß zeichnet sich die HMB gemäß Abbildung 6-12 durch den teils höchsten mittleren Reibwert (Auswertung ab 90 % Bremsdruck-Sollwert) aus. Insgesamt sinkt der Reibwert unter Zunahme von Reibungsenergie und Flächenpressung, was die Erkenntnisse der Literatur bestätigt. Für die untersuchten Scheibenkonzepte können jeweils charakteristische Korrelationen zwischen der Emissionskennzahl und dem Reibwert abgeleitet werden. Aufbauend auf den in Abschnitt 6.1 beschriebenen Erkenntnissen zum Reib- und Verschleißverhalten über den tribologischen Einlaufvorgang können infolge der stark abweichenden Dynamik alternativer Reibmaterialien jedoch keine globalen Zusammenhänge abgeleitet werden. Damit

sind die in [OST09] und [OST10] aufgeführten und teils vereinfachten Modellansätze zu überprüfen. Besonders stellen die Beschreibung des Reib- und Verschleißverhaltens sowie der damit gekoppelte Partikelbildungsprozess auf mikroskopischer Ebene einen notwendigen Forschungsschwerpunkt dar, der zur Erweiterung bestehender Modelle erforderlich ist. Ansätze dafür sind in [GRA14] und [KOL19] enthalten.

Eine Gegenüberstellung von Emissionskennzahl und geschwindigkeitsabhängiger Reibenergie ist Abbildung 6-13 zu entnehmen. Für die untersuchten Belag-Scheibenkonzepte kann ein näherungsweise linearer Verlauf der Emissionskennzahlen unter Zunahme der Reibenergie bestimmt werden. Aus einem Anstieg der Initialgeschwindigkeit von 40 km/h auf 80 km/h resultiert eine Erhöhung der Reibenergie um Faktor 3 bei gleichzeitiger Erhöhung der Emissionskennzahl um Faktor 11,5 (ECE-kf). Unter weiterer Zunahme ist für die HMB ein abflachender Anstieg messbar, wohingegen für den ECE-kf infolge einer Änderung der modalen Verteilung der Anstieg deutlich stärker ausfällt. Abbildung 6-14 stellt am Beispiel des ECE-kf die Emissionskennzahl und die Reibleistung gegenüber. Daraus ist abzuleiten, dass unter Zunahme des Bremsdruckes die Reibleistung erwartungsgemäß ansteigt, wohingegen der Einfluss auf die Emissionskennzahl klein ist.

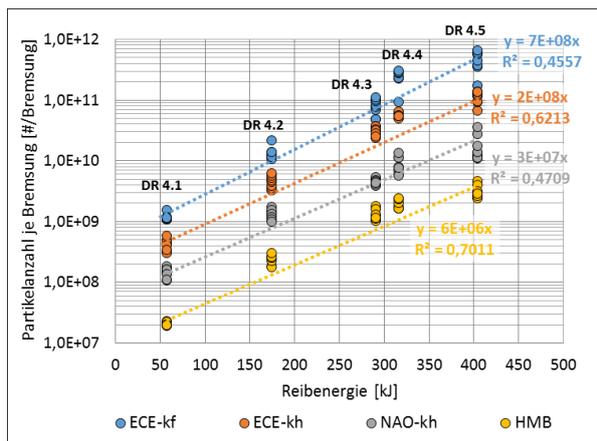


Abbildung 6-13: Partikelanzahl je Bremsung über Reibenergie – AK-Master-Druckreihen 4.1–4.5

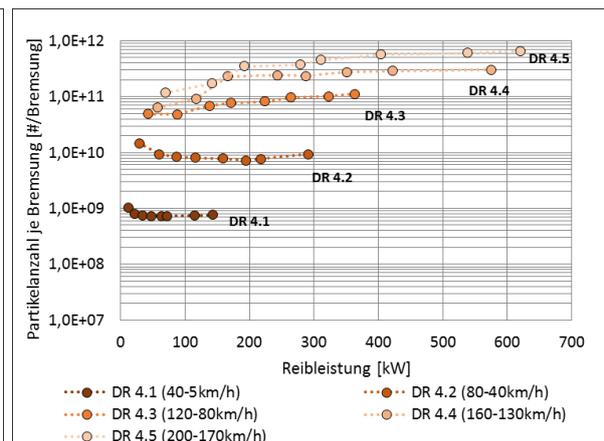


Abbildung 6-14: Partikelanzahl je Bremsung über Reibleistung – AK-Master-Druckreihen 4.1–4.5 – ECE-kf

Zur weiteren Verifizierung dienen die in Abbildung 6-15 (ECE-kf) und Abbildung 6-16 (HMB) gegenübergestellten Verteilungsdichten über die Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5. Auf die Darstellung für ECE-kh und NAO-kh wird verzichtet, da keine wesentlichen Änderungen zu den in Abschnitt 5.2.2 (vgl. Abbildung 5-48 und Abbildung 5-49) dargestellten Größenverteilungen vorliegen. Neben einer monomodalen Verteilung über niedrige Geschwindigkeitsbereiche ist erneut die Änderung der modalen Verteilung nachweisbar. Im Falle des ECE-kf liegt die zweite Mode über einen Größenbereich zwischen 10 nm und 0,2 µm bei einem Maximum zwischen 20 und 60 nm vor, wobei die maximalen Konzentrationen der zwei Moden vergleichbar sind. Für die HMB liegt ein Konzentrationsanstieg der ultrafeinen Fraktion mit einem Maximum bei 10 nm über Druckreihe 4.5 (200 → 170 km/h) vor. Gemäß Abschnitt 5.2.2 ist als Erklärung der charakteristischen Verteilungsdichten primär die Belagzusammensetzung, insbesondere der

Anteil und die Verteilung an Abrasivstoffen in der Belagmatrix (z. B. Eisenspäne), die daraus resultierenden lokalen Kontaktflächen (Patchdynamik) und Temperaturspitzen zu nennen.

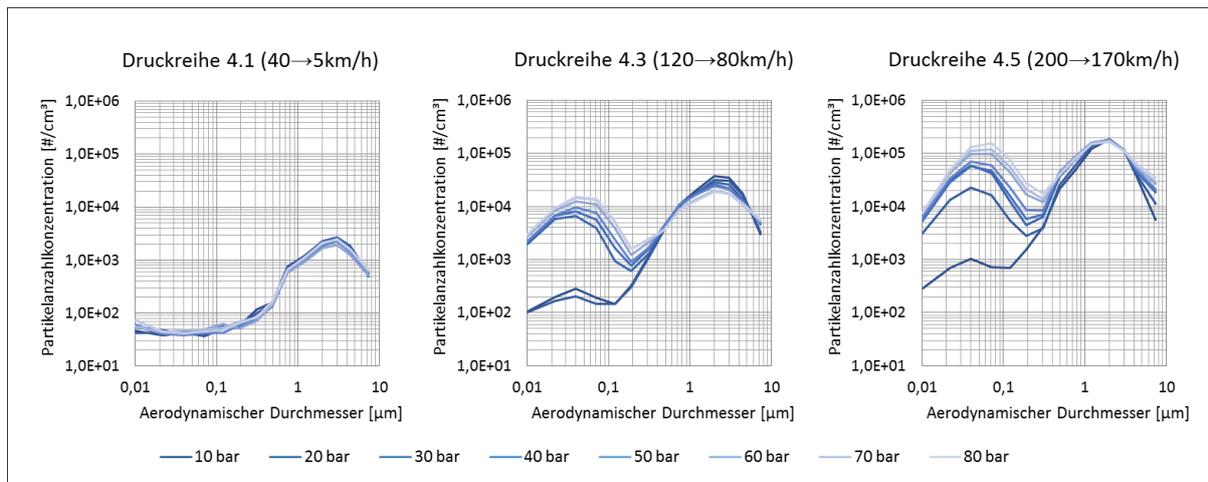


Abbildung 6-15: Mittlere Größenverteilungsdichte über AK-Master-Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5 – ECE-kf

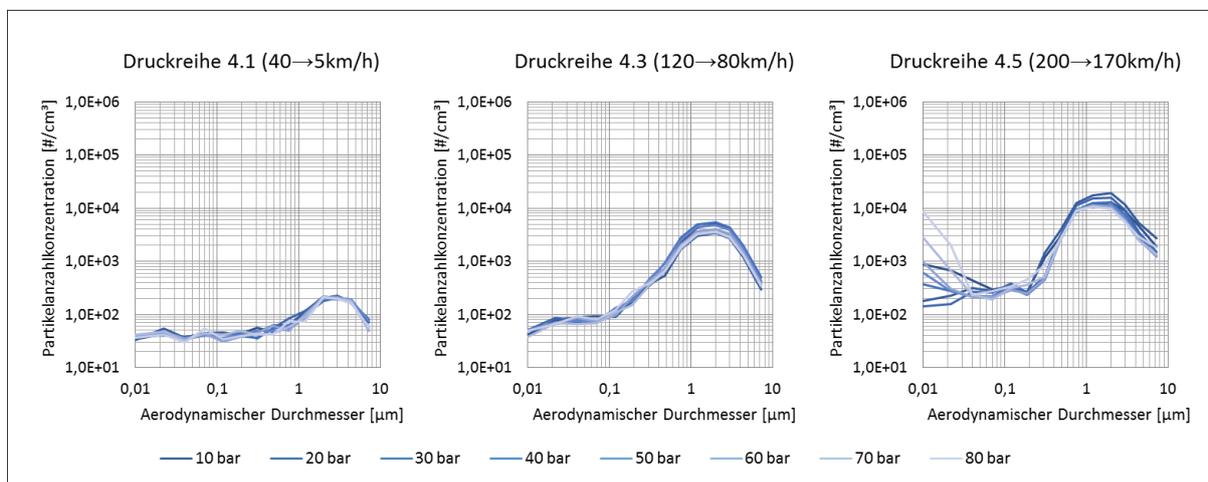


Abbildung 6-16: Mittlere Größenverteilungsdichte über AK-Master-Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5 – HMB

Zur Verifizierung der Temperaturverteilung und Bewertung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit folgen in Abbildung 6-17 bis Abbildung 6-20 Vergleiche mittels Thermografiecamera. Entsprechend Abschnitt 5.2.2 variieren die Emissionsgrade von Materialien im Infrarotspektrum, wodurch für die unterschiedlichen Scheibenkonzepte eine abweichende Wärmestrahlung zu erwarten ist. Daher liegt der Fokus auf der Bewertung der Temperaturverteilung unter Parametervariation. Die Grauguss-scheibe weist unter hoher Reibenergie und niedrigen bis mittleren Bremsdrücken eine im Vergleich zur HMB erhöhte Tendenz zur Hotband-Bildung im Bereich des inneren Reibringes auf, was die erhöhte Tendenz zur Änderung der modalen Verteilung (vgl. Abbildung 6-15) erklärt. Die Temperaturprofile der HMB zeigen eine homogenere Verteilung bei gleichzeitig reduzierter Tendenz zur Hotband-Bildung. Vergleichbar zu Abbildung 5-13, sind für ECE-kf, insbesondere in Abbildung 6-21, Verschleißpartikel $\gg 10 \mu\text{m}$ infolge tribochemischer Reaktionen zu erkennen, deren Intensität unter Zunahme der Reibleistung ansteigt. Die Intensität der Partikel $\gg 10 \mu\text{m}$ korreliert mit der Anzahl und Positionierung der Hotbands. Im Falle der HMB sind diese Fragmente zu keinem Zeitpunkt erkennbar.

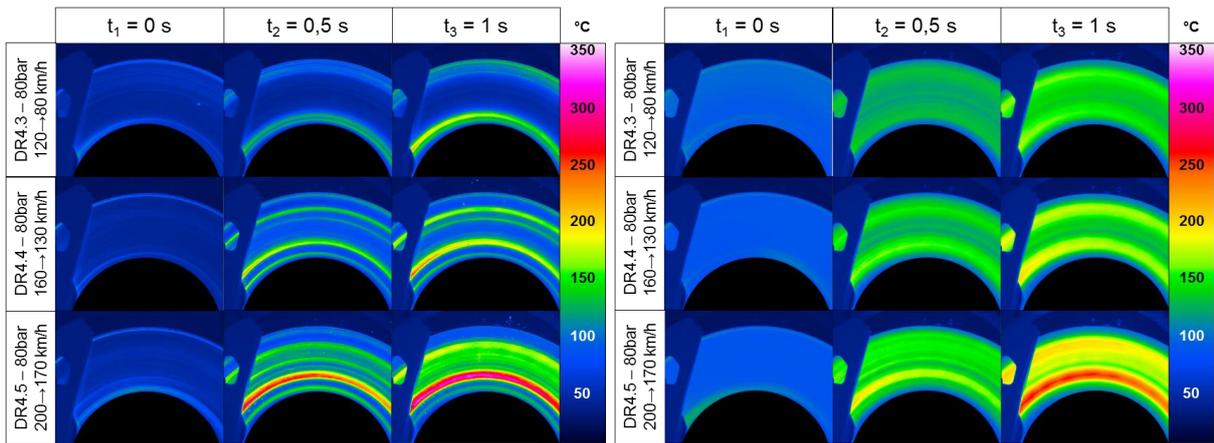


Abbildung 6-17: Temperaturverteilung über die Reibfläche – DR 4.3–4.5 bei 30 bar (ECE-kf)

Abbildung 6-18: Temperaturverteilung über die Reibfläche – DR 4.3–4.5 bei 30 bar (HMB)

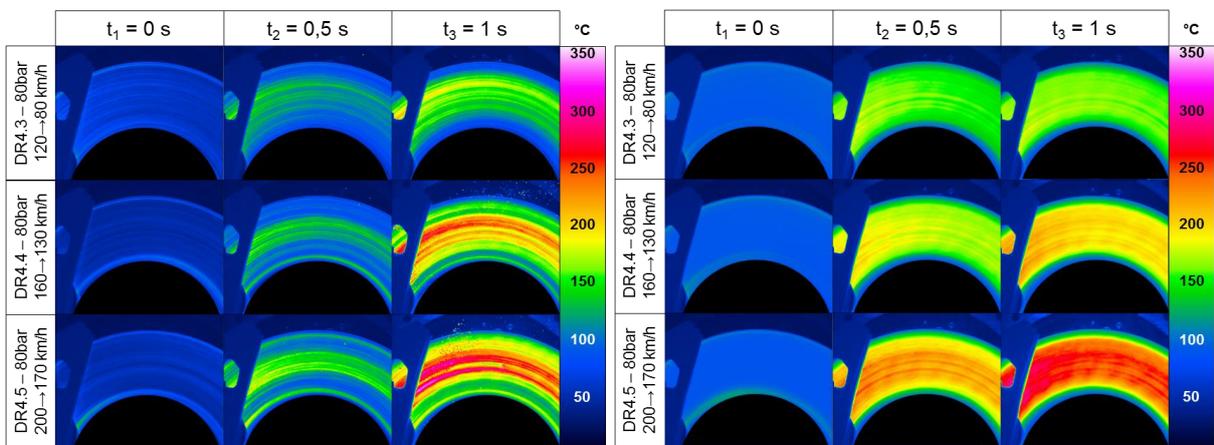


Abbildung 6-19: Temperaturverteilung über die Reibfläche – DR 4.3 – 4.5 bei 80 bar (ECE-kf)

Abbildung 6-20: Temperaturverteilung über die Reibfläche – DR 4.3 – 4.5 bei 80 bar (HMB)

Gemäß der chemischen Analyse größenfraktionierter Partikel (vgl. Abschnitt 5.1; ECE-kh) kann der überwiegende Anteil der über die Druckreihen emittierten Partikel chemisch dem Eisen (Scheibe und Belag) zugeordnet werden.

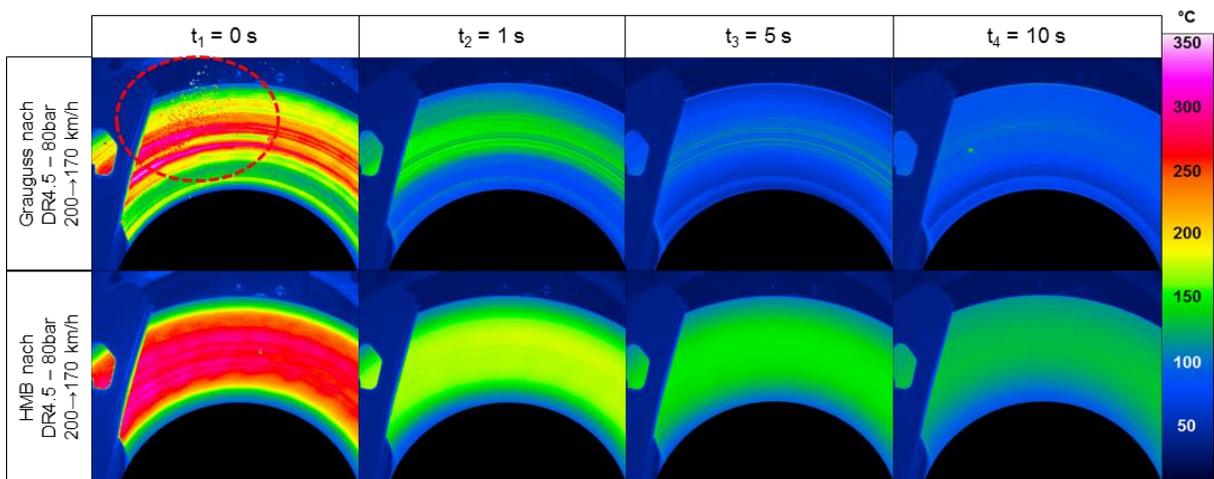


Abbildung 6-21: Einfluss der Wärmeleitung auf die Temperaturverteilung nach Abschluss der Bremsung

Die Temperatur der Verschleißpartikel ist vergleichbar zu den Spitzentemperaturen der Hotbands. Neben Bestandteilen der Reibmatrix (Kupfer und Zinnsulfid als feste Schmierstoffe) ist

insbesondere die Verschleißbeständigkeit der Scheibe dafür verantwortlich. Daraus resultiert jedoch der Nachteil einer reduzierten Wärmeleitfähigkeit, was sich besonders unter hohen Reibenergien (> 200 kJ) nachteilig gegenüber konventionellen Graugussscheiben auswirkt. Entsprechend der in Abbildung 6-21 dargestellten Abkühlphase liegt ca. 10 s nach Abschluss des Bremsvorganges ein deutlicher Temperaturunterschied im oberflächennahen Bereich vor.

6.3 Einfluss der Konditionierung auf die Emissions- und Reibwertdynamik

Zur Verifizierung des Einflusses variierender Konditionierungsprozeduren auf das Emissionsverhalten folgt in diesem Abschnitt eine Variation von Initialtemperatur und Bremsdruck gemäß der in Abbildung 6-22 dargestellten Prozedur am Beispiel einer Graugussscheibe mit ECE-kf (Bremse 2). Dabei ist die Phase der Konditionierung (Phase 1) durch eine definierte thermisch-mechanische Beanspruchung (Reibenergie je Bremsung: 199,9 kJ) zum Zeitpunkt eines bereits abgeschlossenen tribologischen Einlaufvorganges definiert.

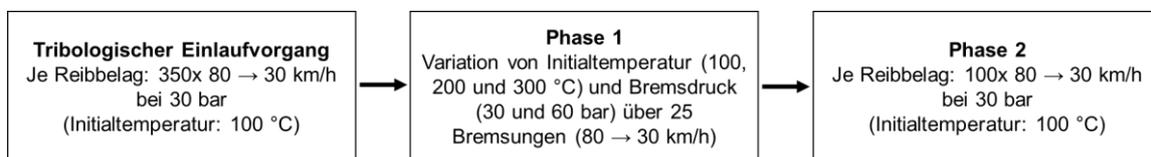


Abbildung 6-22: Ablaufplan zur Bewertung des Einflusses der thermisch-mechanischen Konditionierung

Zur Gewährleistung vergleichbarer Initialbedingungen kommt je Parameterstufe die identische Einlaufprozedur für jeweils neue Reibpartner der gleichen Produktionscharge zur Anwendung. Die Versuchsreihe bei 30 bar und 100 °C dient als Referenz (identisch zur Phase des tribologischen Einlaufvorganges). Die Bewertung des Einflusses der Konditionierung erfolgt anhand von 100 Einzelbremsungen (Phase 2) in direkter Abfolge (gesamte Reibenergie $1,99E+04$ kJ). Die in Abbildung 6-23 gegenübergestellten Emissionskennzahlen (Phase 1), erfasst mittels 23 nm-CPC (CPC 3) zur Eliminierung von Partikeln des ultrafeinen Spektrums, verdeutlichen je Parameterstufe deutliche Unterschiede.

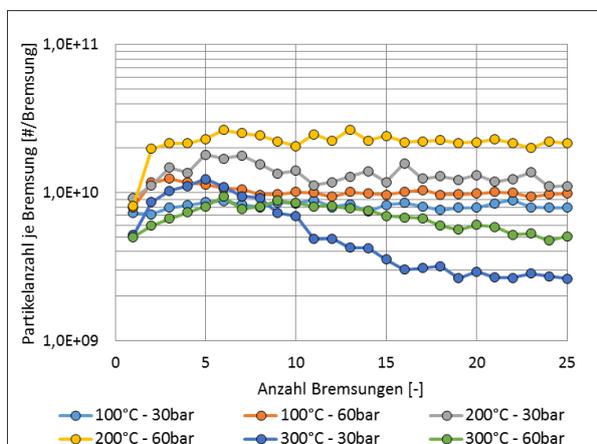


Abbildung 6-23: Partikelanzahl je Bremsung während Parametervariation (Phase 1) bei 80 → 30 km/h

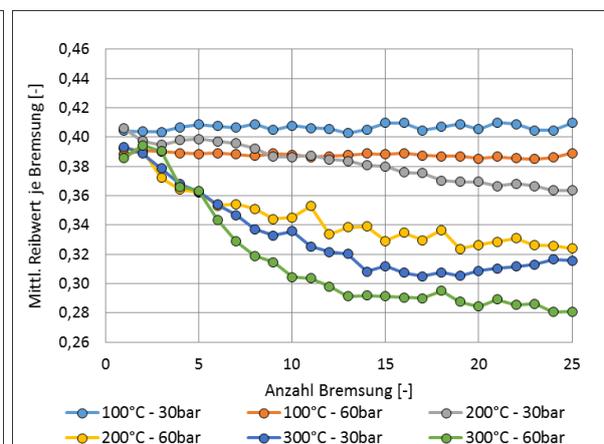


Abbildung 6-24: Reibwertverlauf während Parametervariation (Phase 1) bei 80 → 30 km/h

Der Verlauf der Partikelanzahl je Bremsung ist unter Zunahme von Temperatur und Bremsdruck nichtlinear. Nach Abschluss der Phase 1 kann ein Unterschied von bis zu Faktor 10

nachgewiesen werden, wobei das niedrigste Emissionsniveau für den Fall maximaler thermischer Beanspruchung (300 °C) nachweisbar ist. Gemäß Abbildung 6-24 kann für Temperaturen bis 200 °C (30 bar) ein nahezu konstanter Verlauf des Reibwertes beobachtet werden, wobei unter höchster Beanspruchung eine kontinuierliche Reduktion auf bis zu 0,28 vorliegt (6–7 Einzelbremsungen zur Erreichung einer Initialtemperatur von 330 °C). Ein direkter Zusammenhang zwischen Emissions- und Reibwertcharakteristik ist aus den Ergebnissen erneut nicht abzuleiten. Es kann jedoch festgehalten werden, dass für Temperaturen > 200 °C und Bremsdrücke > 30 bar das Emissions- und Reibwertniveau signifikant abfällt. Aus Abbildung 6-25 und Abbildung 6-26 ist abzuleiten, dass die Intensität der Konditionierung das Emissions- und Reibwertniveau über nachfolgende Bremsungen (Phase 2) in hohem Maße beeinflusst.

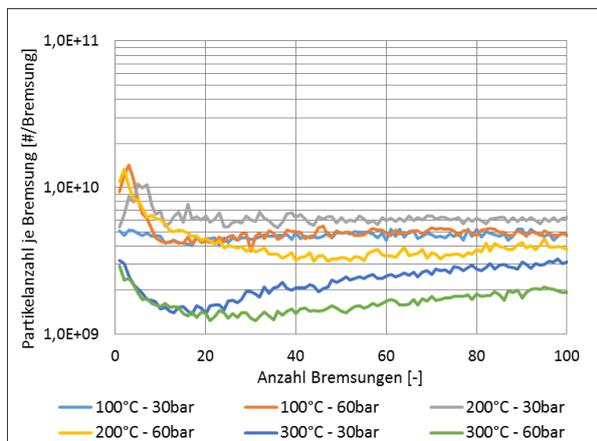


Abbildung 6-25: Partikelanzahl je Bremsung nach Parametervar. (Phase 2) bei 80 → 30 km/h, 30 bar und 100 °C

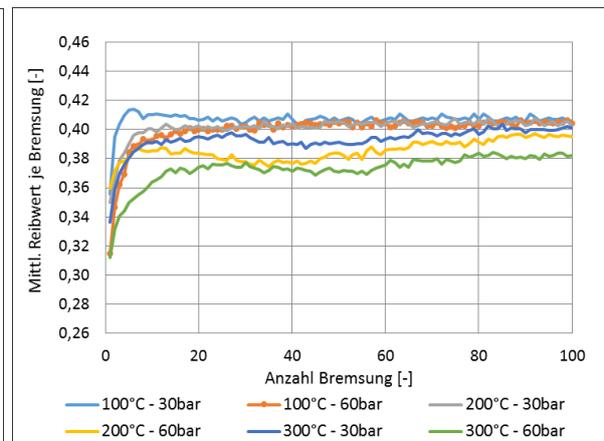


Abbildung 6-26: Reibwertverlauf nach Parametervariation (Phase 2) bei 80 → 30 km/h, 30 bar und 100 °C

Die Emissionskennzahlen liegen im Falle einer Konditionierung auf 300 °C um etwa Faktor 4 unterhalb des Referenzwertes (100 °C, 30 bar). Die Erholung der Reibschicht erfolgt kontinuierlich unter Zunahme des Energieumsatzes. Eine Konditionierung mit 100 Einzelbremsungen (Reibenergie $1,99\text{E}+04$ kJ) ist jedoch zur globalen Annäherung der Emissions- und Reibwertniveaus unzureichend. Eine Annäherung auf $\pm 20\%$ an das Emissionsniveau der Referenz kann für die Konditionierung (Phase 1) bei 300 °C und 60 bar erst nach ca. 300 Bremsungen beobachtet werden. Es gilt, dass umso höher die Beanspruchung (Temperatur und Bremsdruck) in Phase 1 ist, desto höher die Schädigung der Reibschicht, die Beeinflussung des Emissionsverhaltens sowie die umzusetzende Reibenergie zur Regeneration des Reibsystems (Phase 2) sind. Zur Bewertung der Auswirkung auf den Reibkontakt dienen die in Abbildung 6-27 gegenübergestellten Temperaturprofile für die Phasen der ersten Bremsung der Phase 1 auf 300 °C (30 bar) sowie der ersten und letzten Bremsung (Nr. 100) der Phase 2. Zu Beginn der Phase 1, d. h. nach Abschluss des tribologischen Einlaufvorganges, erfolgt die Momentenübertragung großflächig über den Reibradius. Infolge der thermischen Konditionierung wird der Reibkontakt bzw. die Momentenübertragung beeinflusst, was sich in Form eines abweichenden Temperaturprofils über den inneren und äußeren Reibradius offenbart. Über den Verlauf der Phase 2 nähern sich die Kontaktbedingungen dem Ausgangszustand an.

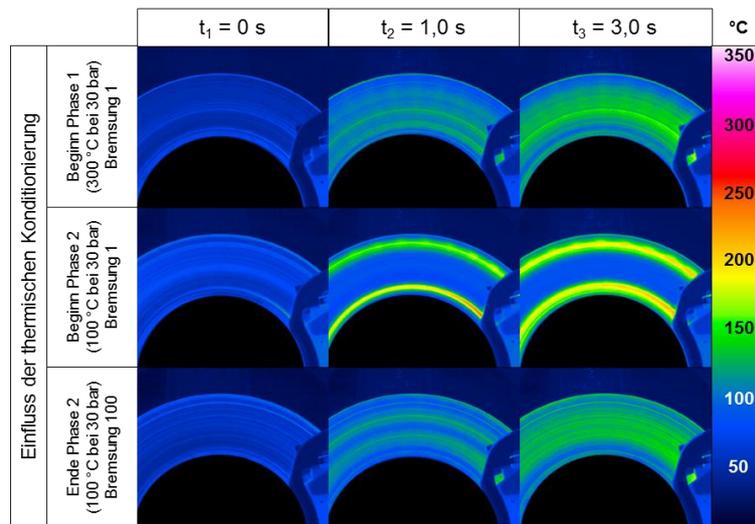


Abbildung 6-27: Temperaturprofil der Reibfläche durch den Einfluss der Vorkonditionierung (300 °C) – ECE-kf

Für mögliche regulatorische Messungen ist damit besonderer Wert auf die Einlauf- und Konditionierungsprozedur zu legen. Vorteilhaft ist eine Beanspruchung identisch zum Testzyklus der Emissionsmessung. Eine Erhöhung der thermisch-mechanischen Beanspruchungen kann die Repräsentativität des Emissionsniveaus negativ beeinflussen und ist damit zu vermeiden.

6.4 Einfluss der Belaggeometrie

Gemäß Abbildung 6-14 ist die Reibenergie bezüglich der Partikelanzahl je Bremsung die bestimmende Größe, wohingegen der Einfluss der Reibleistung in einem konstanten Geschwindigkeitsbereich klein ist. Zur Bewertung der flächenbezogenen Reibleistung folgt in diesem Abschnitt ein Vergleich anhand variierender Belaggeometrien bzw. Kontaktflächen A_B identischer Belagzusammensetzung (ECE-kh; Bremse 1) und konstantem effektiven Reibradius.

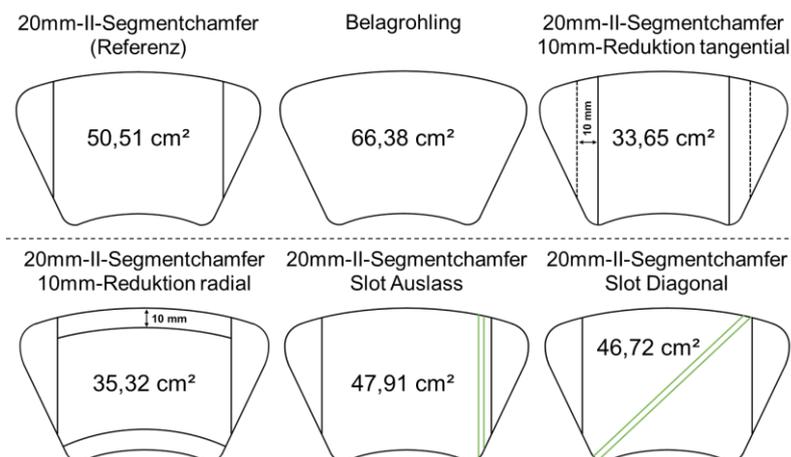


Abbildung 6-28: Getestete Belaggeometrien bzw. Belag-Kontaktflächen A_B (KS) – Scheibendrehung nach rechts

Die Referenz (Serienbelag) bzw. Ausgangsbasis für geometrische Änderungen stellt gemäß Abbildung 6-28 ein 20 mm-II-Segmentchamfer-Belag dar. Zusätzlich wird ein Belagrohling ohne Chamfer, Beläge mit Reduktion der Belagfläche in radialer und tangentialer Richtung sowie Beläge mit integrierten Slots in den Globalvergleich integriert. Gemäß der in Abbildung 6-29 dargestellten Emissionsfaktoren je WLTC (10 nm-CPC/CPC2) ist der Belagrohling (ohne

Chamfer) durch eine deutlich erhöhte Partikelanzahl gegenüber dem Referenzbelag charakterisiert, was durch die Belaglänge und einem fortschreitenden Verschleißprozess zu erklären ist. Demgegenüber steht für die Beläge mit integrierten Slots zu Beginn der Untersuchung ein deutlich reduzierter Emissionsfaktor, welcher unter Zunahme der Zyklenanzahl infolge einer stetigen Beladung der Slots signifikant ansteigt. Aus Messungen mittels Thermografiekamera ist abzuleiten, dass die in den Slots befindlichen Partikel zu einem steigenden Anteil aus den in radialer Richtung orientierten Öffnungen emittiert werden (Vergleich unten).

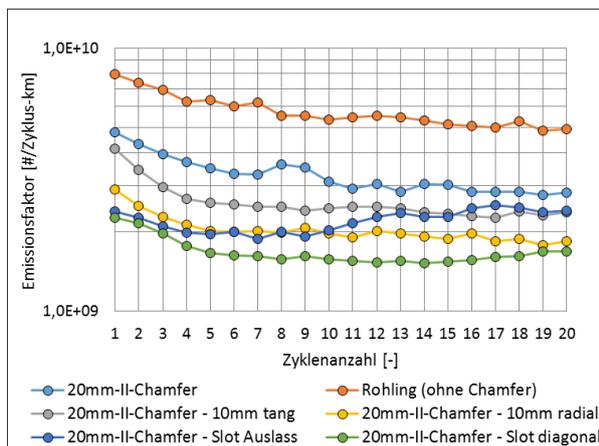


Abbildung 6-29: Anzahlbez. Emissionsfaktoren über 20x WLTC-Zyklus – Variation der Belagegeometrie (ECE-kh)

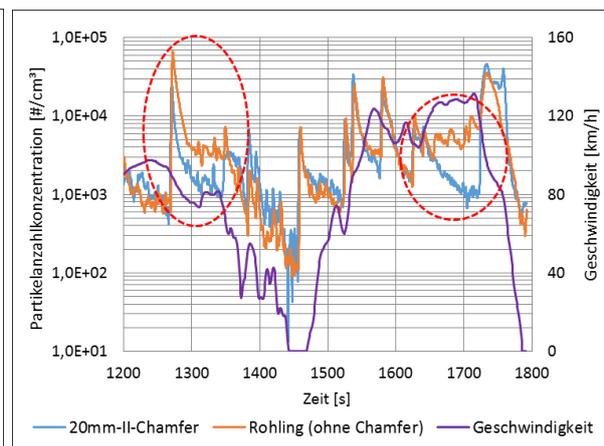


Abbildung 6-30: Konzentrationsverlauf Geometrievariation – WLTC – 20 mm-II-Serie vs. Rohling (ECE-kh)

Auffällig ist zudem ein reduzierter Emissionsfaktor für den Belag 20 mm-II-Chamfer – 10 mm radial, welcher eine um 30 % reduzierte Reibfläche (Längen-Höhen-Verhältnis) gegenüber dem Referenzbelag aufweist, jedoch durch eine erhöhte flächenbezogene Reibarbeit charakterisiert ist. Signifikante thermische Unterschiede und Änderungen der Größenverteilungsdichten (monomodale Verteilung) infolge reduzierter Kontaktflächen können am Beispiel des WLTC nicht ausgemacht werden. Die Beläge mit integrierten Slots weisen die insgesamt niedrigsten CMDs auf (Slot Auslass: $2,01 \mu\text{m}$). Demnach begünstigen die integrierten Slots die Aufnahme der innerhalb des Kontaktbereiches befindlichen Partikel. Es kommt zur Abscheidung innerhalb des Hohlraumes. Zur Bewertung des Einflusses von Sekundärpartikelemissionen über den Verlauf eines WLTC (Zyklusnummer: 10) ist in Abbildung 6-30 der Konzentrationsverlauf exemplarisch für den 20 mm-II-Segmentchamfer als Referenzbelag und den Belagrohling gegenübergestellt. Im Falle des Belagrohlings heben sich die in Phasen erhöhter Geschwindigkeit (rot markierte Bereiche) erfassten Konzentrationsverläufe deutlich ab, wodurch ein erhöhtes Potenzial zur Emission von Sekundärpartikeln infolge erhöhter Reibfläche und einem lokalen Reibkontakt zuzuweisen ist. Über die AK-Master-Druckreihen können gemäß Abbildung 6-31 und Abbildung 6-32 für niedrige Geschwindigkeitsbereiche bzw. flächenbezogene Reibleistungen teils deutliche Abweichungen erfasst werden. Unter Reibflächenzunahme in tangentialer Richtung steigt die Emissionskennzahl, was den oben beschriebenen fortlaufenden Verschleißprozess bestätigt. Dem radial-reduzierten Reibbelag kann bei höchster flächenbezogener Reibleistung für niedrige bis mittlere Reibenergie (bis Druckreihe

4.2) die niedrigste Emissionskennzahl zugewiesen werden. Unter Zunahme der Beanspruchung gleichen sich die Emissionskennzahlen global an, d. h. die unter niedriger Reibenergie beobachteten Effekte heben sich kontinuierlich auf.

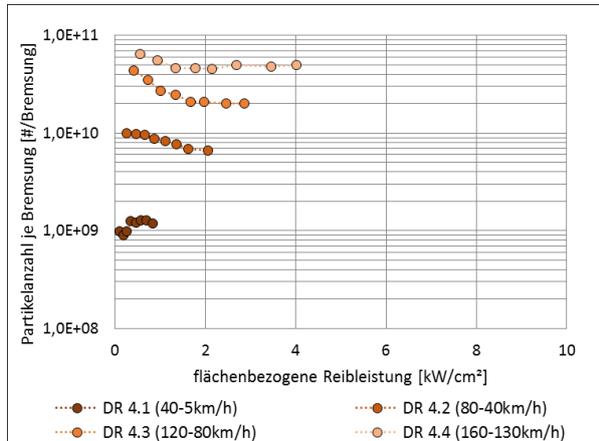


Abbildung 6-31: Partikelanzahl je Bremsung über flächenbezogene Reibleistung – Belag „Rohling“

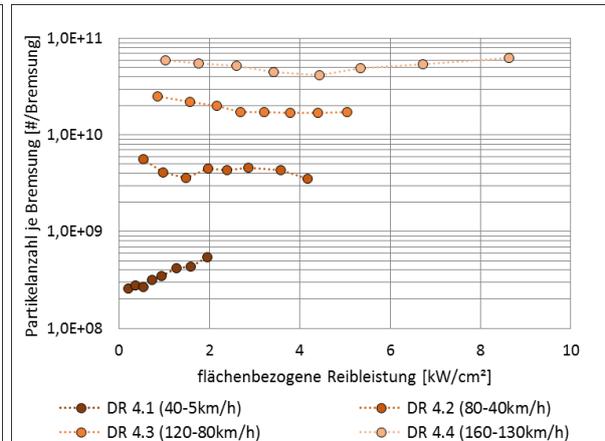


Abbildung 6-32: Partikelanzahl je Bremsung über flächenbez. Reibleistung – 20mm-II-Chamfer (10mm radial)

Unter maximaler Reibenergie und Bremsdrücken > 60 bar ist dem radial-reduzierten Belag ein Emissionsniveau mit globalem Maximum infolge höchster flächenbezogener Reibleistung und Änderung der modalen Verteilung (vgl. Abbildung 6-33 und Abbildung 6-34) zuzuweisen. Für die Beläge mit Slots sind lediglich Tendenzen zur Reduktion des CMDs zu beobachten.

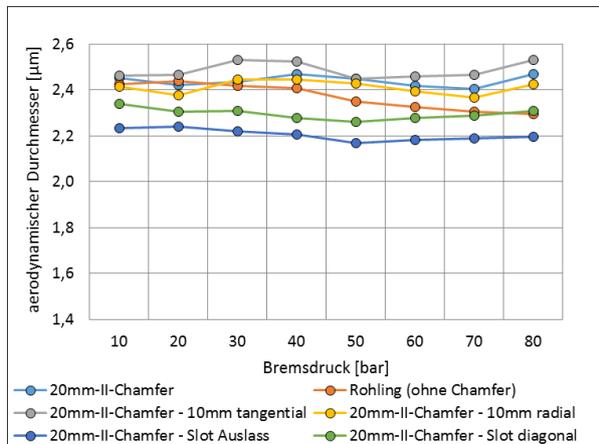


Abbildung 6-33: Median-Partikeldurchmesser (CMD) bei Variation der Belaggeometrie – AK-Master-DR 4.1

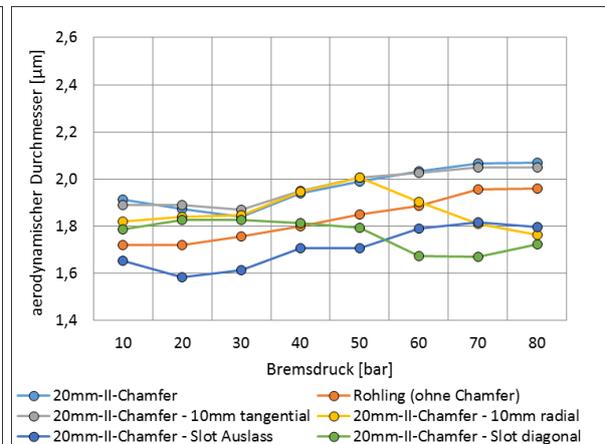


Abbildung 6-34: Median-Partikeldurchmesser (CMD) unter Variation der Belaggeometrie – AK-Master-DR 4.4

Auch für den Belagrohling (ohne Chamfer) ist eine deutliche Abhängigkeit erkennbar. Zur Bewertung der oberflächennahen Temperaturprofile dienen die in Abbildung 6-35 und Abbildung 6-36 gegenübergestellten Thermografieaufnahmen. Die Temperaturverteilung des Referenzbelages (20 mm-II-Chamfer) ist aus Abbildung 5-54 und Abbildung 5-56 bekannt. Im Falle des 20 mm-II-Chamfer – 10mm radial können infolge der höchsten flächenbezogenen Reibleistung die höchsten oberflächennahen Temperaturen von bis zu 330 °C (Druckreihe 4.4) erfasst werden. Diese liegen um bis zu 60 °C über den Vergleichswerten. Für den 20 mm-II-Chamfer – Slot diagonal können Partikelfragmente >> 10 µm beobachtet werden, welche besonders unter hohem Bremsdruck (> 30 bar) aus dem Slot heraustransportiert werden. Ein vergleichbares

Partikelinjektionsverhalten kann auch dem 20 mm-II-Chamfer – Slot Auslass zugewiesen werden, wobei die Intensität der emittierten Partikel deutlich geringer ausfällt.

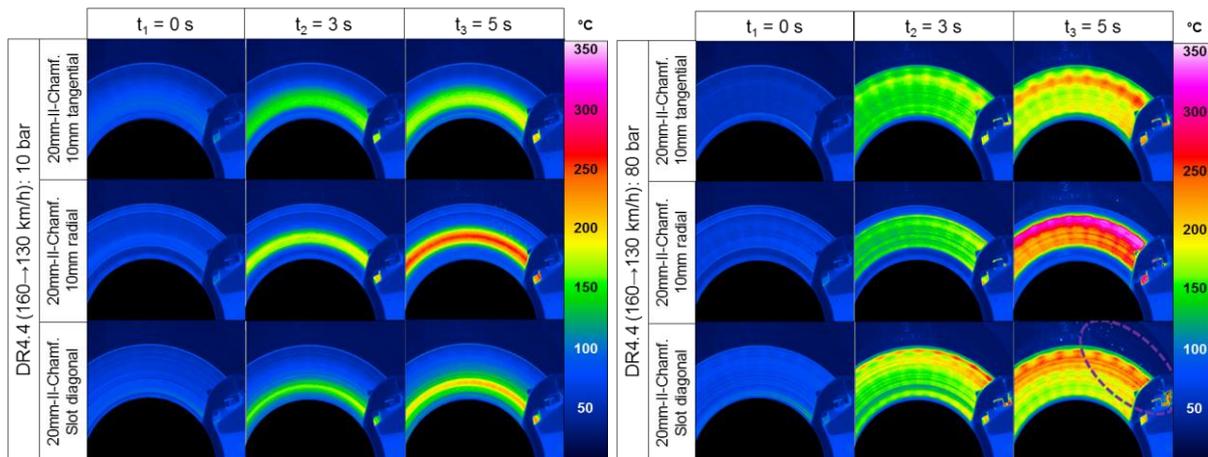


Abbildung 6-35: Temperaturverteilung über DR 4.4
(160 → 130 km/h) bei 10 bar (ECE-kh) – Belagvariation

Abbildung 6-36: Temperaturverteilung über DR 4.4
(160 → 130 km/h) bei 80 bar (ECE-kh) – Belagvariation

6.5 Einfluss eines regenerativen Bremssystems

Elektrische Antriebskonzepte ermöglichen im generatorischen Betrieb die Umwandlung von kinetischer Energie des in Bewegung befindlichen Fahrzeuges in elektrische Energie, was als regeneratives Bremsen bezeichnet wird. Dabei wird die umgewandelte Energie in einer Traktionsbatterie zwischengespeichert. Der von der fahrenden Person eingeleitete Verzögerungswunsch wird über eine Steuer- und Regeleinheit in ein Verzögerungsmoment umgesetzt, welcher von der elektrischen Antriebsmaschine im Generatorbetrieb und der mechanischen Reibungsbremse bereitgestellt werden kann. Der Anteil des Generators an der Fahrzeugverzögerung ist z. B. von der Verzögerungsintensität, dem Geschwindigkeitsfenster (Anfangs- und Endgeschwindigkeit) bzw. dem geschwindigkeitsabhängigen Generatormoment oder dem Ladezustand des Energiespeichers SOC abhängig [REI12]. Regenerative Bremssysteme bieten Vorteile durch einen reduzierten Anteil der Reibungsbremse an der Fahrzeugverzögerung. [BER17] konnte anhand von Prüfstandmessungen und Realfahrtversuchen unter Simulation eines Mild HEV (Hybrid Electric Vehicle) eine Reduktion des Verschleißvolumens um ca. 50 % nachweisen. Aussagen zum Emissionsverhalten blieben hingegen unbeantwortet.

Abschätzungen zum Minderungspotenzial unterschiedlicher Antriebskonzepte bzw. simulierter Generatorkennlinien am SMP erfolgen anhand des WLTC, des JRC-novel cycle sowie der AK-Master-Druckreihen. Die simulierten Generatorkennlinien entsprechen einem Mild HEV, PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) und BEV (Battery Electric Vehicle) eines Mittelklassefahrzeuges. Die Verzögerungsübernahme erfolgt durch die elektrische Trägheitssimulation (isim), erzeugt durch die Antriebsmaschine des Prüfstandes. Auf die Berücksichtigung des Ladezustandes des Energiespeichers wird verzichtet, wodurch von quasi optimalen Betriebsbedingungen ausgegangen wird. Eine Sensitivitätsstudie zum Einfluss des Ladezustandes ist [BER17] zu entnehmen. Verzögerungen, die vollständig durch regeneratives Bremsen umgesetzt werden,

sind durch reine Geschwindigkeitsänderungen ohne aktive Bremsdruckapplikation beschrieben. Verzögerungen, welche teilweise durch regeneratives Bremsen umgesetzt werden, sind durch hydraulische und elektrische (elektrische Trägheitssimulation) Anteile beschrieben. Die simulierten Verzögerungen mit Anfangs- und Endgeschwindigkeit und die simulierten Generatorkennlinien für den WLTC und JRC-novel cycle sind in Abbildung 6-37 und Abbildung 6-38 gegenübergestellt [HES18]. Im Falle des WLTC wurden konstante Verzögerungen je Bremsung berücksichtigt. Das Generatormoment steigt für alle simulierten Kennlinien mit der Abnahme der Geschwindigkeit bis zu einem spezifischen Maximum, wobei die maximale Generatorleistung je Antriebskonzept und Geschwindigkeit differenziert ausfällt.

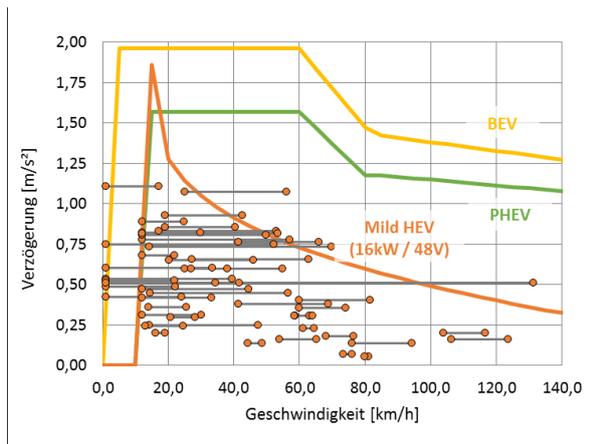


Abbildung 6-37: Einzelverzögerungen des WLTC (Klasse 3) gegenüber variierenden Rekuperationsprofilen

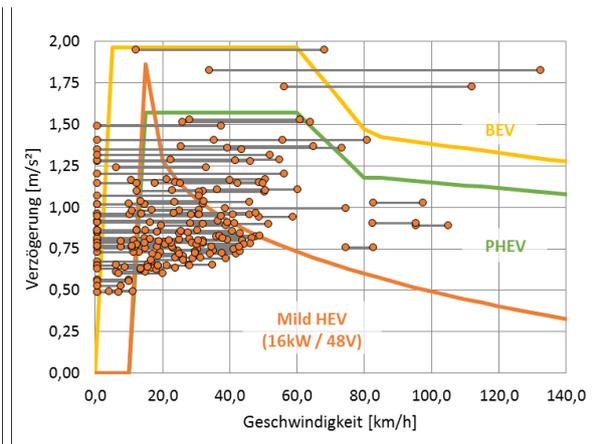


Abbildung 6-38: Einzelverzögerungen des JRC-novel cycle (Sek. 10) gegenüber var. Rekuperationsprofilen

Für Geschwindigkeiten < 15 km/h liegt je Antriebskonzept ein bis zum Stillstand abfallendes Rekuperationsvermögen vor [RE12]. Dem JRC-novel cycle kann infolge eines höheren Verzögerungsniveaus eine reduzierte rekuperierbare Energiemenge zugewiesen werden.

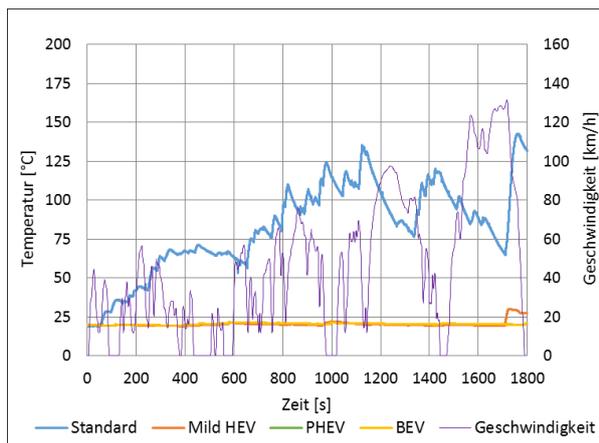


Abbildung 6-39: Temperaturverlauf unter variierenden Rekuperationsprofilen, WLTC (ECE-kh)

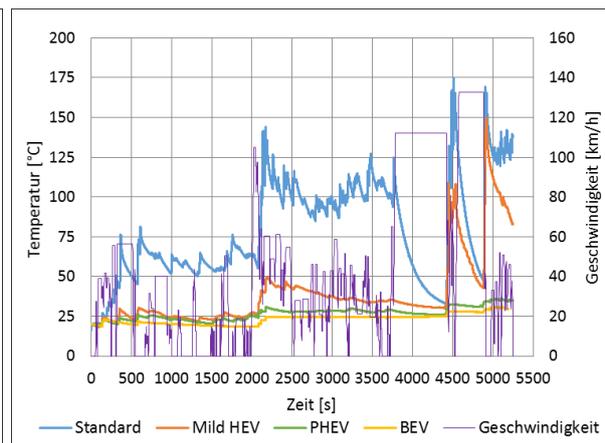


Abbildung 6-40: Temperaturverlauf unter variierenden Generatorkennlinien – JRC-novel cycle, Sek. 10 (ECE-kh)

Zur Bewertung der Temperaturprofile je Testzyklus und Rekuperationsprofil dienen Abbildung 6-39 und Abbildung 6-40. Die mit zunehmendem Rekuperationsvermögen reduzierte Reibleistung und Anzahl an Bremsaktuierungen resultiert in einem herabgesetzten Temperaturprofil. Im Falle des JRC-novel cycle ist für Geschwindigkeiten > 110 km/h neben globalen Peak-

Temperaturen auch unter Simulation eines Mild HEVs ein deutlicher Temperaturanstieg messbar. Für den WLTC bleiben derartige Temperaturanstiege aus. Die resultierenden mittleren Reibzonentemperaturen und Spitzentemperaturen sind in Tabelle 6-1 aufgeführt.

Tabelle 6-1: Temperatur über WLTC und JRC-novel cycle (Sek. 10) unter Simulation von Generatorkennlinien

		Referenz (ohne Rekup.)	Mild HEV	PHEV	BEV
WLTC (Klasse 3)	Mittl. Temperatur [°C]	82.7	21,1	20.4	20.1
	Peak-Temperatur [°C]	142.7	31,9	21.7	20,5
JRC-novel cycle (Sek. 10)	Mittl. Temperatur [°C]	78.2	38.9	26.5	23.2
	Peak-Temperatur [°C]	174.9	149.6	36.4	31.4

Aus einer Reduktion der durch die Reibungsbremse umzusetzenden Reibleistung um 88 % (Mild HEV) folgt ein Abfall der mittleren Reibzonentemperatur von 82,7 °C (Referenz) auf 22,1 °C. Die Spitzentemperatur fällt von 142,7 °C auf 31,9 °C. Unter PHEV- und BEV-Simulationen sind nur geringe Temperaturanstiege messbar. Aus den in Abbildung 6-41 und Abbildung 6-42 dargestellten Reibleistungen und Emissionsfaktoren je Zyklus (Mittel aus 5 Zyklen nach Abschluss des tribologischen Einlaufvorganges) können Minderungspotenziale abgeleitet werden. Unter Simulation eines Mild HEV sinkt die mittels Reibungsbremse umgesetzte Reibenergie auf ca. 12 % und der Emissionsfaktor auf ca. 5 %. Demgegenüber steht für den JRC-novel cycle ein Abfall auf 38 % der Reibleistung sowie auf 58 % des Emissionsfaktors. Unter Zunahme des Rekuperationsvermögens ist die über den WLTC durch die Reibungsbremse umgesetzte Reibenergie deutlich geringer und das Minderungspotenzial höher.

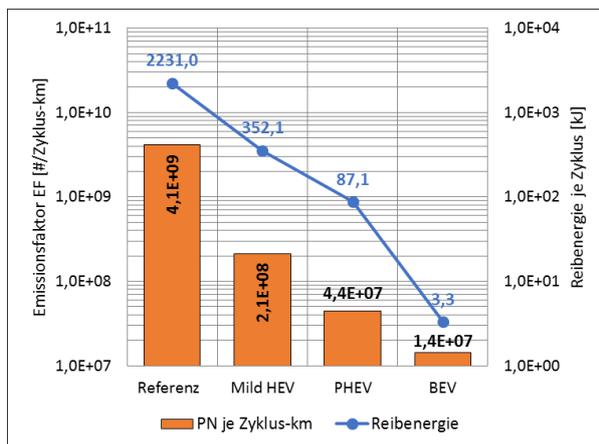


Abbildung 6-41: Anzahlbez. Emissionsfaktoren und Reibenergie je Zyklus – WLTC (ECE-kh)

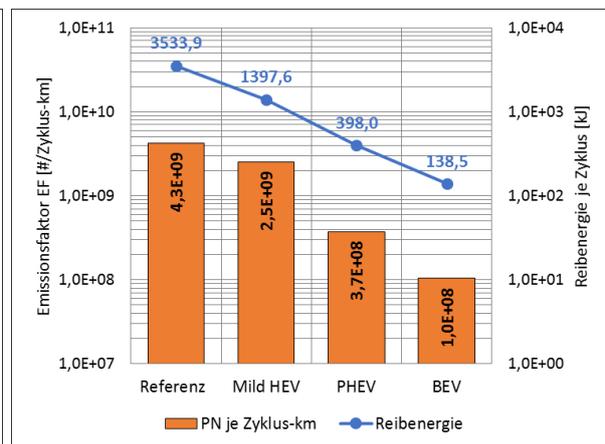


Abbildung 6-42: Anzahlbez. Emissionsfaktoren und Reibenergie je Zyklus – JRC-novel cycle (Sek. 10) (ECE-kh)

Auffällig ist, dass auch unter Simulation eines BEV, wobei eine Reibenergie von 3,3 kJ je Zyklus bei maximalen Initialgeschwindigkeiten von ca. 4 km/h umgesetzt wird, ein Emissionsfaktor von 1,4 E+07 #/km bestimmt werden kann. Dieser Einfluss resultiert primär aus der Emission von Sekundärpartikeln in der Beschleunigungsphase und unter konstanter Rotationsgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 4.1.3) infolge der im tribologischen Kontakt stehenden Reibpartner, wie in Abbildung 6-43 für einen markierten Zeitbereich ($v_{konst} = 112$ km/h) dargestellt.

Die über die Beschleunigungsphase detektierte Anzahlkonzentration steigt bis zu einem Maximum an und fällt während konstanter Geschwindigkeit kontinuierlich ab. Die während des markierten Zeitbereiches unter konstanter Rotationsgeschwindigkeit emittierte Partikelanzahl entspricht 4,6 % des Emissionsfaktors ohne Simulation eines regenerativen Bremssystems, jedoch 14,3 % unter Simulation eines BEV. Gemäß Abschnitt 6.1 und 6.3 sind Einflüsse der (Vor-) Konditionierung auf das Emissionsverhalten bekannt. Infolge der deutlich reduzierten tribologischen Beanspruchung kann unter Simulation eines regenerativen Bremssystems eine abweichende Dynamik des Emissionsverhaltens (vgl. Abbildung 6-44) nachgewiesen werden.

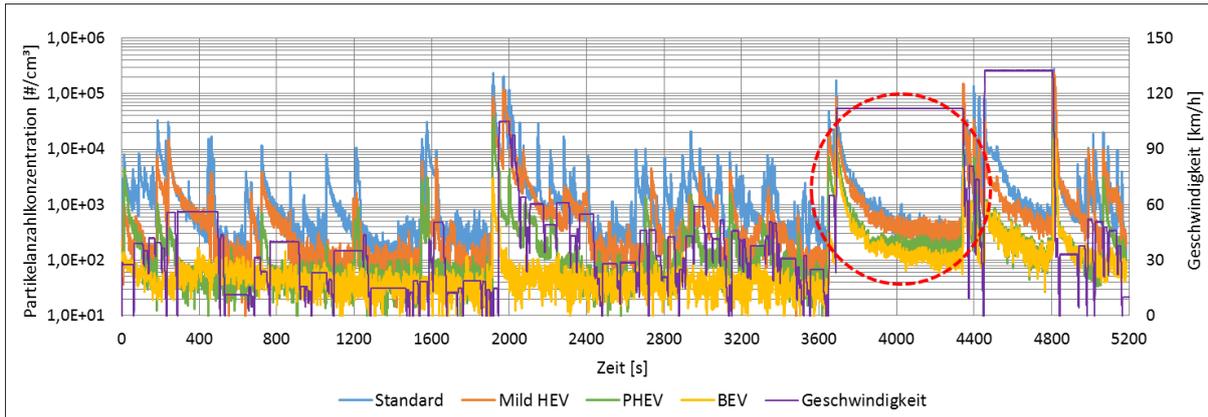


Abbildung 6-43: Anzahlkonzentration unter Simulation von Generatorkennlinien – JRC-novel cycle (Sek. 10) (ECE-kh)

Die Konditionierungsphase ist unter Simulation eines PHEVs durch einen Anstieg der je Zyklus berechneten Emissionsfaktoren gekennzeichnet, wohingegen ohne Simulation eines regenerativen Bremssystems eine kontinuierliche Reduktion vorliegt. Auffällig ist zudem die erhöhte Zyklenanzahl zur Gewährleistung eines reproduzierbaren Emissionsniveaus, was bei der Definition einer robusten Einlaufprozedur für regulatorische Messungen zu berücksichtigen ist.

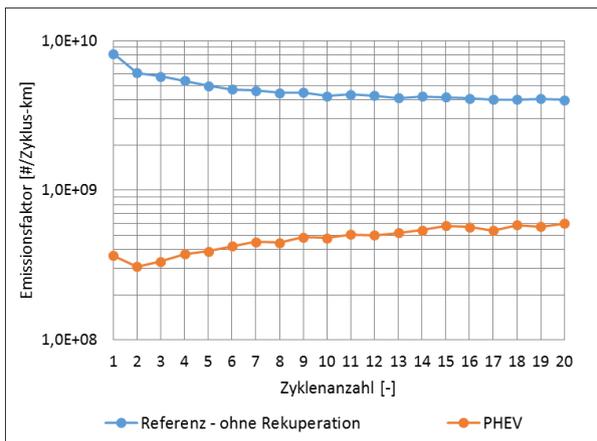


Abbildung 6-44: Einlaufverhalten unter Variation von Re-kuperationsprofilen – JRC-novel cycle Sek. 10 (ECE-kh)

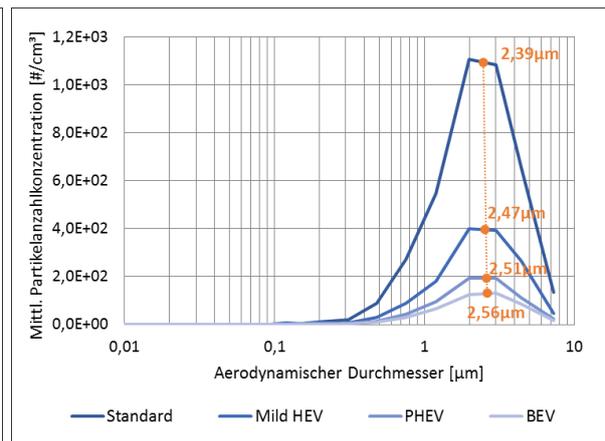


Abbildung 6-45: Größenverteilungsdichte unter Var. von Generatorkennlinien – JRC-novel cycle Sek. 10 (ECE-kh)

Eine Änderung der Größenverteilung unter Variation von Generatorkennlinien ist gemäß Abbildung 6-45 nicht abzuleiten. Die geringen Unterschiede sind vielmehr der Sensitivität des elektrisch basierten Messsystems bei unterschiedlichen Konzentrationsintensitäten zuzuweisen und können nicht für einen eindeutigen Nachweis herangezogen werden. Auf Basis der

AK-Master-Druckreihen folgt eine Bewertung von Minderungspotenzialen unter variierenden Geschwindigkeitsbereichen und Bremsdruckstufen. Eine Gegenüberstellung der ohne Simulation eines regenerativen Bremssystems und unter BEV-Simulation resultierenden Größenverteilungsdichten (Druckreihe 4.3) folgt in Abbildung 6-46 und Abbildung 6-47. Insgesamt kann eine bimodale Verteilung mit Konzentrationsmaxima im Größenbereich 50–80 nm (Mode 1) bzw. 1–3 µm (Mode 2) nachgewiesen werden. Unter BEV-Simulation sind deutlich reduzierte Peak-Konzentrationen (10–30 bar) gemäß des orange markierten Bereiches messbar, wohingegen die Lage der Konzentrationsmaxima keine wesentliche Änderung aufweist. Für höhere Bremsdrücke nimmt das Rekuperationsvermögen ab. Zudem kann eine reduzierte Partikelkonzentration $\leq 0,1 \mu\text{m}$ (grün markierter Bereich) nachgewiesen werden, was durch reduzierte lokale Spitzentemperaturen infolge reduzierter Reibenergie zu erklären ist.

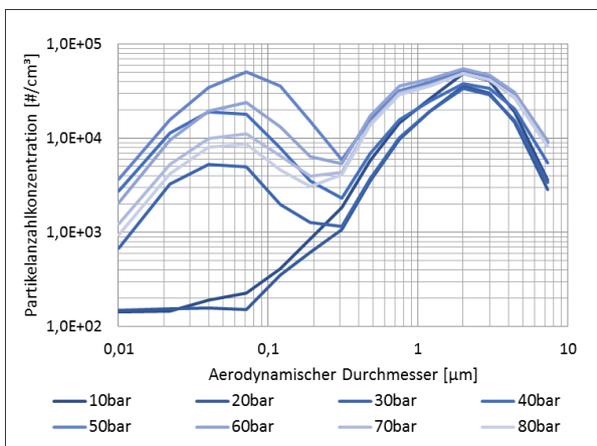


Abbildung 6-46: Größenverteilungsdichte über AK-Master-Druckreihe 4.3 – ohne Rekuperation (ECE-kh)

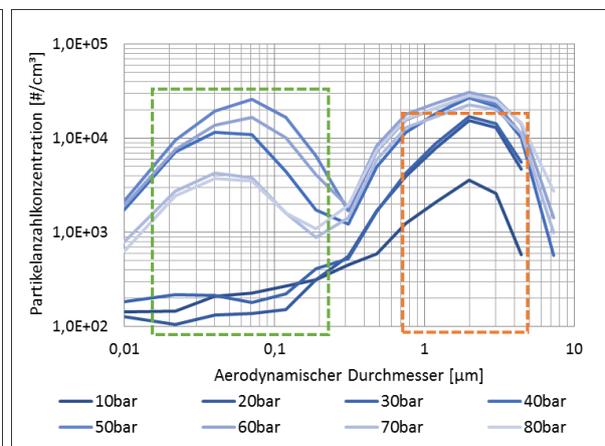


Abbildung 6-47: Größenverteilungsdichte über AK-Master-Druckreihe 4.3 – BEV-Simulation (ECE-kh)

6.6 Fazit zur Bewertung von Einflussgrößen auf das Partikelemissionsverhalten

Aus den in Abschnitt 6.1 bis 6.5 vorgestellten Untersuchungen konnte einer Vielzahl an Parametern identifiziert werden, welche das Partikelemissionsverhalten in unterschiedlicher Intensität beeinflussen. Eine Gegenüberstellung dieser Parameter ist Abbildung 6-48 zu entnehmen [BRE04]. Die Bewertung der Beeinflussungsintensität erfolgt in Tabelle 6-2.

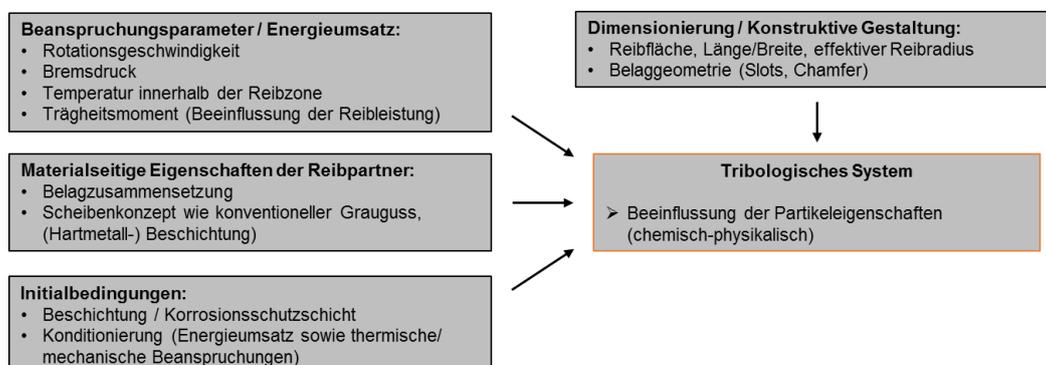


Abbildung 6-48: Unterteilung von Einflussgrößen auf das Partikelemissionsverhalten

Aus dem Vergleich unterschiedlicher Belag- und Scheibenkonzepte konnte der Einfluss der Reibenergie, der Reibleistung bzw. lokaler Spitzentemperaturen, der Belagzusammensetzung

und der Oberflächenbeschaffenheit auf das Partikelemissionsverhalten bewertet werden. Je Belag-Scheibenkonzept konnte eine charakteristische Partikelgrößenverteilung bestimmt werden, die insbesondere auch durch den Einfluss lokaler Spitzentemperaturen bestimmt wird. Untersuchungen zum Einfluss der Vorkonditionierung haben weitere signifikante Beeinflussungen aufgezeigt. Demnach ist die Einlaufprozedur, deren Zielgröße ein reproduzierbares und repräsentatives Emissionsniveau (bezogen auf die Lebensdauer) darstellt, als individuelle Größe zu betrachten. Im Falle einer hartmetallbeschichteten Scheibe ist eine um Faktor 2,5 höhere Reibenergie im Vergleich zu einer konventionellen Grauguss-Scheibe und ECE-kf umzusetzen, bis ein reproduzierbares Emissionsniveau nachgewiesen werden kann.

Tabelle 6-2: Bewertung des Einflusses variierender Parameter auf das Partikelemissionsverhalten [BRE04]

Beeinflussung des Partikelemissionsverhaltens			
Untergruppe	Parameter	Bewertung	Einflussbeschreibung
Beanspruchungsparameter	Fahrgeschwindigkeit	4	Durch Beeinflussung der Reibenergie bewirkt eine Verdoppelung der Initialgeschwindigkeit eine etwaige Verzehnfachung der Partikelanzahl je Bremsung (vgl. Abschnitt 6.2)
	Bremsdruck	3	Durch Beeinflussung der Reibleistung insbesondere Einfluss auf lokale Spitzentemperaturen (Partikelbildung < 0,1 µm) (vgl. Abschnitt 6.2)
	Temperatur	3	Einfluss auf Partikelbildung < 0,1 µm; Ausbildung bimodaler Verteilung zw. 170–220 °C (vgl. Abschnitt 5.2.2)
	Simuliertes Trägheitsmoment	3	Einfluss auf die Reibenergie bzw. Reibleistung; aus Erhöhung folgt eine Zunahme des Verschleißvolumens sowie ein Anstieg der Temperatur (Partikel < 0,1 µm)
Eigenschaften der Reibpartner	Belagzusammensetzung	3	Die Belagzusammensetzung bestimmt die Verschleiß- und Reibeigenschaften der Reibpaarung (stärker gegenüber dem Grundkörper/Scheibe)
	Scheibenkonzept/Beschichtung	3	Sehr starke Reduktion des Verschleißvolumens und der Partikelanzahl durch (hartmetall-) beschichtete Scheiben (Belagzusammensetzung auf das Konzept abzustimmen)
Initialbedingungen	(Korrosions-) Beschichtung	2	Insbesondere im „grünen Zustand“ liegt eine signifikante Beeinflussung der Grenzschichteigenschaften und des Verschleißverhaltens vor
	Konditionierung	2	Einfluss auf Aufbau/Zusammensetzung der Grenzschicht durch thermische und mechanische (Vor-) Konditionierung → Einfluss auf Verschleißverhalten
Dimensionierung / Konstruktive Gestaltung	Reibfläche	1	Einfluss auf (flächenbezogene-) Reibleistung; durch Reduktion der Reibfläche insbesondere Beeinflussung der Reibzonentemperatur (Partikelbildung < 0,1 µm)
	Belaggeometrie	1	Integrierte Slots begünstigen die Partikelabscheidung/-Agglomeration

Bewertungsgrößen: 1 – schwacher Einfluss; 2 – mittlerer Einfluss, 3 – starker Einfluss, 4 – sehr starker Einfluss

Darüber hinaus konnte ein signifikanter Einfluss der Korrosionsschutzschicht über den Einlaufvorgang beobachtet werden. Für mögliche regulatorische Messungen empfiehlt es sich daher, anstelle einer vordefinierten Anzahl an Testzyklen eine statistische Auswertung anhand einer Trendanalyse durchzuführen. Erst nach Abschluss des tribologischen Einlaufvorganges kann ein der Gesamtlebensdauer repräsentativer Emissionsfaktor je Belag-Scheibenpaarung bestimmt werden. Aus Untersuchungen zum Einfluss der Vorkonditionierung ist weiterhin bekannt, dass eine Erhöhung der thermisch-mechanischen Beanspruchung, um z. B. die Zeitdauer des tribologischen Einlaufvorganges zu reduzieren, das Reib- und Verschleißverhalten negativ beeinflussen kann und daher zu vermeiden ist. Es empfiehlt sich daher, den zur Emissionsmessung angesetzten Zyklus auch über die Einlauf- und Konditionierungsphase in Form einer mehrfachen Wiederholung unter Vorgabe einer Initialtemperatur je Zyklus anzuwenden. Aus der Variation unterschiedlicher Belaggeometrien konnte eine geringe Beeinflussung der flächenbezogenen Reibleistung auf das Partikelemissionsverhalten je Einzelbremsung beobachtet werden. Durch den Einfluss lokaler Spitzentemperaturen, welche besonders unter Belagreduktion in radialer Richtung von Relevanz sind, ändert sich das Partikelemissionsverhalten bzw. die Partikelgrößenverteilung signifikant. Mit zunehmender Elektrifizierung des Antriebsstranges und einer Änderung der Belaggeometrie bzw. Reduktion der Reibfläche ist dieser Umstand zu beachten. Darüber hinaus konnte eine Tendenz zur Reduktion der Anzahl emittierter Partikel unter Verwendung von Belägen mit integrierten Slots beobachtet werden, die unter Zunahme der Slotbeladung kontinuierlich abnimmt. Im Rahmen der Untersuchungen zum Einfluss eines regenerativen Bremssystems wurden unterschiedliche Generatorkennlinien simuliert und das Emissionsverhalten verglichen. Die Vorteile liegen in einer Reduktion der Anzahl an Bremsenapplikationen und des Bremsdruckes bzw. der Reibleistung und der daraus resultierenden Reibzonentemperatur. Im Falle von Prüfzyklen nach WLTP-Datenbasis konnten Minderungspotenziale von 40 bis > 90 % im Vergleich zum Zyklus ohne Simulation des regenerativen Bremsens bestimmt werden. Für Leistungstests (z. B. AK-Master) konnte eine Reduktion lokaler Spitzentemperaturen und des Bildungspotenzials an Partikeln $\leq 0,1 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden. Offen bleibt, inwieweit die Charakteristik des realen Fahrversuchs die Messergebnisse beeinflusst. Der Einfluss der fahrenden Person (Verzögerungswunsch), der Verkehrssituation, der Beladung des Fahrzeuges oder auch der Umweltbedingungen sind zu berücksichtigen. Darüber hinaus liegt eine Herausforderung im Bereich der Korrosion, welche aus einer reduzierten Applikation der Reibungsbremse und Flächenpressung resultieren. Damit geht eine Änderung des Aufbaus und Zusammensetzung der Reibschicht sowie eine daraus resultierende Änderung im Reib- und Verschleißverhalten einher. Ein vollständiger Verzicht der Reibungsbremse ist derzeit aufgrund der Verzögerungsanforderungen in Notbremsituationen nicht möglich. Alternative Reibbeläge sowie beschichtete Bremscheiben stellen eine wirkungsvolle Alternative dar.

7 Vergleich variierender Prüfumgebungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden bislang ausschließlich experimentelle Untersuchungen unter Laborbedingungen durchgeführt. Zur ökologischen Bewertung von Reibungsbremsen ist jedoch eine möglichst realistische Modellierung des Fahrverhaltens erforderlich. Erst dadurch können realitätsnahe Emissionsfaktoren bestimmt werden. Darüber hinaus ist es möglich, Einflüsse der Streckenführung, des Fahrmanövers oder der fahrenden Person zu bewerten. Das Ziel ist demnach, die Anwendbarkeit des in Abschnitt 3 vorgestellten Probenahmesystems für Realfahrtanwendungen zu überprüfen sowie Einflussgrößen zu identifizieren und zu bewerten. Darüber hinaus werden Untersuchungen zum Einfluss der Prüfumgebung durchgeführt, Merkmale identifiziert und bewertet. Um eine vergleichbare Grundbasis zu schaffen, wird auf bereits bekannte Testzyklen zurückgegriffen. Zusätzlich kommt ein Testzyklus zur Anwendung, welcher die Anforderungen der derzeit gültigen Verordnung zur Erfassung verbrennungsmotorischer Emissionen von leichten Personen- und Nutzfahrzeugen im realen Fahrversuch erfüllt.

7.1 Messungen im realen Fahrversuch

7.1.1 RDE-konformer Testzyklus und Definition von Zielgrößen

Der Fahrer bzw. die Fahrerin bestimmen bei jeder Bremsung die Geschwindigkeit, bei der der Bremsvorgang initiiert wird, den Bremsdruck, den Druckanstieg oder Druckgradient, woraus Unterschiede im Emissionsverhalten resultieren können. Zudem ist je nach Fahrprofil der fahrenden Person eine Verzögerung mit und ohne Betätigung der Kupplung möglich, wodurch neben den Widerstandskennwerten des Fahrzeuges zusätzlich ein Motorbremsmoment zur Umsetzung des Verzögerungswunsches anliegt. Insgesamt existieren damit unterschiedliche Einflussgrößen, welche sich in ihrer Wirkung auf das Emissionsverhalten unterscheiden können. Die Verordnungen (EU) 2016/427 und (EU) 2016/646 beschreiben den RDE-Test zur Bestimmung von Emissionsfaktoren verbrennungsmotorischer Abgasemissionen in seiner ersten Phase zusätzlich zum NEDC-Test und wurden mit dem WLTP in (EU) 2017/1151 integriert. (EU) 2018/1832 definiert die Methode zur Prüfung der Übereinstimmung von im Betrieb befindlichen Fahrzeugen anhand der WLTP- und RDE-Testverfahren sowie der Auswerteverfahren, welche für die nachfolgenden Untersuchungen die Grundlage darstellen. Die RDE-Untersuchungen müssen repräsentativ für den Betrieb des Kraftfahrzeuges mit normaler Belastung und unter normalen Fahrbedingungen sein. Demnach sind RDE-Prüfungen an Arbeitstagen gemäß der für die EU gültigen Definition in der Verordnung (EWG, Euratom) Nr. 1182/71 des Rates (3) durchzuführen. Damit die Vergleichbarkeit der Messfahrten unter Verwendung variierender Messsysteme, Versuchsstrecken und Umgebungsbedingungen gewährleistet werden kann, ist eine Vielzahl von Anforderungen bezüglich des Fahr- und Streckenprofils sowie der Umgebungsbedingungen zu definieren, welche in Tabelle 7-1 gegenübergestellt sind. Als Startbedingung wird der Kaltstart gefordert, was grundsätzlich auf die Konditionierung

der Bremse übertragen werden kann, woraus typischerweise ein erhöhtes Emissionsniveau resultiert. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen basieren auf einem RDE-konformen Testzyklus im öffentlichen Straßenverkehr unter dynamischen Verkehrssituationen.

Tabelle 7-1: Wesentliche Anforderungen für die RDE-Messung nach Verordnung (EU) 2018/1832

Kriterium	Beschreibung	
Fahrprofil / Strecke	Zeit	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtdauer: 90–120 min • Haltezeiten: 6–30 % der Streckenanteildauer des Stadtteils; einzelne Haltezeit: 10–180 s • Streckenanteildauer: Stadt 34 % (+10/–5 %) der Gesamtdauer; Land 33 % (± 10 %); Autobahn 33 % (± 10 %) • Zeitanteil bei $v > 100$ km/h von min. 5 min
	Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Stadt: 0–60 km/h (\emptyset: 15–40 km/h mit Standzeit) • Land: 60–90 km/h • Autobahn: 90–120 (145) km/h
	Strecke	<ul style="list-style-type: none"> • Mindestdistanz je Sektion: 16 km • Startpunkt und Endpunkt in der Sektion Stadt
	Beschleunigung	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der Datensätze mit $a > 0,1$ m/s² muss in jeder Sektion größer als oder gleich 100 sein (1 Hz)
	Höhenlage	<ul style="list-style-type: none"> • < 700 m über dem Meeresspiegel (erweitert: 700–1.300 m) • Keine Beschränkung bzgl. maximaler Streckenneigung
	Höhenunterschied	<ul style="list-style-type: none"> • < 1.200 m/100 km (erweitert: < 1.600 m/100 km)
Umgebungsbedingungen	Temperatur: 0–30 °C (erweitert: –7 °C bis 35 °C)	
Nutzlast	≤ 90 % des maximalen Fahrzeuggewichts	

Die Fahrstrecke ist als Rundkurs mit identischem Start- und Endpunkt entwickelt. Das Höhenprofil des RDE-konformen Testzyklus sowie der Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf (sektionale Unterteilung) ist beispielhaft in Abbildung 7-1 dargestellt. Das Höhenprofil weist über den Verlauf des Zyklus deutliche Differenzen und eine maximale Höhendifferenz von ca. 311 m auf. Die Höhengrenze von maximal 700 m ist eingehalten (620 m). Bei einer Gesamtdistanz von 87,3 km folgt unter Beachtung des Höhenprofils ein kumulierter Höhenunterschied von 1.062 m/100 km (927 m je Zyklus), was innerhalb der Grenze liegt, jedoch bereits als deutlich profiliertes Gelände deklariert werden kann. Die Fahrzeit für oben aufgeführtes Beispiel beträgt ca. 103 min (6.202 s). Das im Rahmen der Untersuchungen verwendete portable Abgasmesssystem zur Partikelzählung (PN-PEMS) ist gemäß Abschnitt 5.2.1 durch einen auf 10 nm (d₅₀) kalibrierten Kondensationspartikelzähler (CPC) auf Isopropanol-Basis, eine interne Verdünnungsstufe mit einem Gesamtverdünnungsfaktor von 10 und eine Flussrate von 2,5 l/min gekennzeichnet. Die Grundnutzlast des Testfahrzeugs (Nutzfahrzeug; Dieselmotor: 77 kW) umfasst die fahrende Person und das Messequipment einschließlich der Datenerfassungssysteme und Energieversorgungseinrichtungen. Die Gesamtmasse des Testfahrzeuges beträgt

2.230 kg. Es werden Bremsdrücke an Vorder- und Hinterachse sowie die Temperaturen (schleifende Thermolemente) an den vorderen Bremsen sowie an der hinteren rechten Bremse erfasst. Der Aufbau und die Ausstattung des im Rahmen der Probandenfahrten verwendeten Versuchsfahrzeuges ist in Abbildung 7-2 gegenübergestellt. Die Adaption des in Abschnitt 3.4 beschriebenen Konstantvolumen-Probenahmesystems erfolgt an der rechten VA-Bremse. Vorteilhafterweise wird der Evakuierungsvolumenstrom auf 120 m³/h vordefiniert.

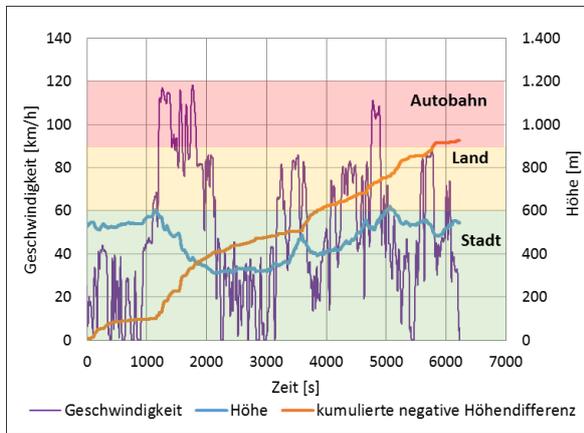


Abbildung 7-1: Vergleich Höhenprofil und Geschwindigkeitsverlauf – RDE-Zyklus Ilmenau (Fahrer 1, Fahrt 1)

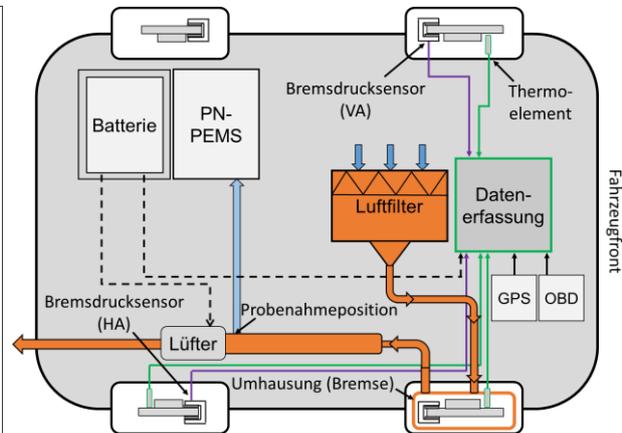


Abbildung 7-2: Fahrzeugaufbau zur Durchführung von Versuchsfahrten im Straßenverkehr (Schema)

7.1.2 Messergebnisse und Vergleich

Auf Grundlage des entwickelten RDE-konformen Testzyklus erfolgt ein Vergleich anhand von 3 Testpersonen, welche zwei aufeinanderfolgende Fahrten durchführen. Das Ziel besteht darin, grundlegende Zusammenhänge und Korrelationen zwischen dem Fahrerprofil, der Fahr-situation oder der Streckenführung und dem Partikelemissionsverhalten abzuleiten.

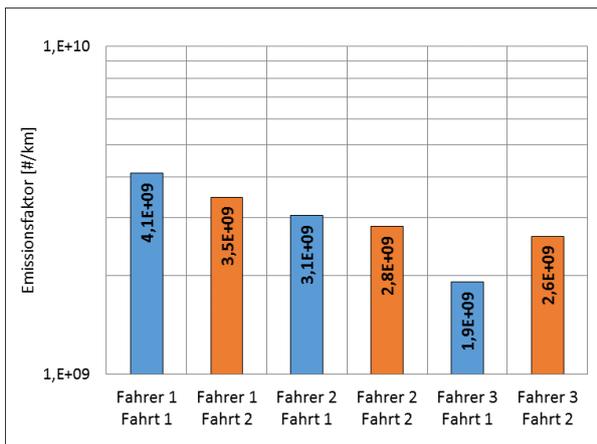


Abbildung 7-3: Vergleich anzahlbezogene Emissionsfaktoren je Testperson (Gesamt) – RDE-Zyklus Ilmenau

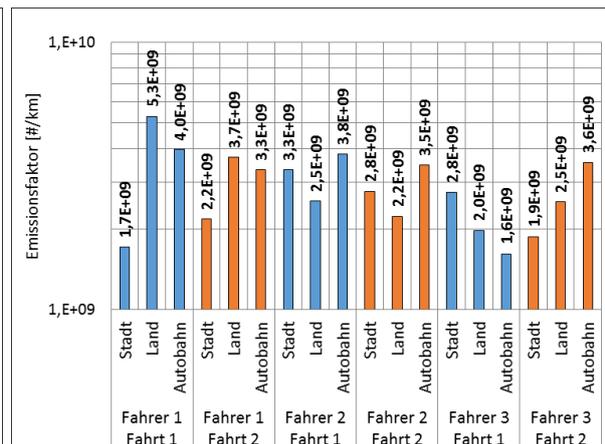


Abbildung 7-4: Vergleich Emissionsfaktoren je Testperson und Sektion – RDE-Zyklus Ilmenau (ECE-kf)

Die Bewertung der Emissionsfaktoren erfolgt anhand der fahrerspezifischen, sektionalen Reibenergie und der Geschwindigkeit, des Bremsdruckes sowie der Anzahl an Bremsungen. Für die Untersuchungen kommt ein ECE-kf mit Grauguss-scheibe zur Anwendung. Um die Messungen vergleichbar zu gestalten, wurde die Fahrtzeit werktags auf 12.00–16.00 Uhr unter trockenen Streckenverhältnissen (kein Niederschlag) beschränkt. Während der Fahrten betrug

die Umgebungstemperatur zwischen 6 und 16 °C. Aus den in Abbildung 7-3 gegenübergestellten Emissionsfaktoren je Testperson und Zyklus ist abzuleiten, dass die Emissionsfaktoren je Versuchsperson und Zyklus um bis zu 54 % voneinander abweichen (Fahrer 1, Fahrt 1 zu Fahrer 3, Fahrt 1). Aus dem Vergleich der sektionalen Emissionsfaktoren (vgl. Abbildung 7-4) wird deutlich, dass die Einflüsse vielfältig sind und je Sektion unterschiedlich ausfallen können. Der Vergleich der kumulierten (vgl. Abbildung 7-5) mittleren Reibenergie je Versuchsperson und Sektion (vgl. Abbildung 7-6) offenbart den erwarteten Einfluss der Fahrgeschwindigkeit. Das Minimum der mittleren Reibenergie je Bremsung ist der Sektion Stadt zuzuordnen, das Maximum der Sektion Autobahn. Während Minimum und Maximum der mittleren Reibenergie im innerstädtischen Bereich um weniger als 4 kJ pro Bremsung (Abw.: 5,7 %; Fahrer 2, Fahrt 1 zu Fahrer 3, Fahrt 2) auseinanderliegen, beträgt der Unterschied für die Sektion Autobahn bis zu 209,2 kJ pro Bremsung (Abw.: 48,1 %; Fahrer 1, Fahrt 2 zu Fahrer 3, Fahrt 1).

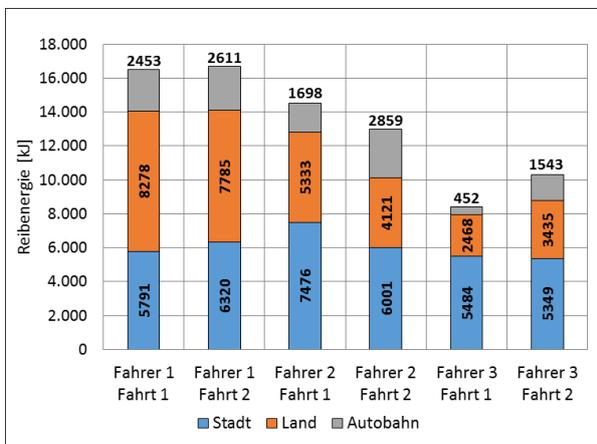


Abbildung 7-5: Vergleich Reibenergie je Testperson und Sektion – RDE-Zyklus Ilmenau

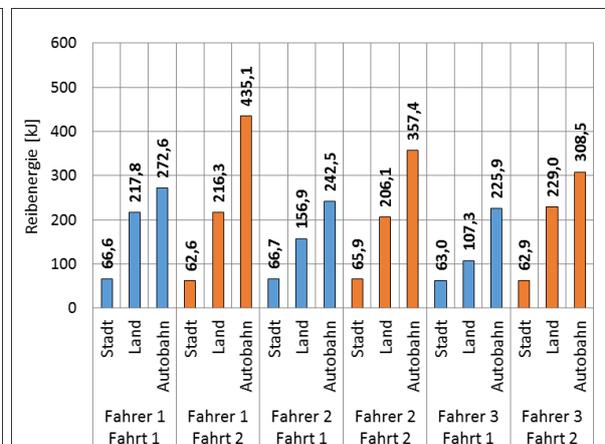


Abbildung 7-6: Vergleich mittlere Reibenergie je Testperson, Sektion und Einzelbremsung – RDE-Zyklus Ilmenau

Daraus ist abzuleiten, dass die Fahrdynamik im innerstädtischen Bereich sehr stark durch die Verkehrssituation bzw. das Verkehrsaufkommen und die Streckenführung bestimmt wird. Die mittleren Reibenergien unterscheiden sich kaum (Abbruchkriterium: 1 km/h zur Trennung zwischen Verzögerung und Stillstand). Aus der Gegenüberstellung der sektionalen Partikelanzahl und Reibenergie je Bremsung für Fahrer 1, Fahrt 2 (vgl. Abbildung 7-7) sowie für Fahrer 3, Fahrt 1 (vgl. Abbildung 7-8) ist zunächst der geschwindigkeitsabhängige Einfluss auf das Emissionsverhalten abzuleiten. Während im Falle der Sektion Stadt Reibenergien ≤ 200 kJ nachgewiesen werden können, sind diese im Bereich der Sektion Land mit ≤ 500 kJ und Sektion Autobahn mit ≤ 1.000 kJ anzusetzen. Infolgedessen ist eine sektionale Unterscheidung möglich. Auffällig ist, dass im Falle des Fahrers 3, Fahrt 1 einzelne Bremsungen mit Reibenergien < 1 kJ nachgewiesen werden können, welche als zeitlich kurze Anpassungsbremsungen oder Stillstandbremsungen aus niedriger Geschwindigkeit (z. B. infolge Ampelphasen) zu klassifizieren sind. Reduzierte Reibenergien je Bremsung können auch für die Sektion Land nachgewiesen werden. Auch hieraus ist eine defensive Fahrweise unter Nutzung der Reibungsbremse für zeitlich kurze Geschwindigkeitsanpassungen ableitbar [FEI20].

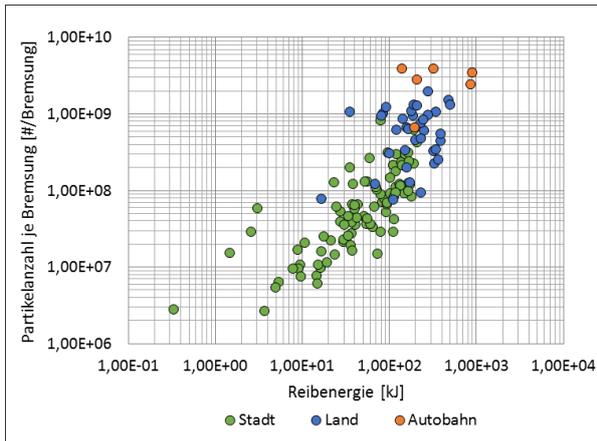


Abbildung 7-7: Vergleich PN je Bremsung über sek. Reibenergie Fahrer 1, Fahrt 2 – RDE-Zyk. Ilmenau (ECE-kf)

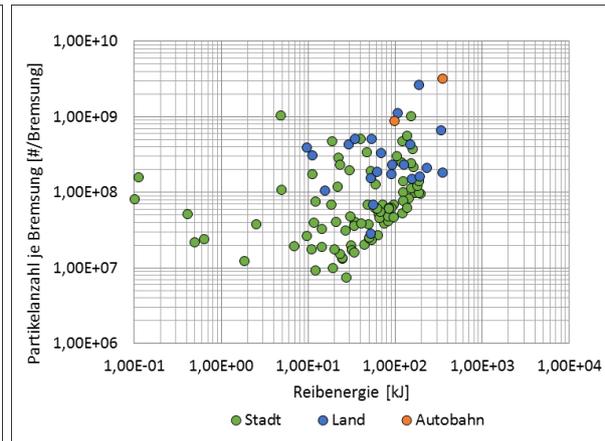


Abbildung 7-8: Vergleich PN je Bremsung über sek. Reibenergie Fahrer 3, Fahrt 1 – RDE-Zyk. Ilmenau (ECE-kf)

Infolge der defensiven Fahrweise und reduzierten Reibenergie ist auch das Temperaturniveau für Fahrer 3, Fahrt 1 reduziert. Die mittleren Temperaturen (Umgebung: 9–14 °C) der vorderen rechten, mittels Probenahmesystem ausgestatteten Bremse, betragen 61,9 °C für Fahrer 1, Fahrt 2 (vgl. Abbildung 7-9) bzw. 49,8 °C für Fahrer 3, Fahrt 1 (vgl. Abbildung 7-10).

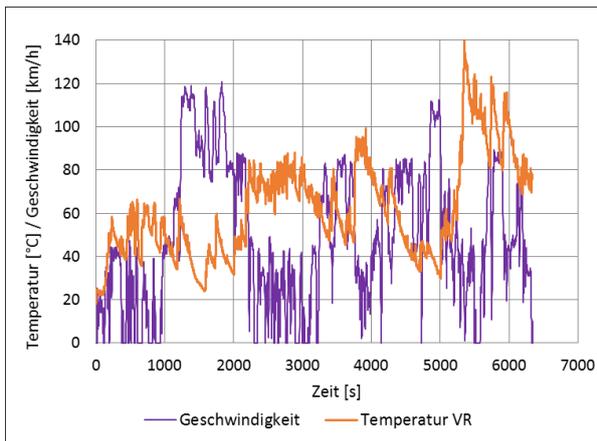


Abbildung 7-9: Vergleich Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf für Fahrer 1, Fahrt 2 – RDE-Zyk. Ilmenau

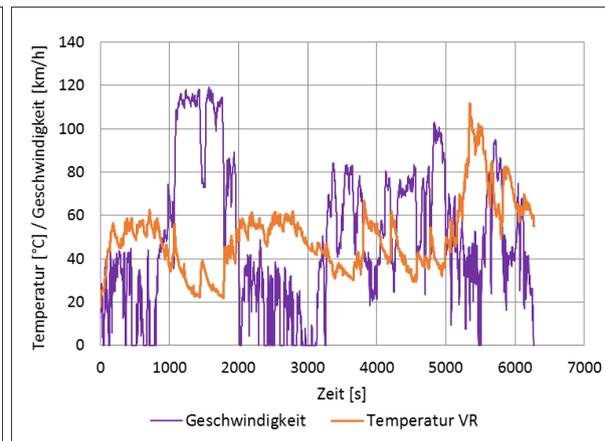


Abbildung 7-10: Vergleich Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf für Fahrer 3, Fahrt 1 – RDE-Zyk. Ilmenau

Deutlichere Unterschiede können für die Spitzentemperaturen (139,9 °C zu 111,7 °C) ausgemacht werden. Über alle analysierten Fahrten können Temperaturen < 140 °C (schleifendes Thermoelement) bestimmt werden, welche deutlich unterhalb der in Abschnitt 5.2.2 definierten kritischen Temperaturschwelle (Bimodalität) liegen. Weiterhin sind Unterschiede in der sektionalen Anzahl der Bremsungen (vgl. Abbildung 7-11) je Testperson auszumachen, welche mit der sektionalen Reibenergie und dem sektionalen Emissionsfaktor in Verbindung stehen. Die Anzahl der Verzögerungen im innerstädtischen Bereich (mittlere Anzahl: 94) weicht deutlich von der über die Sektion Land (28) sowie Autobahn (6) erfassten Anzahl ab. Die mittleren Geschwindigkeiten je Testperson und Sektion (vgl. Abbildung 7-12) verdeutlichen besonders im innerstädtischen Bereich einen geringen fahrerspezifischen Einfluss. Die Geschwindigkeit wird demnach primär durch die Streckenführung und das Verkehrsaufkommen bestimmt, welches zum Zeitpunkt der Messfahrten vergleichbar war [FEI20].

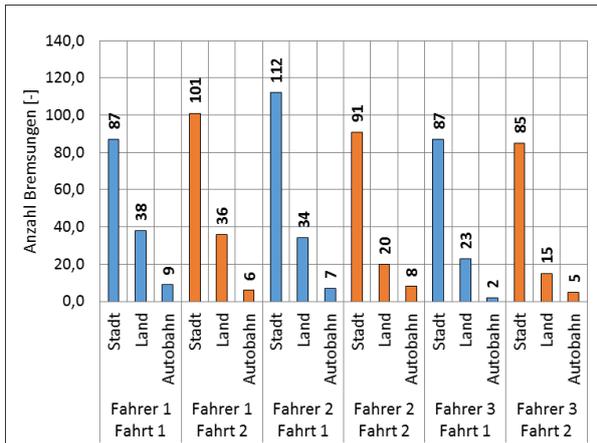


Abbildung 7-11: Vergleich der Anzahl der Bremsungen je Testperson und Sektion – RDE-Zyklus Ilmenau

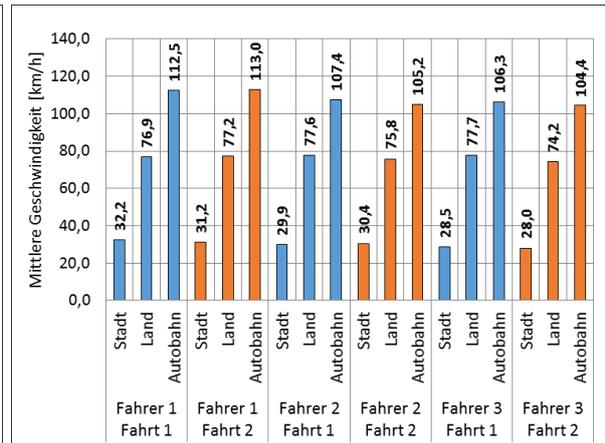


Abbildung 7-12: Vergleich mittlere Geschwindigkeit je Testperson und Sektion – RDE-Zyklus Ilmenau

Die mittleren Geschwindigkeiten über die Sektion Land, besonders über die Sektion Autobahn, weisen Unterschiede von bis zu 8,6 km/h (Abw.: 7,7 %; Fahrer 1, Fahrt 2 zu Fahrer 3, Fahrt 2) auf. Demnach bewirkt insbesondere die Sektion Autobahn eine Beeinflussung der mittleren Geschwindigkeit (Kennwert zur RDE-Konformität) des gesamten Zyklus (vgl. Tabelle 7-2).

Tabelle 7-2: Vergleich mittlere Geschwindigkeit je Testperson (Gesamt) – RDE-Zyklus Ilmenau

	Fahrer 1		Fahrer 2		Fahrer 3	
	Fahrt 1	Fahrt 2	Fahrt 1	Fahrt 2	Fahrt 1	Fahrt 2
Mittl. Geschwindigkeit [km/h]	54,2	53,7	51,8	51,0	49,1	49,4

Eine direkte Korrelation zwischen sektionalen Bremsdrücken und sektionalen Emissionsfaktoren kann nicht belegt werden. Es ist jedoch auffällig, dass für Fahrer 1 und 3 ein insgesamt defensiveres Verzögerungsverhalten nachgewiesen werden kann, wohingegen Fahrer 2 eine deutlich erhöhte Fahrdynamik zuzuweisen ist. Die Abweichungen im Verzögerungsniveau im innerstädtischen Bereich (mittlere Verzögerung: 0,94 m/s²; Standardabweichung: 0,05 m/s²) sind als gering zu bewerten. Eine hohe Varianz ist jedoch über die Sektion Autobahn (mittlere Verzögerung: 0,96 m/s²; Standardabweichung: 0,21 m/s²) zu beobachten. Aus den Untersuchungen können grundlegende Zusammenhänge und Korrelationen abgeleitet werden, welche auch auf fahrende Personen mit deutlich abweichendem Fahrverhalten übertragen werden können. Die abweichenden Emissionsfaktoren je Testperson von bis zu 53 % resultieren aus Unterschieden in der Anzahl der Bremsungen und besonders der geschwindigkeitsabhängigen Reibenergie. Fahrerspezifische Unterschiede kommen demnach mit zunehmender Initialgeschwindigkeit stärker zur Wirkung, wobei Unterschiede zwischen den einzelnen Testpersonen durch die Nutzung des Motorbremsmomentes zur Fahrzeugverzögerung resultieren. Damit ist festzuhalten, dass ein hoher Grad an Vergleichbarkeit nur dann gewährleistet wird, wenn der Einfluss der fahrenden Person, der Fahrbahnbedingungen (z. B. Topografie und Fahrbahnbeschaffenheit) und des Verkehrsaufkommens nahezu konstant sind und Abweichungen möglichst eliminiert werden. Diese Tests repräsentieren reale Fahrsituationen, die

Reproduzierbarkeit und Übertragbarkeit sind jedoch als grundsätzliche Herausforderung anzusehen. Damit eine generelle Vergleichbarkeit von Emissionstests gewährleistet werden kann, folgt in Abschnitt 7.3 eine Auflistung möglicher Ansätze zur Erweiterung der Verordnung (EU) 2018/1832 bezüglich der Messung partikelförmiger Bremsenemissionen.

7.2 Messungen unter variierenden Prüfumgebungen

Im vorangegangenen Abschnitt konnte die Funktionsfähigkeit des entwickelten Probenahmesystems für Gesamtfahrzeugmessungen im realen Fahrversuch bestätigt werden. In diesem Abschnitt erfolgt auf Basis des Probenahmesystems für mobile Anwendungen ein Vergleich unterschiedlicher Prüfumgebungen. Der umgebungsübergreifende Vergleich, indem der Schwungmassen-Bremsenprüfstand (SMP), der Gesamtfahrzeugprüfstand bzw. 4-Rollenprüfstand (RPS) sowie der reale Fahrversuch (RDE-konformer Testzyklus im öffentlichen Straßenverkehr gemäß Abschnitt 7.1) integriert werden, ermöglicht die Ableitung und Bewertung charakteristischer Merkmale. Es ist auch zu überprüfen, ob eine Verlagerung der Emissionstests vom realen Fahrversuch auf einen Gesamtfahrzeugprüfstand zur Eliminierung unvorhersehbarer Ereignisse umsetzbar ist und ein repräsentatives Ergebnis liefert.

7.2.1 Methodenentwicklung und Vergleich der Prüfumgebungen

Emissionsmessungen im realen Fahrversuch stellen aufgrund von fahrer- und fahrsituations-abhängigen Einflüssen die höchste Komplexitätsstufe dar. Im Gegensatz zu Prüfstandsversuchen, die unter definierbaren und reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt werden können, wirken bei RDE-Fahrten auch Umweltbedingungen auf die Messergebnisse ein. So sind z. B. schwankende Intensitäten der Hintergrundkonzentration zu beachten, welche im Falle von RPS- oder SMP-Prüfumgebung durch Filterung der Zuluft mittels prüfstandseitiger Klima- bzw. Filteranlage konstant gehalten werden. Ein vollständig abgedichtetes Probenahmesystem, welches ein niedriges und konstantes Niveau der Hintergrundkonzentration ermöglicht, wird demnach vorausgesetzt. Eine Gegenüberstellung von Anforderungen erfolgt in Abschnitt 7.3. Zur realitätsnahen Abbildung des Straßenverhaltens lässt sich im RPS-Betrieb die Straßenlast bzw. der Fahrwiderstand durch Regelung der die Rollen antreibenden Elektromotoren simulieren. Es können durchgeführte RDE-Fahrten durch Aufnahme des Geschwindigkeitssignals, des Höhenprofils, der Fahrwiderstandskurve überführt und nachgefahren werden. Dies ermöglicht die Durchführung von Emissionsmessungen anhand realitätsnaher Fahrsituationen ohne zufällige Einflüsse (z. B. Ampelphasen, Stau). Zudem können gezielt Umwelteinflüsse (Temperatur und Feuchtigkeit) oder Fahrzeug- und Konfigurationsvarianten simuliert und bewertet werden. Im Falle des SMP erfolgt die Simulation eines Trägheitsmomentes, welches das Fahrzeug (inkl. Messequipment und 1 fahrenden Person) repräsentiert. Auf die Simulation eines geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstandes, dynamischer Radlasten oder Bremskraftverteilungen wird verzichtet. In Tabelle 7-3 sind einflussreiche Merkmale je Prüfumgebung

gegenübergestellt. Zur Gewährleistung vergleichbarer Umgebungsbedingungen ist die korrekte Nachbildung des Fahrwiderstandes am RPS, d. h. die Verknüpfung von physikalischen Gesetzen mit dem infolge der Interaktion zwischen Fahrzeug und Umwelt beobachtbaren Verhalten, essentiell.

Tabelle 7-3: Vergleich charakteristischer Merkmale variierender Prüfumgebungen

	Realer Fahrversuch (RDE)	4-Rollenprüfstand (RPS)	Schwingmassen-Bremsenprüfstand (SMP)
Fahrprofil	Fahrer- und Fahrsituations-abhängige Fahrmanöver (geringer Grad an Reproduzierbarkeit)	(Computergestützte-) Fahrprofile, geringer Fahrereinfluss (hoher Grad an Reproduzierbarkeit)	(Computergestützte-) Fahrprofile; Sehr hoher Grad an Reproduzierbarkeit
Fahrwiderstände	Luftwiderstand, translatorische und rotatorische Beschleunigung, Steigung, Rollwiderstand sowie zufällige Einflüsse (Windgeschwindigkeit/Anströmwinkel, Temperatur, Feuchte)	Regelbar über Fahrwiderstandskurve (quadratisches Polynom der Fahrgeschwindigkeit), translatorische Beschleunigung und simulierte Steigung	Simulation eines fahrzeugspezifischen Trägheitsmomentes
Fahrzeug- / Fahrwiderstands-simulation	Fahrwiderstand durch Eigenschaften des Fahrzeuges (Antriebsstrang, Reifen), Geschwindigkeit, Beschleunigung oder äußere Einflüsse gegeben	Simulation des Fahrwiderstandes über ein mathematisches Modell (Fahrwiderstandskurve), translatorische Beschleunigung, simulierte Steigung	Simulation des fahrzeugspezifischen Trägheitsmomentes (physikalisch/rotierende Masse oder elektr. erzeugte Rotationsenergie)

Neben dem Einfluss der Fahrbahn (Reibungskoeffizient) und der Streckenführung (z. B. Kurven und Steigungen) bewirken auch Einflüsse der Umgebung (Wind, Temperatur und Feuchte) eine Änderung der Längsdynamik. Zur Simulation des Fahrwiderstandes am RPS ist eine Fahrwiderstandskurve (quadratisches Polynom der Fahrgeschwindigkeit bzw. mathematische Approximation des realen Fahrzeugbetriebs) sowie Anteile der translatorischen Beschleunigung, der Steigung und des Rollwiderstandes zu berücksichtigen [HAK18] [MAY02]:

$$F = F_0 + F_1 \cdot v + F_2 \cdot v^2 + F_3 \cdot v^3 + F_4 \cdot v^4 + m_F \cdot (\dot{v} + g \cdot \sin \alpha) \quad (7.1)$$

Der im Stillstand vorhandene Fahrwiderstand ist primär dem Rollwiderstand zuzuschreiben, welcher vom Reifentyp, von der Radlast oder vom Reifendruck beeinflusst wird. Zur Bewertung der Gültigkeit der in Abbildung 7-13 dargestellten Fahrwiderstandskurve (inkl. Angabe der durch die Koeffizienten A, B und C beschriebenen Fahrwiderstandskurve) dient die Kraftstoffdurchflussrate (vgl. Abbildung 7-14), welche direkt proportional zum wirkenden Gesamtfahrwiderstand ist. Die Bestimmung erfolgt mittels Durchflusssensor unter konstanten Fahrgeschwindigkeiten (60, 80, 100 und 120 km/h) und Variation der Fahrstufe. Der Vergleich zeigt eine hinreichende Übereinstimmung mit hoher Anpassungsgüte im mittleren

Geschwindigkeitsbereich (60 km/h). Abweichungen sind im fünften Gang bei 100 km/h mit -4,1 % und im vierten Gang bei 80 km/h mit +4,1 % der Straßenwerte nachweisbar.

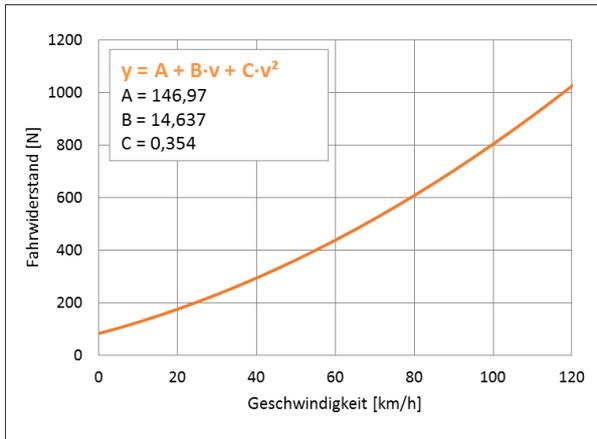


Abbildung 7-13: Fahrwiderstandskurve Versuchsfahrer zur Fahrsimulation im RPS

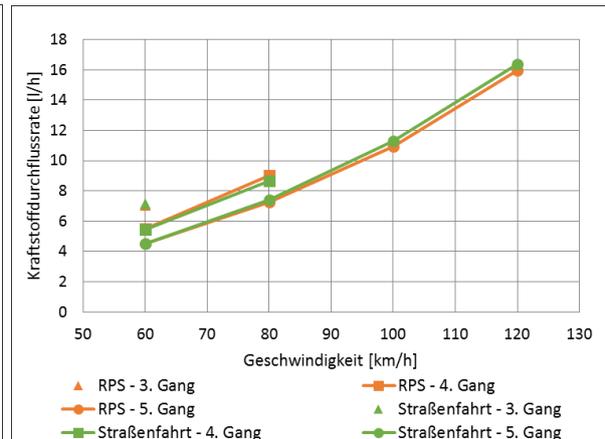


Abbildung 7-14: Vergleich Kraftstoffdurchflussrate RDE und RPS

Neben der Überprüfung der Kraftstoffflussrate dient ein Vergleich der mittleren Verzögerung (vgl. Abbildung 7-15) zwischen RDE und RPS unter Variation der Geschwindigkeit und des Bremsdruckes (angelehnt an die AK-Master-Druckreihen 4.1–4.3) zur Bewertung der Genauigkeit des Simulationsmodells. Die Steigungen der Regressionsgeraden unterscheiden sich nur gering, was als akzeptables Ergebnis bezüglich der Fahrwiderstandssimulation anzusehen ist. Die Auflösung des Verzögerungsverhaltens je Geschwindigkeitsbereich der Straßenfahrt (vgl. Abbildung 7-16) bestätigt die Abhängigkeit der Fahrzeugverzögerung von der Geschwindigkeit, deren Einfluss im Vergleich zum Bremsdruck gering ausfällt [LIL19].

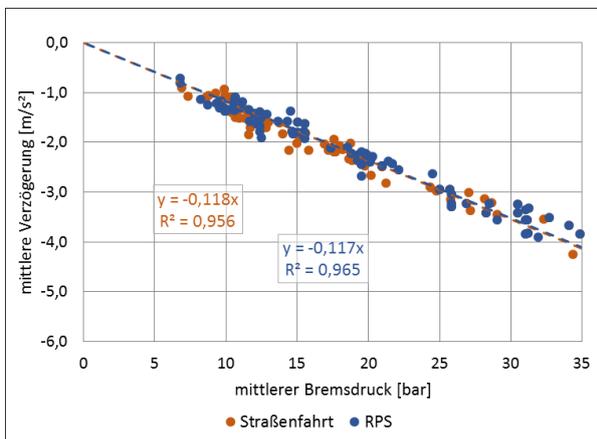


Abbildung 7-15: Vergleich Verzögerung RDE vs. RPS über Geschwindigkeits- und Druckvariation

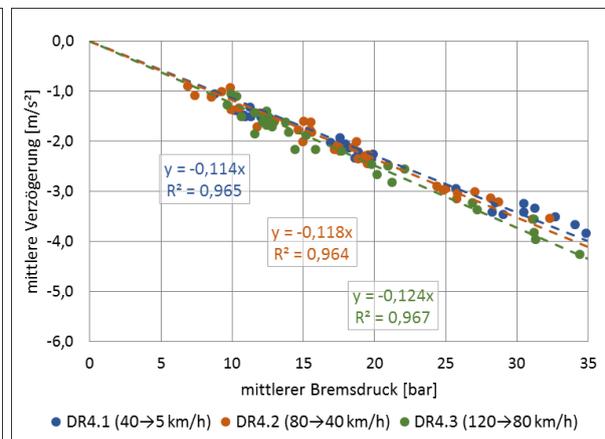


Abbildung 7-16: Vergleich Verzögerung RDE über Geschwindigkeits- und Druckvariation

Zur Verifizierung des Einflusses des aus dem Antriebsstrang resultierenden Verzögerungsmomentes auf das Emissionsverhalten folgt ein Vergleich zwischen ein- und ausgekuppeltem Antriebsstrang anhand von Einzelbremsungen, angelehnt an die AK-Master-Druckreihen. Das Verzögerungsmoment des vorliegenden 4-Zylinder-Dieselmotors mit 5-Gang-Schaltgetriebe wird primär von der Motordrehzahl und dem eingelegten Gang (Übersetzung) beeinflusst und wirkt demnach unterschiedlich stark auf die Antriebsräder. Zudem nimmt der relative Anteil

des Motormomentes an der Fahrzeugverzögerung mit zunehmendem Bremsdruck ab. In Abbildung 7-17 sind geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstände gegenübergestellt. Es geht hervor, dass die Differenz zwischen aus- und eingekuppeltem Zustand unter Berücksichtigung des je Gang eingestellten Übersetzungsverhältnisses unter Geschwindigkeitszunahme abnimmt. Aus dem Vergleich der je Geschwindigkeitsbereich und Bremsdruckstufe erfassten Emissionskennzahl (vgl. Abbildung 7-18; Mittelwerte aus je 10 Einzelbremsungen) kann wiederum keine eindeutige Tendenz auf das Emissionsniveau nachgewiesen werden, was dem primären Einfluss der Initialgeschwindigkeit zuzuschreiben ist.

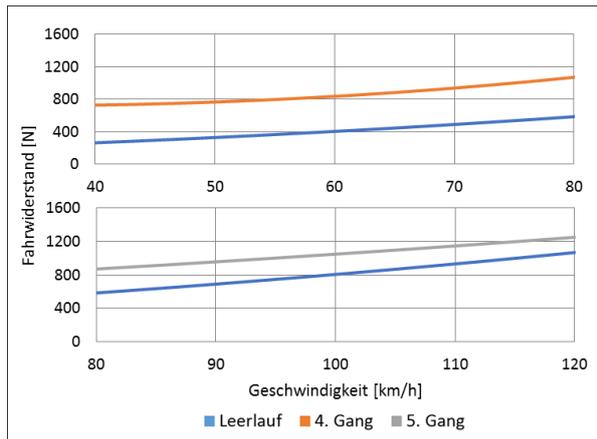


Abbildung 7-17: Vergleich Fahrwiderstandskurven unter dem Einfluss der Geschwindigkeit und der Fahrstufe

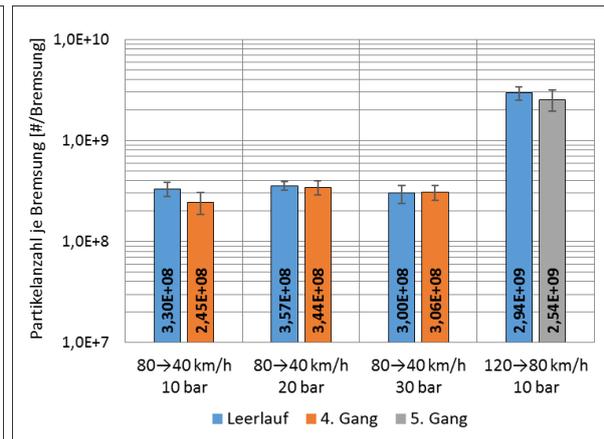


Abbildung 7-18: Vergleich Partikelanzahl je Bremsung unter dem Einfluss des Motorbremsmomentes

7.2.2 Vergleich zwischen stationärem und mobilem Probenahmesystem

Zur Bewertung von Unterschieden bei der Probenahme mittels Probenahmesystem für die stationäre (Evakuierung in Fahrtrichtung) und mobile Anwendung folgt ein Vergleich am SMP. Aufbauend auf den in Abschnitt 3 vorgestellten Erkenntnissen zur Erreichung maximaler Transporteffizienz wird im Falle des stationären Probenahmesystems ein Evakuierungsvolumenstrom von 850 m³/h und im Falle des mobilen Probenahmesystems von 120 m³/h (Volumenstromverhältnisfaktor: 7,08) definiert. Die Erfassung der Anzahlkonzentration erfolgt mittels 10 nm-CPC (CPC 2). Als Testzyklen dienen der WLTC und der JRC-novel cycle. Aus den Temperaturprofilen je Testzyklus können gemäß Abbildung 7-19 und Abbildung 7-20 am Beispiel eines ECE-kf Unterschiede in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit abgeleitet werden. Das mobile Probenahmesystem weist durch höhere lokale Strömungsgeschwindigkeiten infolge eines reduzierten Gehäusevolumens eine verbesserte Kühlleistung für Geschwindigkeiten ≤ 70 km/h auf [UEB19], wobei sich diese Beobachtung für höhere Geschwindigkeiten umkehrt. Im Bereich der (fahrzeug-) inneren und äußeren Gehäusehälfte kommt es zu einem Temperaturanstieg, woraus eine reduzierte Wärmeübertragungsrate durch Konvektion oder Wärmestrahlung folgt. Die Temperaturunterschiede können bis zu 16 °C betragen. Ein Linearitätsvergleich am Beispiel der AK-Master-Druckreihen verdeutlicht, dass aus den geschwin-

digkeitsabhängigen Temperaturunterschieden keine relevanten Unterschiede im Konzentrationsniveau resultieren. Die mittels stationärem Probenahmesystem erfasste Partikelanzahl je Bremsung über Druckreihe 4.1 entspricht etwa 85,3 % des Referenzwertes (mobiles Probenahmesystem). Unter Geschwindigkeitszunahme hebt sich der Unterschied zunehmend auf.

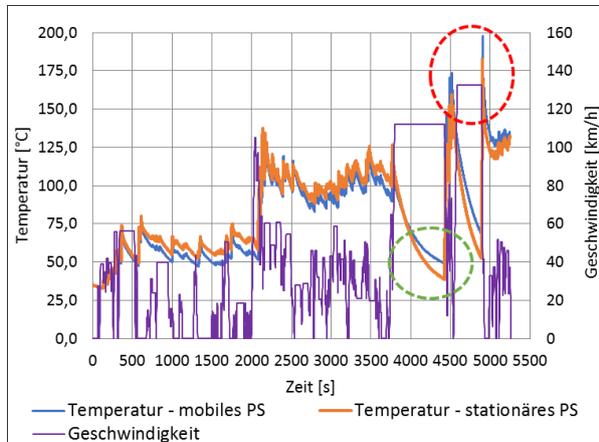


Abbildung 7-19: Temperaturvergleich stationäres und mobiles Probenahmesystem – JRC-Zyklus (Sek. 10)

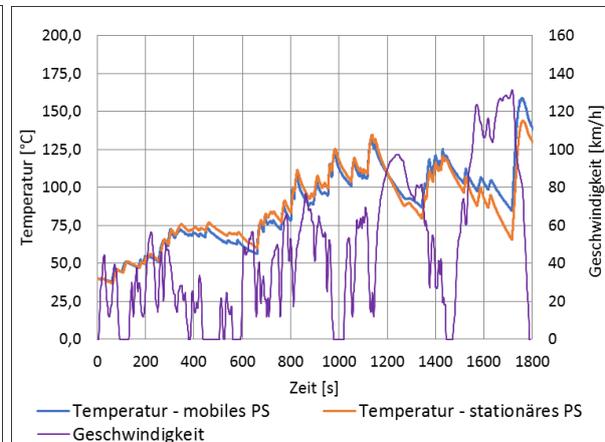


Abbildung 7-20: Temperaturvergleich stationäres und mobiles Probenahmesystem – WLTC (Klasse 3)

7.2.3 Vergleich von Prüfumgebungen auf Basis von Testzyklen und Druckprofilen

In diesem Abschnitt folgt ein Vergleich zwischen allen beschriebenen Prüfumgebungen (RDE, RPS und SMP). Die Untersuchung erfolgt anhand eines RDE-konformen Testzyklus, des JRC-novel cycle und der AK-Master-Druckreihen nach festgelegter Prozedur (vgl. Tabelle 7-4). Der RDE-konforme Testzyklus ist gemäß Abschnitt 7.1 durch ein dynamisches Geschwindigkeitsprofil gekennzeichnet und ermöglicht einen Vergleich zwischen realem Fahrversuch und RPS.

Tabelle 7-4: Testprozedur zum Vergleich variierender Prüfumgebungen

Testzyklus	Beschreibung	RDE	RPS	SMP
RDE-konformer Zyklus (Ilmenau)	Dynamischer Geschwindigkeitswechsel, reales Fahrprofil	x	x	
JRC-novel cycle (Sek. 10)	Konstante Geschwindigkeitsänderungen (verzögerungsgesteuert und Vorgabe einer Initialgeschwindigkeit)		x	x
AK-Master-Druckreihen	Geschwindigkeitswechsel über konstantem Bremsdruck; Vorgabe	x	x	x

Die dynamischen Bedingungen umfassen den Einfluss der Straßenneigung (Höhenprofil) und der Fahrdynamik (Beschleunigung/Verzögerung). Ein Vergleich zwischen RPS und SMP erfolgt ohne Berücksichtigung dynamischer Fahrscenarien am Beispiel des verzögerungsgesteuerten JRC-novel cycle. Die Umsetzung des RDE-konformen Testzyklus wie auch des JRC-novel cycle am RPS erfolgt über die Darstellung des Geschwindigkeits-Zeit-Verlaufes inkl. der fahrenden Person angezeigtem Geschwindigkeitsdelta von ± 2 km/h über einen Bildschirm (in Fahrzeugfront). Die Verzögerungen wurden jeweils im ausgekuppelten Zustand

durchgeführt. Der Vergleich anhand der AK-Master-Druckreihen erfolgt über alle Prüfumgebungen hinweg. Der Geschwindigkeits- und Druckverlauf des RDE-konformen Testzyklus ist in Abbildung 7-21 dargestellt. Aus den Geschwindigkeitsverläufen von realem Fahrversuch und RPS ist gemäß Abbildung 7-22 ein hoher Grad an Linearität nachweisbar, wobei über den Verlauf des RPS-Tests temporäre Abweichungen > 2 km/h vorliegen. Fahrerabhängige Einflüsse entstehen besonders unter dynamischen Geschwindigkeitswechsel (bezogen auf Zeit und Intensität), was die Folge differenzierter Bremsdruckgradienten und Bremsdruckprofile ist.

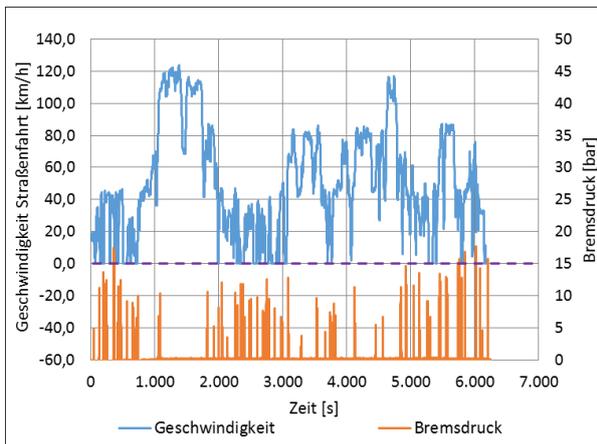


Abbildung 7-21: Geschwindigkeits- und Bremsdruckverlauf – RDE-Zyklus Ilmenau

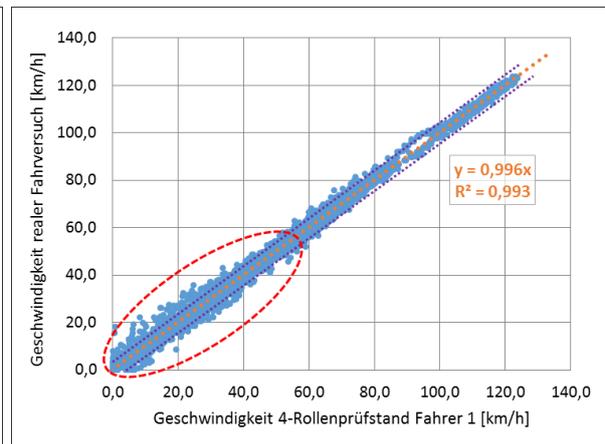


Abbildung 7-22: Linearität Geschw.-verlauf RDE und RPS am Beispiel des RDE-Zyklus Ilmenau (Fahrer 1)

Die Bremsdruckprofile der Probandenfahrten weisen teils starke Abweichungen (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,336$) auf, weshalb die generelle Umsetzung der Verzögerungsvorgabe am RPS als Herausforderung anzusehen ist. Die Probanden führen kontinuierliche Druckänderungen durch, um die Geschwindigkeits- bzw. Verzögerungsvorgabe einzuhalten. Damit kann ein eingeschränktes bzw. reduziertes Beschleunigungsempfinden abgeleitet werden.

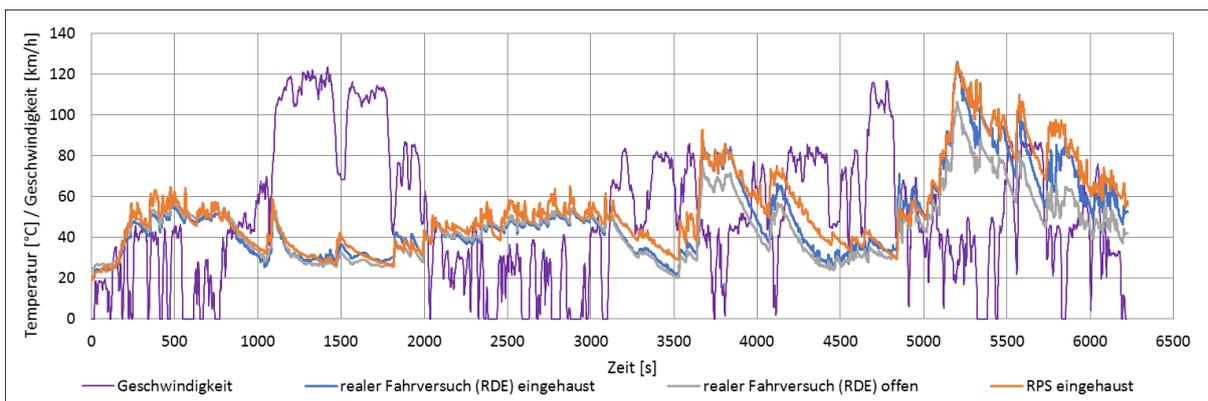


Abbildung 7-23: Vergleich Temperaturverlauf Straßenfahrt gegen 4-Rollenprüfstand – RDE-Zyklus Ilmenau

Der Vergleich der in Abbildung 7-23 gegenübergestellten Temperaturprofile, erfasst mittels schleifender Thermoelemente über den Verlauf der Straßenfahrt und am RPS, offenbart ein erhöhtes Temperaturniveau der mittels Probenahmesystem ausgestatteten Bremse gegenüber der offenen, ungekapselten Bremse. Als Begründung ist eine reduzierte Kühlleistung infolge des installierten Gehäuses zu nennen. Im innerstädtischen Bereich gleichen sich die Temperaturprofile hingegen an. Hierbei bewirkt die kontinuierliche Strömung innerhalb des

Probenahmesystems einen positiven Effekt. Die mittlere Temperaturabweichung beträgt 4,1 °C, die maximale Temperaturabweichung 17,3 °C. Die Emissionsfaktoren (RPS) sind gemäß Abbildung 7-24 durch fahrerspezifische Einflüsse gekennzeichnet. Insgesamt sind damit die Einflüsse zwischen den untersuchten Prüfumgebungen als vielfältig zu beschreiben. Neben Abweichungen über die Phase der Beschleunigung sind fahrerspezifische Abweichungen im Bremsdruckprofil und Geschwindigkeitsverlauf (Initialbedingung) auszumachen. Auch Konditionierungseinflüsse sowie dynamische Änderungen im Reib- und Verschleißverhalten (vgl. Abschnitt 5.1) sind zu berücksichtigen. Im Vergleich zum realen Fahrversuch sind die Freiheitsgrade unter Einhaltung des Geschwindigkeitsbereiches dennoch deutlich reduziert.

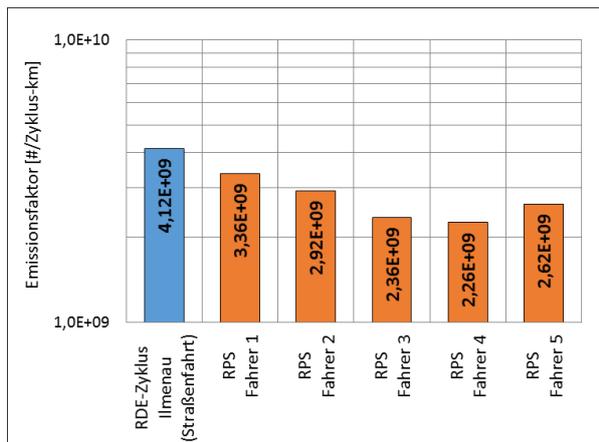


Abbildung 7-24: Vergleich mittlerer Bremsdruck RDE und RPS – RDE-Zyklus Ilmenau [HES19a, FEI20]

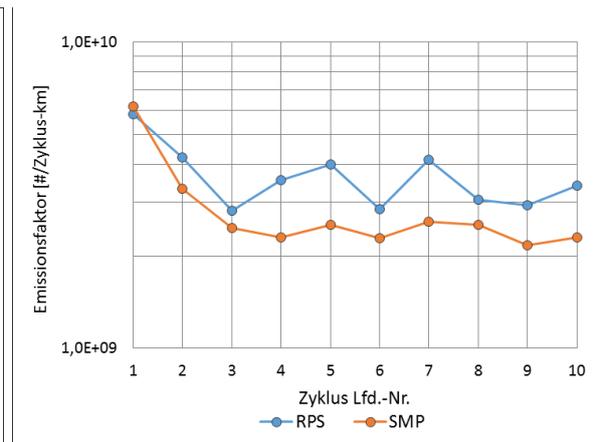


Abbildung 7-25: Vergleich Partikelanzahl je Zyklus-km; RPS – SMP über JRC-novel cycle (Sek. 10)

Zur Gegenüberstellung von RPS und SMP dient der verzögerungsgesteuerte JRC-novel cycle (Sek. 10). Die Herausforderung für die fahrende Person liegt in der Nachbildung des Beschleunigungs- und Verzögerungsvorganges sowie der Phasen konstanter Geschwindigkeit am RPS. Der Beschleunigungsvorgang erfolgt je Einzelbeschleunigung mit einem konstanten Wert von bis zu 1,29 m/s², wobei die mittlere positive Beschleunigung \bar{a}_{pos} über die Sektion 10 ca. 0,75 m/s² beträgt (mittlere neg. Beschleunigung \bar{a}_{neg} : -1,00 m/s²). Neben temporären Geschwindigkeitsabweichungen können fahrerbedingte Abweichungen im Bremsdruckprofil nachgewiesen werden, was besonders der fehlenden Fahrwiderstandssimulation zuzuweisen ist. Der Vergleich der in Abbildung 7-25 gegenübergestellten Emissionsfaktoren verdeutlicht ein mit zunehmender Anzahl an Zyklen erhöhtes Emissionsniveau bei einer insgesamt geringeren Reproduzierbarkeit bzw. erhöhten Standardabweichung durch den Einfluss der fahrenden Person (Bremsdruckprofile, Bremsdruckgradienten) am RPS. Letztlich folgt ein Vergleich über alle Prüfumgebungen anhand von Einzelbremsungen gemäß der AK-Master-Druckreihen 4.1–4.3 (Initialtemperatur: 100 °C). Durch computergestützte Geschwindigkeitseinstellung können Einflüsse durch abweichende Initialgeschwindigkeit für die RDE- und RPS-Messungen reduziert werden. Ein Linearitätsvergleich der Mittelwerte von 10 Einzelbremsungen einer Versuchsperson (Reduktion der Einflüsse unterschiedlicher fahrender Personen) je Geschwindigkeitsbereich und Bremsdruckstufe offenbart gemäß Abbildung 7-26 und Abbildung 7-27 den

bereits bekannten Einfluss der Initialgeschwindigkeit auf die Emissionskennzahlen bei einem insgesamt linearen Zusammenhang.

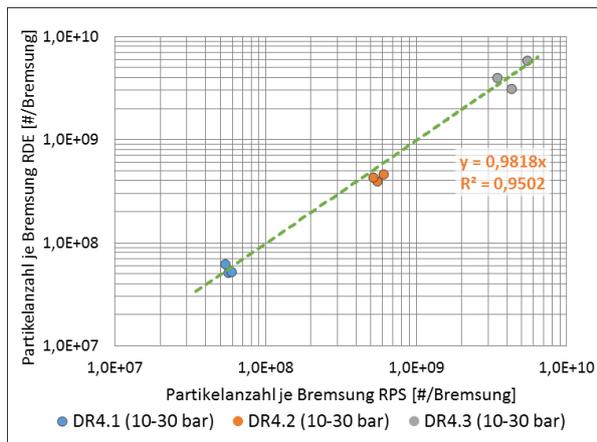


Abbildung 7-26: Linearität PN je Bremsung Straßenfahrt gegen 4-RPS – AK-M.-Druckreihen 4.1–4.3 (30 bar)

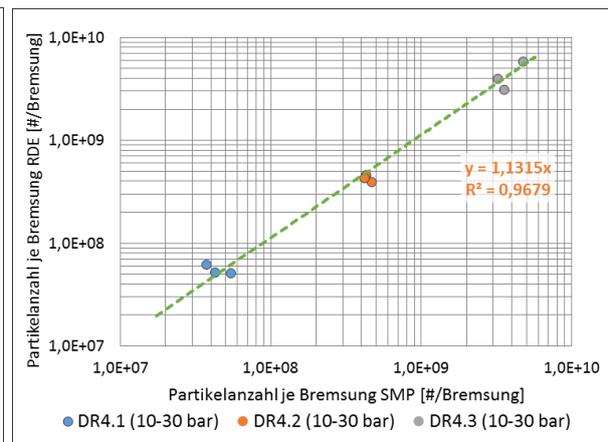


Abbildung 7-27: Linearität PN je Bremsung Straßenfahrt gegen SMP – AK-M.-Druckreihen 4.1–4.3 (30 bar)

Aus dem RDE-SMP-Vergleich kann eine reduzierte Emissionskennzahl für SMP-Messungen und niedrigen Geschwindigkeiten (40 → 5 km/h) nachgewiesen werden, deren Abweichung jedoch als klein zu deklarieren ist. Als Erklärung dient der oben aufgeführte Ansatz nach fehlender Fahrwiderstandssimulation und verzögerungsabhängiger Radlaständerungen. Eine vergleichbare Aussage kann auch auf den Vergleich zwischen RPS und SMP übertragen werden. Unter identischen Prüfbedingungen (Geschwindigkeitsbereich, Initialtemperatur, Bremsdruck) konnten für die vergleichenden Messungen unterschiedliche Standardabweichungen bestimmt werden. Aus dem Linearitätsvergleich geht dennoch ein insgesamt hoher Grad an Linearität und damit eine generelle Vergleichbarkeit der Emissionskennzahlen hervor. Für die Standardabweichung je Prüfumgebung und Geschwindigkeitsbereich kann neben einem erwartungsgemäßen Anstieg unter Zunahme der Geschwindigkeit ein deutlich erhöhter Wert für Messungen im realen Fahrversuch gegenüber dem RPS und SMP bestimmt werden.

7.3 Fazit zu den Messungen unter variierenden Prüfumgebungen

Aus den vorangegangenen Abschnitten konnten unterschiedlichste Einflussgrößen bestimmt werden, welche das Partikelemissionsverhalten unter variierenden Prüfumgebungen beeinflussen. Eine Gegenüberstellung dieser Einflussgrößen ist Tabelle 7-5 zu entnehmen. Darüber hinaus konnte die Funktionsfähigkeit des entwickelten Konstantvolumen-Probenahmesystems für eine mobile Anwendung nachgewiesen werden. Begonnen mit Probandenstudien im realen Fahrversuch (RDE) konnte unter Einhaltung der RDE-Konformität (Verordnung (EU) 2018/1832) eine hohe fahrer- und verkehrsbedingte Variation der umgesetzten Reibenergie und der damit korrelierenden anzahlbezogenen Emissionsfaktoren, insbesondere über die Sektionen Land und Autobahn, nachgewiesen werden. Im Falle der Sektion Stadt fällt die Dynamik der fahrenden Person nur gering ins Gewicht. Die dominierende Beeinflussung resultiert aus dem Streckenprofil und der Verkehrssituation. Unter Ausnutzung der gültigen Grenzen

können die Unterschiede für unterschiedliche fahrende Personen und Fahrzeuge (abweichende Fahrdynamik) größer gegenüber den generierten Ergebnissen sein.

Tabelle 7-5: Einflussgrößen auf das Emissionsverhalten an variierenden Prüfumgebungen

Untergruppe	Parameter	Beschreibung
Fahreinfluss	Geschwindigkeit	Korrelation mit der Reibenergie, Maß für das Emissionsniveau
	Bremsdruckprofil	In Abhängigkeit vom Verzögerungswunsch der fahrenden Person
Initialbedingungen	Konditionierung	Beeinflussung durch abweichenden Konditionierungszustand; Konditionierung im realen Fahrversuch durch wechselnde Fahrsituationen als Herausforderung; im Falle des RPS und SMP regelbar
Umwelt- und Umgebungseinflüsse	Steigung/Topografie	Bei Strecken mit erhöhtem Gefälleanteil folgt ein Anstieg der (sektionalen) Reibenergie infolge der Höhendifferenz und Bremsdauer
	Verkehrssituation	Beeinflussung der Anzahl an Bremsungen sowie der Verzögerung je Bremsung durch den vorausfahrenden Verkehr
	Umgebungstemperatur	Beeinflussung der Kühlleistung; Unterschiede zwischen offener und umhauster Bremse insbesondere sektional nachweisbar
	Fahrbahnbeschaffenheit	Beeinflussung der Initialgeschwindigkeit und Verzögerung durch z. B. Feuchtigkeit; Beeinflussung der Reibenergie und Reibleistung
Fahrwiderstand	Roll- und Luftwiderstand	Anteil am Gesamtbudget steigt unter Zunahme der Geschwindigkeit; erhöhter Fahrwiderstand erzeugt eine Reduktion der Reibenergie
	Motorbremsmoment	Einfluss auch unter niedrigen Verzögerungen sehr gering; jedoch Reduktion der Brems-Initialgeschwindigkeit und Reibenergie möglich
Fahrzeugbeschaffenheit	Fahrzeugmasse	Beeinflussung der Reibenergie bzw. Reibleistung und der generellen Fahrdynamik (inkl. Messequipment, fahrende Person)

Um die fahrerspezifischen Abweichungen zu reduzieren und die Vergleichbarkeit zu erhöhen, sind die Grenzen und Randbedingungen enger zu beschreiben und der Fokus auf den Einfluss der Verzögerung bzw. Bremsenaktuierung zu legen. Dazu sind in Tabelle 7-6 einige Ergänzungen zusammengefasst, welche einen Ansatz für die Entwicklung einer RDE-Testprozedur darstellen. Es ist jedoch festzuhalten, dass auch unter Vorgabe deutlich engerer Grenzen die Individualität des realen Fahrversuches zu teils deutlichen sektionalen Unterschieden führen kann, wodurch die Emissionsfaktoren immer als Momentaufnahme zu betrachten sind. Um den individuellen Charakter der Testfahrt zu bewerten, ist eine nachgeschaltete Analyse der Datensätze unerlässlich. Die Durchführung einer RDE-konformen Messung unterteilt sich in die Sektionen Prüfvorbereitung, Prüflauf und Prüfende bzw. Nachbereitung. Unterschiede im Vergleich zum Prüfzyklus am Schwungmassen-Bremsenprüfstand (vgl. Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2) liegen in der Durchführung einer robusten Einlaufprozedur und in der Bewertung des Fahrprofils bzw. der Fahrdynamik, welche im Falle von Prüfstandtests naturgemäß entfällt. Zu bewerten ist auch die Transporteffizienz und das Partikelverteilungsprofil (Uniformitätsindex) unter Vorgabe von Mindestanforderungen (vgl. Abschnitt 8.2).

Tabelle 7-6: Vorschlag zur Erweiterung der Verordnung (EU) 2018/1832 zur Messung von Bremsenemissionen

Untergruppe	Anforderung	Beschreibung
Fahrstrecke	Negative Höhendifferenz/Topografie	Festlegung der kumulierten negativen Höhendifferenz je Sektion bzw. je Zyklus als Vergleichsnormale (insbesondere zyklusübergreifend); Beeinflussung von Bremsdauer und Temperaturprofil.
Prüfvorbereitung	Messdatenerfassung	Erfassung des Emissionsverhaltens (PEMS), der Temperaturen (der Ansaugluft sowie mittels eingestemmter Thermoelemente im Reibring der Scheibe), Bremsdruck, Höhenprofil und der Volumenströme (CVS mittels Differenzdrucksensor) über ein zentrales Datenerfassungssystem zu gewährleisten.
	Konditionierungsprozedur (Bedding)	Zur Reduktion unvorhersehbarer Ereignisse im Straßenverkehr empfiehlt sich die Durchführung der Einlaufprozedur auf einem Gesamtfahrzeugprüfstand. Dies ermöglicht die Durchführung der in Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2 beschriebenen Trendanalyse, wobei ein dem Fahrprofil des RDE-Zyklus vergleichbarer Einlaufzyklus durch Mehrfachwiederholung angewandt wird. Die Demontage der Komponenten ist nach erfolgter Einlaufprozedur unzulässig (erneute Konditionierung).
	Bestimmung der Hintergrundkonzentration	Zur Bewertung der Dichtheit und Filtereffizienz empfiehlt sich die Bewertung des Hintergrundes vor und nach dem Zyklus gemäß Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2, wobei 5 Minuten nach Stabilisierung der Flussrate eine Messung über 5 Minuten folgt. Für RDE-Messungen ist die Bestimmung am Start- und Endpunkt des Zyklus erforderlich; Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte) sind zu erfassen.
Prüflauf	Initialbedingungen	Gemäß der Vorgabe nach Kaltstart dient ein thermisch unkonditioniertes Bremsensystem zur Gewährleistung realer Fahrbedingungen. Die Vorgabe einer Initialtemperatur (z. B. 40 °C) ist zur Reduktion der Prüfdauer essentiell.
Prüfende / Auswertung	Fahrerspezifische Vergleichsnormale	Bestimmung sektionaler und totaler Reibenergie, Verzögerung, Verzögerungszahl, Bremsdrücke, Temperaturen und Emissionsfaktoren zur Bewertung der Messung; Trennung in Primär- und Sekundäremissionen sowie Emissionen während Stillstandphase (Hintergrundkonzentration).
	Kinematische Bewertungszahl zur Fahrdynamikbewertung	Sektionale, relative negative Beschleunigung RNA bzw. $(v \cdot a_{neg})_{95}$ sind als 95-Perzentil des Produkts der Fahrzeuggeschwindigkeit mit negativer Beschleunigung, die Anzahl der Datensätze ($f = 1 \text{ Hz}$) mit einem Verzögerungswert je Geschwindigkeitsintervall zu definieren (Beschränkung der Fahrweise). Anzahl der sektionalen Datensätze mit Beschleunigung $a > -0,1 \text{ m/s}^2$ muss ≥ 100 sein.
	Temperaturverteilung (linke/rechte Bremse)	Bewertung der Temperaturprofile zwischen den Bremsen je Achse (mit/ohne Einhausung) unter Beachtung zulässiger Grenzen (Mittelwert je Zyklus sowie Spitzentemperatur). Bei Über-/Unterschreitung ist der Prüflauf zu wiederholen.

Zur Bewertung der Fahrdynamik ist die Definition kinematischer Bewertungszahlen bzw. Fahrindikatoren ein essentieller Bestandteil. Das 95-Perzentil des Produkts der Fahrzeuggeschwindigkeit mit negativer Beschleunigung $(v \cdot a_{neg})_{95}$ sowie die relative negative Beschleunigung RNA_k der in den Sektionen Stadt, Land und Autobahn gefahrenen Anteile sind zur Bewertung der negativen Beschleunigung umzuschreiben:

$$RNA_{k_i} = \sum_j (\Delta t \cdot (v \cdot a_{neg})_{j,k_i}) / \sum_i d_{i,k_i}, \quad j = 1 \text{ bis } M_{k_i}, i = 1 \text{ bis } N_{k_i}, \quad (7.2)$$

Dabei ist $(v \cdot a_{neg})_{j,k_i}$ die tatsächliche Fahrzeuggeschwindigkeit pro negativer Beschleunigung größer als $-0,1 \text{ m/s}^2$ im Zeitabschnitt j unter Berücksichtigung der innerhalb der Sektionen Stadt, Land und Autobahn gefahrenen Anteile, Δt die Zeit eines Zeitschrittes i und d_{i,k_i} die im Zeitschritt i zurückgelegte Strecke eines Intervalls k_i . M_k ist die Anzahl der innerhalb der Sektionen gefahrenen Stichproben und N_k die Gesamtanzahl der gefahrenen Anteile [HIE15]. Durch die Verwendung von Fahrindikatoren wird beispielsweise die primäre Nutzung des Fahrwiderstandes inklusive Motorbremsmoment zur Verzögerung reduziert, was die Vergleichbarkeit bezüglich sektionaler Reibenergie und Emissionsfaktoren erhöht. Darüber hinaus ist die Definition zulässiger negativer sektionaler Höhendifferenzen, einer Konditionierungsprozedur als auch die Bestimmung der Hintergrundkonzentration zur Bewertung der Systemdichtheit erforderlich. Das verwendete Messsystem auf Basis eines CPC für mobile Anwendungen (PN-PEMS), welches mit einer internen Verdünnungsstufe (Faktor 10) zur Erfassung von Konzentrationen bis $1\text{E}+05 \text{ \#/cm}^3$ ausgestattet ist, stellte die Basis der durchgeführten Untersuchungen im realen Fahrversuch dar. Um die Robustheit des Messsystems auch bei deutlich höheren Konzentrationen ($> 1\text{E}+05 \text{ \#/cm}^3$) zu gewährleisten, ist der Aufbau vergleichbar zum CPC für stationäre Anwendungen (vgl. Abschnitt 8.2) mit einer thermischen Vorbehandlung zur Abscheidung volatiler Bestandteile (z. B. Evaporation tube) bei einem Gesamtverdünnungsfaktor von > 10 umzusetzen. Die Temperaturerfassung mittels schleifender Thermoelemente ist infolge kontinuierlicher Justierarbeiten als unzureichend robust für regulatorische Messungen zu bewerten. Zudem ist durch den permanenten Kontakt mit der Reibfläche eine nicht vollständig auszuschließende Beeinflussung des Emissionsverhaltens zu erwarten. Daher empfiehlt sich der Übergang zu eingestemten Thermoelementen, deren Anwendung eine Telemetrieinheit zur Übertragung des Messsignals voraussetzt.

8 Zusammenfassung

8.1 Partikelemissionsverhalten und Messbarkeit

Eine vollumfängliche Beschreibung der Vorgänge der Partikelinjektion und Partikelverteilung bis hin zur Probenahme oder Abscheidung sind die Grundvoraussetzungen für die Entwicklung effizienter Probenahmesysteme zur Gewährleistung einer repräsentativen Probenahme. Die Ziele dieser Arbeit bestanden zunächst darin, Probenahmesysteme zur Bestimmung anzahl- und massebezogener Emissionsfaktoren unter variierenden Prüfumgebungen zu entwerfen und auf Anwendbarkeit zu überprüfen sowie neue methodische Ansätze zur numerischen Strömungssimulation und experimentellen Validierung der Partikelemissionsdynamik zu entwickeln. Darüber hinaus lag das Ziel in der Überprüfung und Bewertung physikalischer Messprinzipien zur Bestimmung von Partikeleigenschaften, woraus letztlich eine vollumfängliche Charakterisierung und Bewertung von Einflüssen unter variierenden Prüfumgebungen, d. h. vom Schwungmassen-Bremsenprüfstand bis hin zum realen Fahrversuch, ermöglicht wird. Zudem erfolgte die Identifizierung einer Vielzahl von Einflussgrößen (vgl. Abbildung 8-1), deren Intensität durch experimentelle Untersuchungen bewertet wurde. Berücksichtigt wurden Einflüsse vom tribologischen Verschleißprozess bis hin zur Messung und Klassifizierung.

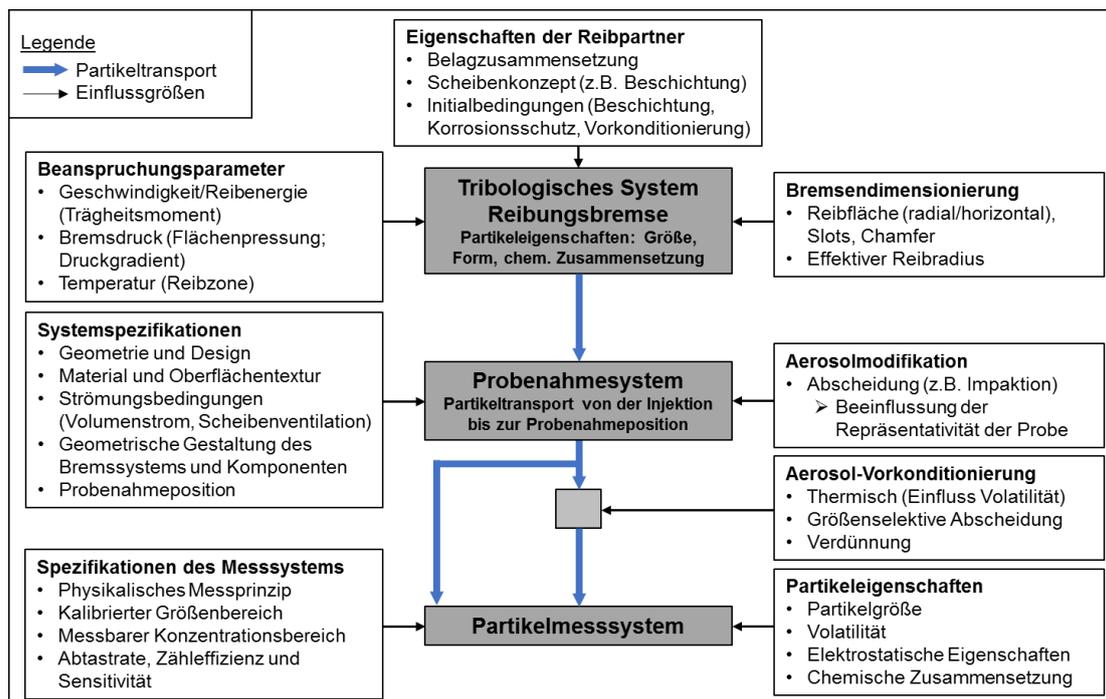


Abbildung 8-1: Gesamtübersicht analysierter Parameter vom tribol. Verschleißprozess bis zur Messung [BRA18]

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit bestand damit in einer ganzheitlichen Bewertung der zur Durchführung regulatorischer Messungen (Homologation) erforderlichen Mess- und Prüftechnik. Im ersten Teil der Arbeit erfolgte dazu die Vorstellung einer Methodik zur Analyse der Grenzschichtdynamik einer Bremscheibe, welche zur Untersuchung von Partikelinjektion und Partikelabscheidung auf das Modell eines Probenahmesystems überführt wurde. Damit ist es gelungen, die komplexen Vorgänge innerhalb geschlossener Konstant-Probenahmesysteme

abzubilden und Einflussgrößen (z. B. Partikelgröße, Rotationsgeschwindigkeit oder Evakuierungsrichtung) zu bewerten. Die **Hypothese 1.1** kann damit in eine gültige These überführt werden. Die vorgestellte Methodik ist universell, d. h. auf unterschiedlichste Geometrien übertragbar und erlaubt die Bewertung geometrischer Designs in Bezug auf die Transporteffizienz in einem frühen Entwicklungsstadium. Durch eine realitätsnahe Injektion können z. B. Untersuchungen zur Abscheideeffizienz bei Feinstaubfiltern, montiert um die Peripherie der Bremse, durchgeführt werden. Aus den Untersuchungen konnte den Initialbedingungen, welche durch die Partikelgröße und Partikelgeschwindigkeit repräsentiert werden, sowie den aus Evakuierungsvolumenstrom und Scheibenventilation resultierenden Strömungsbedingungen eine signifikante Beeinflussung von Transporteffizienz und Uniformität zugewiesen werden. Eine Reduktion des Evakuierungsvolumenstromes hat im Falle des horizontal angeordneten Abluftkanals eine Erhöhung des Uniformitätsgrades bei gleichzeitiger Reduktion der Transporteffizienz zur Folge. Aus Untersuchungen zum Einfluss der Evakuierungsrichtung konnten größenspezifische Partikelverluste ($> 2,5 \mu\text{m}$) bei Evakuierung entgegen Fahrtrichtung bestimmt werden, was insbesondere bei der Bestimmung der Partikelmasse von besonderer Relevanz ist. Folglich ist die geometrische Gestaltung eines Probenahmesystems und die Definition der Strömungsbedingungen insgesamt eine Kompromissentscheidung unter Berücksichtigung zahlreicher Parameter. Damit ist die **Hypothese 1.2** zurückzuweisen.

Die experimentelle Validierung erfolgte durch Analyse von Partikelverteilungs- und Partikelabscheideprofilen anhand differenzierter Fahrscenarien. Es konnte demonstriert werden, dass über den Verlauf eines Zyklus dynamische Änderungen der Partikelinjektionsbedingungen und Partikelverteilung vorliegen, wodurch die Repräsentativität der entnommenen Teilprobe als variable Größe zu verstehen ist. Die **Hypothese 1.3** kann demnach nicht bestätigt werden. Durch vergleichende Untersuchungen zur Partikelverteilung anhand eines eigens definierten Uniformitätsindex konnte eine Vorzugsposition identifiziert werden, wodurch die Skalierung des punktuell analysierten Teilvolumens auf das gesamte evakuierte Volumen mit einem akzeptablen Vertrauensniveau ermöglicht wird. Die Probenahme erfolgt vorteilhafterweise im Kanalzentrum. Zur Bestimmung massebezogener PM₁₀/PM_{2.5}-Emissionfaktoren mittels Kaskadenimpaktor empfiehlt sich eine Teilstromentnahme über eine Sonde, wodurch Einflüsse inhomogener Verteilungsprofile reduziert werden. Der Oberflächenrauigkeit (Umhausung und Abluftkanal) konnte ein untergeordneter Einfluss auf die Abscheidewahrscheinlichkeit zugewiesen werden. Diese wird primär durch die vorliegenden Strömungsbedingungen bestimmt. Die Bestimmung sektionaler Partikelverluste erfolgte anhand einer filterbasierten Methodik für das gesamte emittierte Partikelspektrum, wobei die Bewertung auf einer Partikelmassenbilanz basiert. Es konnte auch gezeigt werden, dass ein signifikanter Anteil der Verlustmasse am Belag (z. B. am Chamfer), der Scheibe oder auch auf dem Bremssattel abgeschieden wird. Der Vergleich unterschiedlicher physikalischer Partikelmessprinzipien erfolgte anhand variierender Konfigurationen. Insgesamt ist der Kondensationspartikelzähler (CPC) zur Bestimmung

anzahlbasierter Emissionsfaktoren als Referenzsystem für stationäre und mobile Anwendungen zu deklarieren. Über den Verlauf von Testzyklen nach WLTP-Datenbasis konnte temporär die Bildung von Partikeln im Nukleationsmodus ($< 0,1 \mu\text{m}$) beobachtet werden, wobei die Differenz zwischen 10 nm- und 23 nm-CPC ohne thermische Vorkonditionierung (volatile particle remover) marginal ausfällt ($< 3 \%$). Unter Analyse unterschiedlicher Belag-Scheibenkonzepte konnte ein Verdünnungsfaktor ≥ 10 (maximale Anzahlkonzentration im CPC-Einlass: $\leq 1\text{E}+04 \text{ \#/cm}^3$) zur Gewährleistung einer robusten Messprozedur unter Auflösung niedrigster (z. B. hartmetallbeschichteter Scheibe unter Simulation innerstädtischer Verzögerungen) und höchster Konzentrationen zur Bestimmung von Feststoff-PN bestimmt werden. Elektrisch basierte Messsysteme sind durch eine Konzentrationsabhängigkeit in Form eines messsystembedingten Grundrauschens ($< 5\text{E}+02 \text{ \#/cm}^3$) bei einem insgesamt hohen Grad an Linearität charakterisiert, wodurch die **Hypothese 2.1** in eine gültige These überführt werden kann. Am Beispiel von CPC mit unterschiedlich kalibriertem Cut-off konnte unter thermischer Konditionierung der Reibungsbremse der Bildungsprozess von Partikeln $< 0,1 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden (Bestätigung der **Hypothese 2.2**). Es zeigte sich jedoch, dass der Bildungsprozess in Abhängigkeit von der Belagzusammensetzung die Linearität zwischen Partikelanzahl und Partikelmasse signifikant beeinflusst, weshalb die **Hypothese 2.3** zu bestätigen ist. Aus der Bestimmung oberflächennaher Spitzentemperaturen mittels Thermografiekamera konnte dieser Prozess für unterschiedliche Belagzusammensetzungen auf einen kritischen Schwellenbereich von 180–250 °C (Schwelle 1) eingegrenzt werden, welcher besonders von den Belagbestandteilen, aber auch von der thermischen Vorkonditionierung beeinflusst wird. So konnte gezeigt werden, dass ein hoher Eisenanteil im Belag zu hohen lokalen Spitzentemperaturen führen kann, wodurch wiederum ein erhöhtes Partikelbildungspotenzial resultiert. Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass die Bildung besonders auf die Verdampfung organischer Bestandteile (z. B. Phenolharze in Bindemittel) zurückzuführen ist. Es konnte auch nachgewiesen werden, dass der Bildungsprozess der ultrafeinen Fraktion infolge inhomogener Temperaturverteilung über den Reibring nur bedingt mittels konventioneller Messtechnik erklärt werden kann, was bei der Bewertung anzahlbezogener Emissionsfaktoren im Falle regulatorischer Messungen zu beachten ist. Durch die Verwendung von Feststoff-PN-Messtechnik mit einer auf 350 °C beheizten Evaporation tube konnte eine Abscheidung der Partikel des ultrafeinen Spektrums bestätigt werden, was die Reproduzierbarkeit der Messung erhöht und die Robustheit unter Verwendung bestehender PN-Messtechnik (Verbrennungsmotorik) bestätigt. Zur Bestimmung massenbezogener Emissionsfaktoren ist die gravimetrische Messmethode als Referenz zu definieren. Die photoakustische Spektroskopie bietet unter niedriger thermischer Beanspruchung einen hohen Grad an Linearität und den Vorteil eines zeitaufgelösten Signals, erfordert jedoch die Berücksichtigung eines Korrekturfaktors, wodurch die **Hypothese 2.4** zurückzuweisen ist. Anhand eines Mittelklassefahrzeuges konnte bereits für eine Vorderachsbremse ein massebezogener PM_{2.5}-Emissionsfaktor bestimmt werden, welcher etwa

32 % (ECE-kh) des derzeit gültigen Euro 6d-TEMP-Emissionsfaktors für verbrennungsmotorische Abgasemissionen (4,5 mg/km je Fahrzeug) entspricht. Die anzahlbezogenen Emissionsfaktoren für eine Bremse liegen hingegen um Faktor > 250 unterhalb des Referenzwertes (Euro 6d-TEMP). Die massebezogenen PM10-Emissionsfaktoren sind im Falle des ECE-kh um Faktor 2,8 erhöht, was die hohe Massenrelevanz dieser Fraktion bestätigt.

Dem tribologischen Einlaufvorgang und dem Prozess der Vorkonditionierung (thermisch/mechanisch) konnte eine hohe Signifikanz in Bezug auf das Partikelemissionsverhalten zugewiesen werden. Die Gewährleistung eines reproduzierbaren und repräsentativen Emissionsniveaus ist insgesamt von den Materialeigenschaften der Reibpartner abhängig und bezüglich der umzusetzenden Reibenergie differenziert zu bewerten. Aus dem Vergleich unterschiedlicher Belaggeometrien sind Tendenzen zur Emissionsreduktion abzuleiten. Emissionsminderungspotenziale zwischen 40 und > 90 % können unter Verwendung hartmetallbeschichteter Scheibenkonzepte erreicht werden. Vergleichbare Minderungspotenziale konnten auch unter Simulation regenerativer Bremssysteme in Form variierender Generator Kennlinien am SMP nachgewiesen werden. Damit kann die **Hypothese 2.5** in eine gültige These überführt werden. Den Abschluss der Arbeit bildeten Messungen unter variierenden Prüfumgebungen anhand eines entwickelten Probenahmesystems für mobile Anwendungen (RDE). Die Durchführung von Messungen anhand eines RDE-konformen Testzyklus (Verordnung (EU) 2018/1832) ermöglichte die Bewertung von Einflüssen der fahrenden Person, der Streckenführung oder der Verkehrssituation. Insbesondere in den Sektionen Land und Autobahn konnte ein hoher Grad an Variabilität bezüglich fahrer- und verkehrsbedingten Einflüssen und einer damit korrelierenden Streuung von Reibenergie und Emissionsfaktor nachgewiesen werden. In der Sektion Stadt dominieren hingegen die Einflüsse des Streckenprofils und der Verkehrssituation, wohingegen die Einflüsse des Fahrers als klein zu bewerten sind (Zurückweisung der **Hypothese 3.1**). Prüfumgebungsübergreifende Messungen stellten die Eignung des Gesamtfahrzeugprüfstandes (RPS) unter Implementierung einer realen Fahrwiderstandskurve für die Durchführung von Gesamtfahrzeugtests heraus. Neben der Umsetzung RDE-konformer Testzyklen unter Vorgabe eines Geschwindigkeitsbereiches sind Untersuchungen zum Einfluss variierender Parameter gezielt möglich. Zudem werden Störeinflüsse wie unvorhersehbare Verkehrssituationen aus der Prüfung eliminiert. Die Freiheitsgrade des Fahrers werden zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit reduziert. Es konnte die Eignung des Konstantvolumen-Probenahmesystems zur Durchführung reproduzierbarer und repräsentativer Messungen an variierenden Prüfumgebungen bestätigt werden, weshalb die **Hypothese 3.2** zurückgewiesen werden kann.

8.2 Ableitung einer Methodik zur Bestimmung von PN/PM-Emissionsfaktoren

Aufbauend auf den in dieser Arbeit generierten Erkenntnissen ist in Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2 als Erweiterung zur GRPE-53-03 ein Vorschlag eines Ablaufschemas zur Bestimmung von Emissionsfaktoren am Schwungmassen-Bremsenprüfstand dargestellt.

Tabelle 8-1: Vorschlag zur Durchführung eines SMP-Emissionstests auf Grundlage von GRPE-53-03 – Teil 1 [GRP07]

Lfd.-Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	
Prüfvorbereitung	1	Verifizierung der Last und Trägheit	Vorgabe der Einzelradlast/Trägheit der zu prüfenden Bremse, welche z. B. durch Fahrversuche oder anhand der Bezugsmasse des Fahrzeuges bestimmt wird. Die Trägheit (feste und/oder einstellbare Lastkurve) ist mittels rotierender Massescheiben und/oder durch elektrische Trägheitssimulation zu gewährleisten.
	2	Vorbereitung zur Partikelmessung	Konditionierung (Temperatur und Feuchtigkeit) und Wiegung der Filter sowie Funktionsüberprüfung der Partikelmesstechnik (Zähleinheit und vpr sowie Durchführung der Leckageprüfung) sind gemäß beschriebener Prozedur durchzuführen.
	3	Vortest	Justierung des je Probenahmesystem verifizierten Evakuierungsvolumenstromes (Maximale Transporteffizienz und Uniformität). Überprüfung der Parameterangaben (z. B. Trägheitssimulation, Geschwindigkeitsverläufe sowie Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgabe) und der Datenaufzeichnung mittels synchronisiertem Zeitstempel bzw. über ein Aufzeichnungsgerät anhand von 1x Vortest (Testzyklus).
	4	Einlaufprozedur	Die Konditionierung erfolgt vor Beginn der in Nr. 6 beschriebenen Prozedur zur Bestimmung des Hintergrundeinflusses anhand des in Nr. 7 angewandten Prüfzyklus unter identischen Prüfbedingungen (z. B. Volumenstrom, Zyklus-Initialtemperatur), wobei für den ersten Zyklus die Initial- und Umgebungstemperatur identisch sind. Mögliche Ansätze: a. Vorgabe einer Zyklenanzahl bzw. Fahrstrecke, oder b. Bewertung der anzahlbezogenen Emissionsfaktoren je Zyklus in Form einer Trend-/Regressionsanalyse (Bewertung anhand der Partikelanzahl (CPC)) bei einer Mindestfahrstrecke von 500 km, wobei der Abschluss durch Einstellung einer (mittleren) Steigung von $\leq 10\%$ für drei aufeinanderfolgende Zyklen gekennzeichnet ist. <ul style="list-style-type: none"> ➤ Erst eine Trendanalyse (b.) ermöglicht eine robuste Einlaufprozedur und ein reproduzierbares Emissionsniveau für jede Art von Belag-Scheibenkonzepten. ➤ Die Analyse erfolgt auf Basis von Emissionsfaktoren (Berechnung nach Nr. 11).
	5	Reinigung des CVS	Eine Reinigung des CVS von abgeschiedenen Partikeln infolge der Einlaufprozedur (Nr. 4) ist z. B. zur Reduktion des in Nr. 6 zu bestimmenden Hintergrundeinflusses zulässig. Die Reinigung kann z. B. mittels Druckluft erfolgen, wobei die in Nr. 7 vorgegebenen Zeit- und Temperaturvorgaben zu beachten sind.
	6	Hintergrundeinfluss, Teil 1	Das Partikelhintergrundniveau der Verdünnungsluft wird vor Beginn des Prüflaufs im Fahrzeugstillstand bestimmt. Zur Einhaltung der Vorgaben wird die Verwendung von HEPA-Filtern (EN 1822) empfohlen. 5 Minuten nach Abschluss der Stabilisierung (Temperatur und Volumenstrom) erfolgt eine Messung des Hintergrundes über 5 Minuten. Zur Bewertung ist ein zulässiger Anteil des Partikelhintergrundes von 10 % am anzahl-/massebezogenen Emissionsfaktor, höchstens jedoch eine mittlere Anzahlkonzentration von 15 #/cm ³ (je für Teil 1 (Nr. 6) und 2 (Nr. 8)) vorgegeben. <ul style="list-style-type: none"> ➤ Als Bewertungsgrundlage dient der/die aus Teil 1 und 2 berechnete mittlere Anteil bzw. mittlere Konzentration des Hintergrundes. Bei Überschreitung der Grenzwerte sind Optimierungsmaßnahmen (Dichtheit/Filterung) zu ergreifen. ➤ Eine Hintergrundkorrektur ist für eine Typgenehmigung unter Einhaltung der vorgegebenen Grenzen unzulässig. ➤ Eine Überschreitung des vordefinierten Anteils ist zulässig, sofern die Grenze der zulässigen mittleren Konzentration eingehalten wird. <p>Einzuhalten sind die in Nr. 7 beschriebenen Temperatur- und Zeitvorgaben. Eine Demontage der Reibpartner ist nach Abschluss des Einlaufvorganges unzulässig.</p>

Tabelle 8-2: Vorschlag zur Durchführung eines SMP-Emissionstests auf Grundlage von GRPE-53-03 – Teil 2 [GRP07]

Lfd.-Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	
Prüflauf	7	Durchführung des Hauptemissionstests Der Beginn des Prüflaufs, welcher die Durchführung von mindestens einem vollständig automatisiert ablaufendem Testzyklus beinhaltet, erfolgt unmittelbar nach Abschluss der Einlaufprozedur, d. h. spätestens 90 min nach Abschluss der in Nr. 4 beschriebenen Prozedur bzw. Unterschreitung einer initialen Zyklustemperatur von ≤ 40 °C. Die kontinuierliche Probenahme und zeitsynchrone Datenaufzeichnung beginnt vor der initialen Beschleunigung. Das Ende der Probenahme erfolgt 30 s nach Abschluss der letzten Verzögerung. Die Temperaturerfassung erfolgt mittels eingestemtem Thermoelement (mittlere Zyklustemperatur dient als Vergleichsnormal). Die Filterbeladung ist unter Vorgabe von unteren- (Mindestmasse von ≥ 20 μg je Filter) und oberen Grenzen (Staudruck ≤ 25 kPa) zu regulieren. Dabei erfolgt im Falle von Überschreitung des Staudruckes ein Filterwechsel, welcher in einem Zeitbereich zwischen 40–60 % der Zyklusgesamtdauer zu absolvieren ist. Bei Unterschreitung der Mindestmasse ist die Anzahl der Prüfzyklen anzupassen. Eine Unterbrechung des Prüflaufs oder der Datenaufzeichnung (z. B. Messgeräteausfall) ist unzulässig und erfordert eine Wiederholung. Die Datenerfassung erfolgt mit min. 10 Hz zur Bewertung der Gültigkeit und Kompatibilität des Prüflaufs. Vorgabe eines zulässigen Bereiches von Temperatur (20 ± 2 °C) und rel. Luftfeuchtigkeit (50 ± 5 %). Die Messung erfolgt mit kalibrierten und zertifizierten Messgeräten im Kanalzentrum (nach einer im Einlassbereich adaptierten Filterstufe) des Probenahmesystems in einem Abstand zwischen 80 und 150 cm vor der Rotationsachse der Bremse. Die Erfassung des Evakuierungsvolumenstromes erfolgt mittels dynamischer und für hohe Druckwerte zugelassener Messgeräte (z. B. Venturi-/Laminar-Durchflussmesser) im Kanal in einem Abstand von 10–20 cm nach der Probenahme-position ohne Querschnittsänderung sowie 20–30 cm vor dem Ventilator.	
	Prüfung / Auswertung	8	Hintergrundeinfluss, Teil 2 Messung entsprechend der in Nr. 6 beschriebenen Prozedur frühestens 5 Minuten nach Abschluss des Prüflaufs über eine Zeitdauer von 5 Minuten. Eine Abweichung von der in Nr. 6 bestimmten mittleren Konzentration ist zulässig, sofern der zulässige Anteil (≤ 10 %) und die zulässige Konzentration eingehalten werden.
		9	Überprüfung der Messung Überprüfung auf Gültigkeit und Kompatibilität (Umsetzung des Geschwindigkeits-Zeit-Profiles; Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgabe), der Betriebsbedingungen und Partikelmessung. Im Falle von Fehlern erfolgt eine Nachprüfung.
		10	Wiegung der Filter Aufbewahrung und Wiegung der Filter sind gemäß aufgeführter Prozedur durchzuführen.
	11	Kalkulation der Emissionsfaktoren Bestimmung des evakuierten Gesamtvolumens, des je Messsystem analysierten bzw. durchströmten Teilvolumens sowie des Volumenstromverhältnissfaktors unter Beachtung von Verlustfaktoren (PCRF). Daraus folgt die Bestimmung der Gesamtanzahl/Gesamtmasse der emittierten Partikel je Zyklus sowie die anzahl- und massebezogenen Emissionsfaktoren entsprechend der aufgeführten Prozedur.	

Die vorgestellte Prozedur dient als Grundlage für regulatorische Messungen (Homologation) und zielt auf die Aktivitäten der unter Koordination des Joint Research Centers (JRC) agierenden informellen Arbeitsgruppen PMP-Task Forces I/II ab, welche sich seit 2016 mit der Entwicklung eines einheitlichen Messverfahrens zur Bestimmung anzahl- und massebezogener

Emissionsfaktoren beschäftigen [MAT18, AGU19]. Bei der Entwicklung der Prozedur wurde besonderer Wert auf eine universelle Anwendbarkeit gelegt, d. h. für unterschiedliche Scheibenkonzepte (z. B. Grauguss-scheiben und alternative Reibmaterialien) sowie unter Simulation eines regenerativen Bremssystems. Die Durchführung erfolgt anhand eines Konstantvolumen-Probenahmesystems (CVS), welche die in Tabelle 4-2 beschriebenen vorteilhaften konstruktiven und geometrischen Merkmale aufweist. Wie in dieser Arbeit aufgezeigt, ist insbesondere eine repräsentative Probenahme massebezogener PM10-Emissionsfaktoren als Herausforderung anzusehen. Die große Vielfalt der am Markt verfügbaren Bremssystemkonfigurationen und die komplexen Geschwindigkeitsprofile im Bereich der Bremssysteme führen zu differenzierten Verteilungsprofilen und Transporteffizienzen. Die Herausforderung für die PMP-Task Force II liegt darin, die geometrischen Anforderungen an ein Probenahmesystem derart einzuschränken, dass in unterschiedlichen Laboren repräsentative Messungen durchgeführt werden können, jedoch Raum für innovative Weiterentwicklungen bleibt.

Anhand von Designanforderungen empfiehlt sich eine Verifizierung von Transporteffizienz und Partikelverteilungsprofil über den Querschnitt der Probenahme zur Bewertung der je Prüflabor bestimmten anzahl- und massebezogenen Emissionsfaktoren. Dadurch können Einflüsse infolge differenzierter konstruktiver und geometrischer Designs sowie Betriebsbedingungen bewertet und eingeordnet werden. Darüber hinaus empfiehlt sich für regulatorische Messungen im Sinne einer robusten Messprozedur die Beibehaltung eines konstanten und bezüglich Transporteffizienz, Uniformität und Partikelverweilzeit verifizierten Evakuierungsvolumenstromes. Änderungen, z. B. zur Optimierung der Kühlleistung, erfordern eine erneute Verifizierung. Die Bestimmung und Bewertung der Transporteffizienz erfolgt mittels simulativer und experimenteller Untersuchungen gemäß Abschnitt 3 und 4 vor dem eigentlichen Ablaufschema. Zur Gewährleistung einer repräsentativen Probenahme sind Transporteffizienzen $\geq 80\%$ für $2,5\ \mu\text{m}$ -Partikel sowie $\geq 30\%$ für $10\ \mu\text{m}$ -Partikel bei einem Uniformitätsindex von $\leq 10\%$ ($2,5\ \mu\text{m}$ -Partikel) bzw. $\leq 20\%$ ($10\ \mu\text{m}$ -Partikel) als Mindestanforderungen zu empfehlen. Die Bestimmung des Uniformitätsindex sollte durch parallele Messung massenbezogener PM10- und PM2.5-Emissionsfaktoren an den in Abbildung 4-14 dargestellten Positionen a/c sowie b/d über den Verlauf des anvisierten Testzyklus erfolgen. Sollten die vordefinierten Anforderungen nicht eingehalten werden, sind Optimierungsmaßnahmen (z. B. Anpassung des Evakuierungsvolumenstromes oder der Gehäuse- und Kanalgeometrie) erforderlich. Die Bildung von PM10/PM2.5-Verhältnissfaktoren dient als Vergleichsnorm zur Bewertung differenzierter konzeptioneller Ansätze von Probenahmesystemen und Betriebsbedingungen (z. B. Evakuierungsvolumenstrom oder Evakuierungsrichtung) sowie zur Identifizierung optimaler Parametereinstellungen und ist damit ein Bestandteil einer zielführenden Entwicklungsmethodik.

Unberücksichtigt bleibt innerhalb der Prozedur die Bestimmung des Masse- und Dickenverlustes je Reibpartner, da die Demontage der Komponenten über den Verlauf eines Emissionstests unzulässig ist (durch die Demontage der Reibpartner ist eine erneute Konditionierung

erforderlich). Von Interesse ist die Massendifferenz, wenn ein direkter Vergleich zwischen Massenverlust je Zykluskilometer mit den PM10- und PM2.5-Emissionsfaktoren, z. B. zum Vergleich unterschiedlicher Probenahmesysteme zur Bewertung der Transporteffizienz, erforderlich ist. Dazu ist die Ausgangsmasse der eingelaufenen Reibpartner nach Abschluss der Prozedur zu bestimmen. Nach der Montage der Prüfkomponenten erfolgt der Prüflauf über mindestens drei Testzyklen, wobei die Erfassung der Anzahlkonzentration zur Trendanalyse sinnvoll ist. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Verschleißmasse je Zyklus-km.

Zur Erfassung dynamischer Konzentrationsprofile ist eine möglichst geringe Partikelverweilzeit innerhalb des Probenahmesystems erforderlich. Die Bestimmung erfolgt z. B. durch die parallele und zeitsynchrone Messung der Anzahlkonzentration mittels identischer CPC mit einer Abtastrate von mindestens 10 Hz und identischer Geometrie und Länge der Ansaugleitung am Bremssattelauslass (Position 1) sowie an der Probenahmeposition im Kanal (Position 2). Aus der Gegenüberstellung der Konzentrationsverläufe dienen die Zeitdifferenz (Konzentrationsanstieg an Position 1 gegenüber Position 2) und Partikelverteilung innerhalb des Probenahmesystems (Bewertung des Konzentrationsgradienten) als Bewertungsgrößen.

Entgegen einer Standardisierung ist in dem vorgestellten Ablaufschema die Einlaufprozedur in Form einer Trendanalyse beschrieben, was den Nachteil einer differenzierten Anzahl an Testzyklen und Testdauer je Belag-Scheibenkonzept infolge des unterschiedlichen Verschleiß- und Emissionsverhaltens aufweist. Vorteilhaft ist der statistische Beweis über den Abschluss des tribologischen Einlaufvorganges mit einem reproduzierbaren und je nach Testzyklus auch repräsentativen Emissionsniveau. Dabei ist für die Gewährleistung eines reproduzierbaren Emissionsniveaus unter Simulation eines regenerativen Bremssystems ein deutlich erhöhtes Zeitbudget (Zyklusanzahl) erforderlich. Ein unter zeitlichen Gesichtspunkten akzeptabler Ansatz ist die Durchführung einer zweigeteilten Einlaufprozedur, wobei im ersten Teil die Simulation eines regenerativen Bremssystems entfällt. Nach oben beschriebener Prozedur ist dabei für beide Teile ein reproduzierbares Emissionsniveau bei einer (mittleren) Steigung $\leq 10\%$ über eine Mindestanzahl von drei Zyklen nachzuweisen.

Im Sinne vergleichbarer Ausgangsbedingungen und als Kompromiss zur Reduktion von Wartezeiten ist eine Initialtemperatur von $\leq 40\text{ °C}$ vordefiniert. Eine untere Grenze bleibt im Sinne eines universellen Ansatzes offen, da es unter Simulation eines regenerativen Bremssystems (z. B. BEV) gemäß Abschnitt 6.5 zu deutlich geringeren Zyklustemperaturen kommen kann.

Zur Auflösung niedrigster Konzentrationen, welche typisch für Sektionen geringer Fahrgeschwindigkeiten (innerstädtisch) sind, ist die Vorgabe einer zulässigen Konzentrationschwelle des Partikelhintergrundniveaus ein essentieller Bestandteil der beschriebenen Prozedur. Durch die Erfassung des Hintergrundeinflusses vor und nach dem Prüflauf können Undichtigkeiten sowie eine ineffiziente Filterung der Zuluft identifiziert werden. Die Bestimmung des anzahl (CPC)- und massebezogenen Hintergrundes erfolgt mithilfe der identischen Messtechnik, welche in Nr. 7 zur Bestimmung von Emissionsfaktoren zur Anwendung kommt. Eine

kontinuierliche Überwachung der Qualität der Zuluft (Anzahl/Masse) ist während des Prüflaufs durch eine Probenahme unmittelbar nach dem Zuluftfilter denkbar. Da sich der absolute Anteil des Partikelhintergrundes für differenzierte Volumenströme als Folge differenzierter Verdünnungsraten unterscheidet, erfolgt die Bewertung anhand eines zulässigen Anteils am Emissionsfaktor bei gleichzeitiger Vorgabe einer zulässigen mittleren Anzahlkonzentration.

Innerhalb des durch die PMP Task-Force I erarbeiteten „PMP Brake Protocol“ zur Bestimmung der Reibringtemperatur für innenbelüftete Scheiben und Vollscheiben ist die Verwendung eingestemmter Thermoelemente zur Bestimmung zyklenspezifischer Temperaturwerte (z. B. Zyklus-Initialtemperatur) vorgeschrieben, welche 10 mm außerhalb des mittleren Reibringes (Topfseite) und 0,5 mm unterhalb der Scheibenoberfläche positioniert werden. Wenngleich im Rahmen dieser Arbeit teils deutliche Unterschiede zwischen unterschiedlichen Technologien zur Temperaturmessung, insbesondere bezüglich lokaler Spitzentemperaturen, nachgewiesen werden konnten, ist die Bestimmung einer mittleren Zyklus-Temperatur als Vergleichsnorm empfehlenswert. Auch ist die Vorgabe eines zulässigen Temperaturbereiches der mittleren Zyklus-Temperatur für identische Scheibenkonzepte, jedoch nicht für die universelle Anwendung denkbar. Die mittels eingestemmtem Thermoelement erfassten Temperaturen fallen für unterschiedliche Scheibenwerkstoffe (z. B. hartmetallbeschichtete Scheiben oder Scheiben aus kohlenstofffaserverstärktem Siliciumcarbid (C/SiC)) infolge differenzierter Materialeigenschaften (z. B. Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) unterschiedlich aus. Als weitere Herausforderung ist zudem die Vorgabe zulässiger Peak-Temperaturen anzusehen, da besonders durch inhomogene Momentenübertragung hohe lokale Energiedichten vorliegen und die daraus resultierenden lokalen Spitzentemperaturen nicht repräsentativ mittels eingestemmtem Thermoelement erfasst werden können. Zudem wäre unter Vorgabe zulässiger Temperaturbereiche ein Ansatz zur Variation von Betriebsbedingungen erforderlich, um die Temperaturvorgaben einzuhalten. Eine Anpassung wäre unter Variation des Evakuierungsvolumenstromes und der damit verbundenen Kühlleistung denkbar, was jedoch auf Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit generierten Erkenntnisse über die Beeinflussung der Verteilungsprofile und Transporteffizienz zu vermeiden ist. Zudem ist der Einfluss eines erhöhten Evakuierungsvolumenstromes auf die Temperaturverteilung bei hohen Energiedichten als marginal zu bewerten. Eine Variation des Evakuierungsvolumenstromes ist zur Einhaltung zulässiger Peak-Temperaturen und im Sinne einer repräsentativen und vergleichbaren Messung damit hinfällig. Vielmehr sollten Emissionstests auf Grundlage der je Fahrzeug spezifischen Radlast unter Verwendung eines Konstantvolumen-Probenahmesystems mit identischen Betriebsbedingungen und eines repräsentativen Testzyklus (WLTP-Datenbasis) unter Vorgabe eines Geschwindigkeits-Zeit-Verlaufes (Verzögerungssteuerung) durchgeführt werden. Wenn auch die Partikelinjektions- und Verteilungsprofile für unterschiedliche Bremssysteme differenziert ausfallen, so wird die Repräsentativität der Messung, besonders für einen Fahrzeugvergleich, erhöht. Zudem ist die Integration einer vpr zur Eliminierung von Partikeln des ultrafeinen Spektrums

sinnvoll, sofern es zur temporären Überschreitung der kritischen Schwellentemperatur kommt. Weiterhin empfiehlt sich eine parallele Messung mit z. B. 10 nm-CPC ohne vorgeschaltete vpr zur Bewertung des volatilen Spektrums.

Wie oben beschrieben setzt eine robuste Messprozedur möglichst konstante Betriebsbedingungen voraus, was wiederum einen hohen Grad an Variabilität in Bezug auf die einzusetzende Messtechnik (z. B. hinsichtlich Verdünnungsrate und dem daraus resultierenden Konzentrationsbereich bzw. Sensitivität) erfordert. Vor diesem Hintergrund ist auf Messtechnik gemäß UN/ECE-R83 (Rev.5) bzw. UN/ECE-R49 (Rev.6) zur Bestimmung anzahlbezogener PM_{2.5}-Emissionsfaktoren mittels 23 nm-Vollstrom-CPC (cut-off Euro 6) bzw. 10 nm-Vollstrom-CPC (cut-off post Euro 6) gemäß CPC-Kalibriervorschrift ISO 27891 zurückzugreifen. Weitere physikalische Messprinzipien stehen vor dem Hintergrund einer robusten und reproduzierbaren Messung bei stationärer und mobiler Anwendung derzeit nicht zur Verfügung. Eine Fixierung des zu kalibrierenden Cut-offs bleibt offen, sollte jedoch für regulatorische Messungen grundsätzlich der Festlegung gemäß post Euro 6 (Verbrennungsmotorik) folgen. Die Bestimmung eines PCRf (particle concentration reduction factor) zur Verlustkompensation innerhalb des Messsystems ist infolge der deutlich von verbrennungsmotorischen Emissionen abweichenden Größenverteilung für zukünftige Arbeiten denkbar. Gemäß Kalibrierungsvorschrift erfolgt die Bestimmung des PCRf auf Basis von monodispersen Aerosol mit Partikeldurchmessern von z. B. 30, 50 und 100 nm aus z. B. Emery oil oder Verbrennungspartikeln (MiniCast) unter variierenden Konzentrationen [SEI18]. Dieses Aerosol ist repräsentativ für die mittleren Verluste des beprobten polydispersen Aerosols. Damit geht auf der einen Seite eine Überschätzung der Partikelkonzentration infolge der Korrektur durch z. B. Diffusions- oder Koagulationsverluste einher, welche für die Feststoff-Bremsenemissionen unter WLTP-Datenbasis keine nennenswerte Rolle spielen. Auf der anderen Seite werden z. B. Impaktionsverluste (> 1 µm) infolge kleiner Durchmesser der Transportleitung und abrupten Richtungswechseln (vpr) nicht berücksichtigt. Damit sind neue Ansätze zur Korrektur von Partikelverlusten zu entwickeln. Ein möglicher Ansatz ist die Verlustkompensation für monodisperse Aerosole mit Partikeln eines Durchmessers von 0,1 sowie 1 und 2,5 µm, wobei besonderer Wert auf die Repräsentativität der Eigenschaften der Referenzpartikel (z. B. Dichte, Form) zu legen ist. Eine Verlustkompensation für Partikel > 2,5 µm ist infolge hoher Verluste bei der Bereitstellung und Messung im Referenz-CPC als Herausforderung anzusehen. Es ist jedoch zu beachten, dass für unterschiedliche Belagzusammensetzungen und Größenverteilungen eine differenzierte Verlustkompensation erforderlich ist, was den universellen Charakter einer PCRf-Bestimmung für den Anwendungsfall partikelförmiger Bremsenemissionen insgesamt in Frage stellt. Zur Bestimmung massebezogener Emissionsfaktoren ist die Verwendung von Filterhaltern mit vorgeschaltetem Zyklon oder Impaktor (scharfe Trennkurve) zur gröbenselektiven Fraktionierung nach der Einzelfiltermethode vorteilhaft, wobei eine Probenflussteilung entfällt. Die Verwendung der aus der Verbrennungsmotorik bekannten TX40-Filter mit einer Filtereffizienz von

99 % für 0,3 µm-Partikel (di-octylphthalate) bei einer Strömungsgeschwindigkeit von mindestens 35 cm/s ist unter Beachtung der Beladungsgrenzen praktikabel. Besondere Beachtung gilt der Probenahme, wobei isokinetische (–5 % bis +15 %) und isoaxiale Bedingungen in Verbindung mit einer korrekten Zyklon-Durchflussrate zur Einstellung des nominellen Trenndurchmessers (d_{50}) erforderlich sind. Zudem ist die gesamte Transportleitung möglichst glatt, ohne abrupte Querschnittsübergänge und Krümmungen sowie durch eine möglichst vertikale Ausrichtung zu gestalten. Besonderer Wert ist auch auf die Anforderungen zur Bestimmung des Massenzuwachses des Filters zu legen, welche zur Vergleichbarkeit mit verbrennungsmotorischen Emissionen grundsätzlich aus bestehender Gesetzgebung, jedoch ohne Notwendigkeit einer thermischen Konditionierung auf z. B. $47\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ vor der Filterdurchströmung, übertragen werden können. Weiterhin ist auf die Einhaltung der in GRPE-53-03 angegebenen maximal und minimal zulässigen Filtermassen zu achten. Insbesondere unter Simulation eines regenerativen Bremssystems oder bei der Untersuchung hartmetallbeschichteter Brems scheiben können die angegebenen Grenzen unterschritten werden. Eine Erhöhung der Anzahl an Testzyklen ist die Folge. Darüber hinaus wird eine Waage mit einer Genauigkeit (Standardabweichung) $\leq 2\text{ µg}$ und einer Auflösung $\leq 1\text{ µg}$ vorausgesetzt. Liegt eine Überschreitung der zulässigen Filtermasse vor, ist zwischen den Einzelsektionen des Prüfzyklus ein Filtertausch bzw. die Adaption eines zweiten Filterhalters vorzunehmen. Eine Variation der Durchflussrate ist besonders bei der Bestimmung massebezogener PM₁₀-Emissionsfaktoren problematisch, da es innerhalb der Ansaugleitung zu differenzierten Partikelverlusten infolge von Impaktion kommen kann. Im Sinne einer robusten Messprozedur empfiehlt sich daher die Durchführung mittels identischem Messaufbau und Betriebsbedingungen. Neben Filterhaltern mit vorgeschalteten Zyklonen ist die Verwendung eines dreistufigen Impaktors nach ISO 23210 und VDI 2066 (Teil 10) mit Isokinetiksteuerung zur Bestimmung massebezogener PM₁₀- und PM_{2.5}-Emissionsfaktoren denkbar. Vorteilhaft ist die parallele Messung durch Verwendung einer Probenahmesonde, was den experimentellen Aufbau reduziert. Als Herausforderung sind Bouncing- und Blow-off-Effekte zu nennen, wodurch die Verwendung gefetteter Prallplatten denkbar ist. Auch im Falle der Bestimmung massebezogener Emissionsfaktoren erscheint eine Verlustkompensation unter Beachtung der oben beschriebenen Anforderungen sinnvoll. Ein Impaktor kann beispielhaft direkt am Abluftkanal befestigt und mit Sonde und Krümmer verbunden werden, wodurch Partikelverluste an der Innenwand der Transportleitung reduziert werden. Bei der Bestimmung von PM₁₀ sind nach [MAR76] Partikelmasseverluste mit 5–10 % (Transportleitung + Impaktor) anzunehmen. Wenngleich mit dem in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen elektrischen Niederdruck-Kaskadenimpaktor ein teils hoher Grad an Linearität (CPC) nachgewiesen werden konnte, ist die Erfassung einer Größenverteilungsdichte stark von dem Messprinzip und den Partikeleigenschaften (Form der Partikel, effektive Dichte) abhängig. Die Bestimmung einer Größenverteilungsdichte als Bestandteil einer robusten Messprozedur ist fraglich, weshalb dieser Ansatz Forschungsarbeiten vorbehalten bleiben sollte.

9 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit generierten Erkenntnisse ermöglichen einen umfangreichen Überblick über die Wechselwirkungen und Vorgänge der Injektion bis zur Probenahme und Messung partikelförmiger Bremsenemissionen. Durch die kontinuierliche Reduktion des Anteils verbrennungsmotorischer Emissionen am Gesamtbudget des Fahrzeuges ist mit einer zukünftigen Regulierung antriebsferner Emissionen zu rechnen. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Methoden zur Bestimmung der Transporteffizienz und Bewertung geometrischer Designs mittels numerischer Strömungssimulation, der Verifizierung der Partikelabscheidung oder Abscheideprofile sowie die Bestimmung von Partikelverteilungsprofilen zur Bewertung der Uniformität stellen vielversprechende Ansätze dar, um eine zielführende Entwicklung eines Homologationstools zu garantieren.

Die Annahme eines stationären Strömungsfeldes ermöglicht die Betrachtung eines Zeitausschnittes. Da in der Realität hochgradig instationäre Strömungen vorliegen, ist für zukünftige Arbeiten der Übergang zu transienten Simulationen denkbar. Eine transiente Simulation ermöglicht die Analyse der zeitlichen Änderung der Rotationsgeschwindigkeit und die Bewertung von Einflüssen auf die Partikelinjektion und -verteilung.

Neben den analysierten Minderungspotenzialen durch alternative Scheibenkonzepte oder regeneratives Bremsen ist auch durch Konzepte mittels Feinstaubfiltern und Absaugvorrichtungen eine Reduktion des Feinstaubausstoßes zu erwarten. Erste Erkenntnisse stellen eine vielversprechende Basis dar. Als Herausforderung ist neben der derzeit begrenzten Aufnahmekapazität die für Absaugvorrichtungen benötigte Energie (CO_2) zu nennen.

Auf den Einfluss der Korrosion wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Der Einfluss ist jedoch als signifikant in Bezug auf die emittierte Partikelmasse und Partikelanzahl, besonders über die initiale Bremsung, zu deklarieren. Für eine gezielte Untersuchung ist die Ableitung einer realitätsnahen Korrosionsprozedur erforderlich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Erkenntnisse zum Bildungsprozess von Partikeln $< 0,1 \mu\text{m}$ vorgestellt. Neben der Identifizierung kritischer Schwellentemperaturen wurden z. B. auch Korrelationen mit den getesteten Reibbelägen aufgezeigt und Einflüsse durch eine thermische Vorkonditionierung bewertet. Offen blieben jedoch Erkenntnisse, welche Belagbestandteile (Bindemittel) in welchem Maße für die Bildung von Partikeln des ultrafeinen Spektrums verantwortlich sind. Da die Bildung nicht die Folge von Abrasivverschleiß, sondern auf die Verdampfung organischer Bestandteile zurückzuführen ist, bietet sich als ein denkbarer Ansatz die thermische Konditionierung (durch externe Erwärmung) von Einzelbestandteilen der Belagmatrix bis auf z. B. $400 \text{ }^\circ\text{C}$ bei zeitgleicher Messung der Partikelanzahlkonzentration und Größenverteilungsdichte an. Darauf aufbauend ist vom Gesetzgeber für den Fall regulatorischer Messungen festzulegen, ob eine Bestimmung von Emissionsfaktoren für das gesamte emittierte Partikelspektrum (total-PN) oder für Partikel des Festkörperspektrums (solid-

PN; $> 0,1 \mu\text{m}$) erfolgen soll. Daraus resultieren spezifische Anforderungen an die Messtechnik (z. B. die Festlegung des CPC Cut-offs und die Integration und Konfiguration einer vpr).

Ein weiteres Themengebiet stellt die Analyse von Bremsenpartikelabscheidungen auf der Peripherie des Fahrzeuges, besonders im Bereich der Felge und des Radhauses dar. Erkenntnisse darüber, welcher von der Bremse emittierte Anteil die Peripherie des Fahrzeuges verlässt und welche Abscheideorte von besonderer Relevanz sind, liegen in kaum nennenswerter Anzahl vor. Ein daran angeschlossenes Themengebiet stellt die Bestimmung der Anhaftkräfte emittierter Partikel auf Oberflächen eines Probenahmesystems oder auch auf Komponenten des Fahrzeuges (z. B. Felgen) dar. In eigenen Untersuchungen konnte eine Methodik erarbeitet werden, welche durch experimentelle Untersuchungen zukünftig zu validieren ist. Dabei dient die Rasterkraftmikroskopie (AFM) entsprechend der Wechselwirkung zwischen der Probenoberfläche und einer Messsonde (Cantilever) zur Bestimmung der Haftkraft. Dazu wird ein Cantilever mit ebener Oberfläche mit einer Klebeschicht benetzt und mit Bremsstaubpartikeln bestückt. Die Bestückung erfolgt mittels Mikromanipulator oder Mikroskop. Der bestückte Cantilever wird mit einer Probenoberfläche in Kontakt gebracht, in vertikaler Richtung abgezogen und die spezifische Haftkraft, welche abhängig von der in Kontakt stehenden Fläche ist, bestimmt.

Darüber hinaus existieren derzeit keine Erkenntnisse zum Partikelemissionsverhalten alternativer Bremsenkonzepte wie z. B. Trommelbremsen. Es ist bekannt, dass innerhalb des Gehäuses der Trommelbremse ein signifikanter Anteil der Verschleißmasse zurückbleibt. Die damit gekoppelten Minderungspotentiale und Einflussgrößen, insbesondere vor dem Hintergrund einer Feinstaubklassifizierung, sind bislang hingegen wenig erforscht.

In der Literatur existieren derzeit keine wirkungsvollen Ansätze, um die Partikelemissionen (z. B. die Partikelanzahl je Bremsung) unter Parametervorgabe vorherzusagen. Traditionelle deterministische Modellierungswerkzeuge sind nur bedingt in der Lage, die hochgradig stochastischen Phänomene zu schätzen. Vielsprechende Ansätze stellen Algorithmen des maschinellen Lernens dar, welche verzweigte Korrelationen zwischen den tribologischen Eigenschaften, der Belagzusammensetzung und den Umgebungs- und Prüfbedingungen berücksichtigen. Durch die Emissionsvorhersage können z. B. Regelstrategien entwickelt werden, um die Partikelfreisetzung, insbesondere im Falle des automatisierten oder autonomen Fahrens, zu reduzieren. Als Herausforderung sind Einflüsse wie z. B. die thermische Vorkonditionierung oder der tribologische Einlaufvorgang zu nennen, welche das Emissionsverhalten signifikant beeinflussen und ohne Kenntnisse der Historie nur schwer zu schätzen sind. Wie aus Abschnitt 6.2 bekannt können konventionelle Grauguss-scheiben ein abweichendes Emissionsverhalten gegenüber beschichteten Scheiben aufweisen, was innerhalb der Validierungsphase der künstlichen neuronalen Netze zu berücksichtigen ist. Für den Fall einer effektiven Regelvorgabe, welche die Voraussetzung für z. B. autonomes Fahren sein wird, ist besonderer Wert auf die Fahrsicherheit und die Aufrechterhaltung einer Rückfallebene zu legen.

Quellenverzeichnis

- [ABU03] Abu-Allaban, M.; Gillies, J. A.; Gertler, A. W.; Clayton, R.; Proffitt, D.: Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on-road vehicles; *Atmospheric Environment* 37, S.: 5283 – 5293; 2003
- [AGU17] Agudelo, C.; Deacon, P.; Marschall, M.; Markiewicz, R.; Hortet, A.; Tiwari, A.; Anderson, R.: Systematic assessment of brake emissions during dynamometer tests; *EuroBrake 2017 Proceedings*; EB2017-VDT-026; Dresden; 2017
- [AGU19] Agudelo, C.; Grigoratos, T.; Grochowicz, J.: PMP Interlaboratory Accuracy Study for WLTP-Brake (novel) Inertia Dynamometer Duty Cycle; *37th SAE Brake Colloquium*; Orlando; 2019
- [AKM98] N. N.: AK-Master Spec. VDA 285-1, Arbeitskreis Reibbelagindustrie, 2001.
- [ALE17] Alemani, M.: Particle emissions from car brakes: the influence of contact conditions on the pad-to-rotor interface; *Dissertation, Königlich-technische Hochschule Stockholm, Schweden*, 2017
- [ALE18] Alemani, M.; Wahlström, J.; Olofsson, U. On the influence of car brake system parameters on particulate matter emissions; *Wear* 396 - 397, S.: 67 - 74; 2018
- [ALE19] Alemani, M.: The LowBraSys project: a journey towards a low environmental impact brake system, *EuroBrake 2019 Proceedings*, EB2019-EBS-023; Dresden; 2019
- [AMA14] Amato, F. et al.: Urban air quality: the challenge of traffic non-exhaust emissions. *J Hazard Mater* 275, S.: 31 - 36; 2014
- [ANH04] Anh, H.-C.: Modellierung der Partikelagglomeration im Rahmen des Euler/Lagrange-Verfahrens und Anwendung zur Berechnung der Staubabscheidung im Zyklon; *Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; Dissertation*; 2004
- [AUG11] Augsburg, K. et al: Characterization of particulate emissions of vehicle wheel brakes; *56. Internationales wissenschaftliche Kolloquium*; Technische Universität Ilmenau; Deutschland; 2011
- [AUG12] Augsburg, K.; Sachse, H.; Krischok, S.; Horn, R.; Rieker, M.; Scheder, D.: Brake dust measurement; *Eurobrake 2012 Proceedings*, EB2012-TM-13, Dresden; 2012
- [BAR07] Barlow, T.-J.; Boulter, P.-G.; McCrae, I. S.; Sivell, P.; Harrison, R.-M.; Caruthers, D.; Stocker, J.: Non-exhaust particulate matter emissions from road traffic: summary report; *TRL report for DEFRA PPR231*; 2007
- [BAR13] Barthel, M. et al.: Erfassung der Zahl feiner und ultrafeiner Partikel aus Bürogeräten während der Druckphase zur Entwicklung eines Prüfverfahrens für das Umweltzeichen Blauer Engel für Bürogeräte mit Druckfunktion; *Bundesanstalt*

- für Materialforschung und -prüfung (BAM); Reihe: 074/2013; Dessau-Roßlau; 2013
- [BER08] Bergmann, M.: Entwicklung und Anwendung neuartiger Messverfahren zur Charakterisierung partikelförmiger Emissionen moderner Kraftfahrzeuge; Dissertation; Bergische Universität Wuppertal; 2008
- [BER17] Bernardt, T.: Methodik zur Konzeption und Auslegung von Radbremsen für PKW mit elektrischem Antriebsstrang; Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2017
- [BLE01] Bleyl, M.-R.: Experimentelle Bestimmung der Depositionsgeschwindigkeit luftgetragener Partikel mit Hilfe der EDDY-Kovarianzmethode über einem Fichtenaltbestand im Solling; Dissertation; Georg-August-Universität zu Göttingen, 2001
- [BOD12] Bode, K.-H.: Wärme und wärmeinduzierte Effekte in Reibmaterialien, Dissertation; Technische Universität Braunschweig; 2012
- [BOU06] Boulter, P.-G.: A review of emission factors and models for road vehicle non-exhaust particulate matter; TRL report PPR065; Wokingham, 2006
- [BOW86] Bowden, F.-P.; Tabor, D.: The friction and lubrication of solids; Oxford University Press; Oxford; 1986
- [BRE04] Breuer, B.; Bill, K.: Bremsenhandbuch - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik; 5. Aufl.; Springer-Vieweg-Verlag, Wiesbaden; 2004
- [BRU98] Bruns, R.; Steffen, T.: Hotspotbildung bei Pkw-Bremsscheiben; ATZ Automobiltechnische Zeitschrift - Nr.: 1998-06, 1998
- [BUK09] Bukowiecki, N. et al.: PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Straßenverkehrs (APART); Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK – Bundesanstalt für Strassen; 2009
- [CHA04] Chan, D.; Stachowiak, G. W.: Review of automotive brake friction materials; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 218, S.: 953 - 966; 2004
- [CHA18] Chasapidis, L.; Grigoratos, T.; Zygogianni, A.; Tsakis, A.; Konstandopoulos, A. Study of brake wear particle emissions of a minivan on a chassis dynamometer; Emission Control Science and Technology 4, S.: 271 - 278; 2018
- [DEG07] Degenstein, T.: Kraftmessung in Scheibenbremsen; Dissertation; Technische Universität Darmstadt; 2007
- [DEN13] Denier v. d. G., H.; Gerlofs-Nijland, M.; et al.: The policy relevance of wear emissions from road transport, now and in the future - an international workshop report and consensus statement; Journal of the Air and Waste Management Association 63, S.: 136 – 149; 2013

- [DEN18] Denier van der Gon, H.; Hulskotte, J.; Jozwicka, M.; Kranenburg, R.; Kuenen, J.; Visschedijk, A.: Chapter 5 - European Emission Inventories and Projections for Road Transport Non-Exhaust Emissions: Analysis of Consistency and Gaps in Emission Inventories From EU Member States, In: Non-Exhaust Emissions: An Urban Air Quality Problem for Public Health; Impact and Mitigation Measures; Academic Press, S.: 101 - 121; 2018
- [DES09] Desplanques, Y.; Degallaix, G.: Genesis of the Third-Body at the Pad-Disc-Interface: Case Study of Sintered Metal Matrix Composite Lining Material; 27th SAE Brake Colloquium Proceedings; SAE 2009-01-3053; Tampa; 2009
- [DIT14] Dittler, A.: Staubfiltration mit Tiefenfiltern, Praktikum Grundlagen der Verfahrenstechnik; Karlsruher Institut für Technologie; 2014
- [DOC06] Dockery, D.-W.; Pope, C.-A.: Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect; Journal of the Air & Waste Management Association 56; S.: 709 – 742; 2006
- [ERI00] Eriksson, M.: Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Related to Squeal; Dissertation; University of Uppsala; 2000
- [ERI01] Eriksson, M.; Lord, J.; Jacobson, S.: Wear and contact conditions of brake pads: dynamical in situ studies of pad on glass; Wear 249, S. 272 - 278; 2001
- [FAR19a] Farwick zum Hagen, F.; et.al.: On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions; Atmospheric Environment 217; 2019
- [FAR19b] Farwick zum Hagen, F.; et.al.: Study of Brake Wear Particle Emissions: Impact of Braking and Cruising Conditions; Environmental Science & Technology, S.: 5143 - 4150; 2019
- [FED18] Federici, M.; Gialanella, S.; Leonardi, M.; Perricone, G.; Straffelini, G.: A preliminary investigation on the use of the pin-on-disc test to simulate offbrake friction and wear characteristics of friction materials; Wear 410–411, S.: 202–209; 2018
- [FRI77] Friedlander, S.-K.: Smoke, dust and haze fundamentals of aerosol behavior, John Wiley and Sons; New York; 1977
- [FUE12] Füllgrube, F.: Neue Konzepte für Leichtbau-Bremsscheiben auf Basis metallischer Werkstoffe; Dissertation; Technische Universität Darmstadt; 2012
- [FUL11] Fulle, A.: Bewertung der Partikelemissionen der Bremse hinsichtlich Größe und Material; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2011
- [GAH99] Zum Gahr, K.-H.; Voelker, K.: Friction and wear of SiC fiber-reinforced borosilicate glass mated to steel; Wear 225-229, S. 885 - 895, Elsevier Science B.V.; 1999
- [GAR00] Garg, B.-D. et al.: Brake Wear Particulate Matter Emissions; Environmental Science & Technology 34 (10), S.: 4463 - 4469; 2000

- [GAS09] Gasser, M. et al.: Toxic effects of brake wear particles on epithelial lung cells in vitro; Part Fibre Toxicol 6 (30); 2009
- [GER19] Gerlofs-Nijland, M. et al.: Inhalation toxicity profiles of particulate matter: a comparison between brake wear with other sources of emission; Inhalation toxicology New York 31, S.: 89 - 98; 2019
- [GON19] van der Gon, H.-D.: Non-exhaust contribution to the environment; EuroBrake 2019; Dresden; 2019
- [GRA14] Gramstat, S.: Methoden der in-situ Visualisierung der Reibzonendynamik trockenlaufender Reibpaarungen unter Ergänzung physikalischer und chemischer Charakterisierungen der Reibpartner; Dissertation; Technische Universität Ilmenau; 2014
- [GRA17] Gramstat, S.; Cserhati, A.; Lugovyy, D.; Schröder, M.: Investigations of brake particle emissions - Testing method, vehicle peculiarities and friction material influence. EuroBrake 2017 Proceedings; EB2017-VDT-016; Dresden; 2017
- [GRI15] Grigoratos, T.; Martini, G.: Brake wear particle emissions: a review; Environmental Science and Pollution Research 22, S. 2491 - 2504; 2015
- [GRP07] N., N.: Proposal for draft supplement 7 to the 05 series of amendments to regulation No. 83 - Emissions from M1 and N1 category vehicles; Informal document No. GRPE-53-03; 53rd GRPE 2007
- [HAG15] Hagino, H.; Oyama, M.; Sasaki, S.: Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating; Wear 334 - 335, S.: 44 - 48; 2015
- [HAG16] Hagino, H.; Oyama, M.; Sasaki, S.: Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles. Atmospheric Environment 131, S. 269 - 278; 2016
- [HAK18] Haken, K.-L.: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik; 2. Aufl.; Hanser-Verlag; München; 2018
- [HAR12] Harrison R.-M.; Jones, A.-M.; Gietl, J.; Yin, J.: Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to non-exhaust traffic particles derived from atmospheric measurements; Environmental Science & Technology 46, S.: 6523 - 6529; 2012
- [HAR14] Hartmüller, J.; Ripperger, S.: Die Haftung von Partikeln an Bauteiloberflächen - Teil 1: Theoretische Abschätzung von Haftkräften aufgrund der van der Waals-Kraft; F & S Filtrieren und Separieren; Jahrgang 28 Nr. 4, S. 212 - 216; 2014
- [HAS06] Haselden, A.; Christoforou, C.; Schlautman, M.: Characterization of Airborne Brake Wear Debris; Final report submitted to the Association of Bay Area Governments; 2006

- [HEI12] Heimann, S.: Methodische Ansätze zur Untersuchung des Restbremsmomentes von Scheibenbremsen; Dissertation; Technische Universität Ilmenau; 2012
- [HER15] Herwig, H.: Strömungsmechanik: Physik - mathematische Modelle - thermodynamische Aspekte. 3. Aufl.; Springer-Vieweg-Verlag; Berlin Heidelberg; 2015
- [HIE15] Hiesmayr, J. et al.: Endbericht zum Projekt: Modellentwicklung zur Generierung von Emissionsfaktoren für motorisierte Zweiräder; FE 84.0521/2015; Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH; Technische Universität Graz; 2015
- [HLU07] N. N.: Feinstaub (PM10). Eigenschaften – Quellen – gesundheitliche Bewertung – Immissionen; Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie; Wiesbaden; 2007
- [IIJ07] Iijima, A. et al.: Particle size and composition distribution analysis of automotive brake abrasion dusts for the evaluation of antimony sources of airborne particulate matter; Atmospheric Environment 41, S.: 4908 - 4919, 2007
- [IIJ08] Iijima, A.; Sato, K.; Yano, K.; Kato, M.; Kozawa, K.; Furuta, N.: Emission factor for antimony in brake abrasion dust as one of the major atmospheric antimony sources; Environmental Science & Technology 42, S.: 2937 - 2942; 2008
- [JOH99] John, A. C.; Kuhlbusch, T.A.J.; Fissan, H.; Bröker, G.; Geueke, K.-J.: Entwicklung eines PM 10 / PM 2.5 - Kaskadenimpaktors zur Messung der Emissionen von Feinstäuben, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 59; S.: 449 – 454; 1999
- [KEN02] Kennedy, K.; Gadd, J.; Moncrieff, I.: Emission factors for contaminants released by motor vehicles in New Zealand; Prepared for the New Zealand Ministry of Transport and Infrastructure Auckland; 2002
- [KLE06] Kleinlein, C.: Beschreibung von Reibpaarungen in trocken laufenden Kupplungen und Bremsen durch ihre globalen und lokalen Reibungs- und Verschleißigenschaften; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 388; VDI-Verlag; Düsseldorf; 2006
- [KOL19] Kolbeck, K. et al.: Brake Particle Formation and Behaviour in Frictional Contact; Conference-presentation; EuroBrake 2019 Proceedings; EB2019-EBS-022, Dresden; 2019
- [KON10] Konieczny, R.; Brück, R.; Zaldua-Moreno, N.: Die Herausforderung der zukünftigen Partikelanzahlgrenzwerte - Partikelentstehung und Partikelreduktion; 6. Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen; Ludwigsburg; 2010
- [KUK11] Kukutschová, J. et al.: On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes; Environmental Pollution 159 (4), S.: 998 - 1006; 2011

- [KUM13] Kumar, P.; Pirjola, L.; Ketzel, M.; Harrison, R. M.: Nanoparticle emissions from 11 non-vehicle exhaust sources - a review; *Atmospheric Environment* 67, S.: 252 – 277; 2013
- [KUS04] Kussin, J.: Experimentelle Studien zur Partikelbewegung und Turbulenzmodifikation in einem horizontalen Kanal bei unterschiedlichen Wandrauigkeiten; Dissertation; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; 2004
- [KWA13] Kwak, J.-H. et al.: Characterization of non-exhaust coarse and fine particles from on-road driving and laboratory measurements; *The Science of the Total Environment* 458; S.: 273 - 282; 2013
- [LAU09] Laurien, E.; Örtel, H.: Numerische Strömungsmechanik – Grundgleichungen und Modelle, Lösungsmethoden, Qualität und Genauigkeit; 5. Aufl.; Springer-Vieweg-Verlag; Wiesbaden; 2013
- [LAW13] Lawrence, S.; Sokhi, R.; Ravindra, K.; Mao, H.; Prain, H.-D.: Source apportionment of traffic emissions of particulate matter using tunnel measurements; *Atmospheric Environment* 77; S.: 548–557; 2013
- [LEC14] Lecheler, S., Numerische Strömungsberechnung: Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele mit ANSYS 15.0; Springer-Vieweg-Verlag; Wiesbaden; 2014
- [LIU74] Liu, B.-Y.-H.; Agarwal, J.-K.: Experimental Observation of Aerosol Deposition in Turbulent Flow; *Journal of Aerosol Science* 5, S. 145 - 155; 1974
- [LOE06] Loemba, A.: Einfluss des Reibwerkstoffs auf die Eigenschaften von Reibpaarungen, besonders auf die Wirkmechanismen in der Kontaktfläche trocken laufender Bremsen; Dissertation; Technische Universität Berlin; 2006
- [LYU19] Lyu, Y.; Bergseth, E.; Wahlström, J.; Olofsson, U.: A pin-on-disc study on the tribology of cast iron, sinter and composite railway brake blocks at low temperatures; *Wear* 424 - 425, S.: 48 - 52; 2019
- [MAR76] Marple, V.A.; Willeke, K.: Impactor design; *Atmospheric Environment* 10; S. 891 - 896; 1976
- [MAT11] Mathissen, M.; Scheer, V.; Vogt, R.; Benter, T. Investigation on the potential generation of ultrafine particles from the tire-road interface; *Atmospheric Environment* 45, S.: 6172 - 6179; 2011
- [MAT12a] Mathissen, M. et al.: Non-exhaust PM emission measurements of a light duty vehicle with a mobile trailer; *Atmospheric Environment* 59, S. 232 - 242; 2012
- [MAT12b] Mathissen, M.: Development of experimental methods to investigate non-exhaust particle emissions from a light duty vehicle; Dissertation; Bergische Universität Wuppertal; 2012

- [MAT17] Matějka, V. et al.: On the running-in of brake pads and discs for dyno bench tests; *Tribology International* 115, S.: 424 - 431; 2017
- [MAT18] Mathissen, M. et al.: A novel real-world braking cycle for studying brake wear particle emissions; *Wear* 414 - 415, S. 219 - 226; 2018
- [MAT19] Mathissen, M. et al.: Brake wear particle emissions of a passenger car measured on a chassis dynamometer; *Atmosphere* 10(9); 2019
- [MAY02] Mayer, W.; Wiedemann, J.; Neubeck, J.: Fahrwiderstandsbestimmung im realen Fahrbetrieb; *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 104, S. 484 - 491; 2002
- [MAY07] Mayer, W.: Bestimmung und Aufteilung des Fahrwiderstandes im realen Fahrbetrieb; Expert-Verlag, Renningen, 2007
- [MIT14] Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 5. Aufl.; Springer-Vieweg-Verlag; Wiesbaden; 2014
- [MOS04] Mosleh, M. et al.: Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials; *Wear* 256, S.: 1128 - 1134; 2004
- [MUE09] Müller, M.; Ostermeyer, G.-P.; Graf, M.: Towards an Explicit Computation of Wear in Brake Materials; 27th SAE Brake Colloquium Proceedings; SAE 2009-01-3048; Tampa; 2009
- [MUS94] Musiol, F.: Erklärung der Vorgänge in der Kontaktzone von trockenlaufenden Reibpaarungen über gesetzmäßig auftretende Phänomene im Reibprozess, Dissertation; Technische Universität Berlin; 1994
- [NOS16] Nosko, O. et al.: Emission of 1.3 - 10 nm airborne particles from brake materials; *Aerosol Science and Technology* 51, S.: 91 - 96; 2016
- [OER15] Oertel, H.; Böhle, M.; Reviol, T.: *Strömungsmechanik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*; 7. Aufl.; Springer-Vieweg-Verlag; Wiesbaden; 2015
- [OES01] Österle, W. et al.: Chemical and microstructural changes induced by friction and wear of brakes; *Wear* 251, S. 1469 - 1476; 2001
- [OES06] Österle, W. et al.: Characterization of up to date brake friction materials; In Proceedings of the International Workshop on Advances in Asbestos-Free Friction Compositers-I (IWAAFC-1); New Dehli; 2006
- [OES07] Österle, W. et al.: Towards a better understanding of brake friction materials; *Wear* 263, S. 1189 - 1201, Elsevier Science B.V.; 2007
- [OST07] Ostermeyer, G.-P.; Müller, M.: New insights into the tribology of brake systems; *SAGE Journals*, S.: 1167 - 1200; 2007
- [OST09] Ostermeyer, G.-P. et al.: Tribological Aspects of Carbon Ceramics and Cast-Iron Brake Rotors with Organic Pad Materials in Simulation and Measurement; 27th SAE Brake Colloquium Proceedings; SAE 2009-01-3010; Tampa; 2009

- [OST10] Ostermeyer, G.-P.: Dynamic Friction Laws and their Impact on Friction Induced Vibrations; 28th SAE Brake Colloquium Proceedings; SAE 2010-01-1717; Phoenix; 2010
- [OST18] Ostermeyer, G.-P.; Merlis, J.-H.: Modeling the Friction Boundary Layer of an Entire Brake Pad with an Abstract Cellular Automaton; Lubricants 6(44); 2018
- [PAN13] Pant, P.; Harrison, R.-M.: Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: a review; Atmospheric Environment 77, S.: 78 - 97; 2013
- [PAU14] Paulweber, M.; Lebert, K.: Mess- und Prüfstandstechnik – Antriebsstrangentwicklung, Hybridisierung, Elektrifizierung; Springer-Vieweg-Verlag; 2014
- [PER18] Perricone, G. et al.: A concept for reducing PM10 emissions for car brakes by 50%; Wear 396–397, S.: 135–145; 2018
- [PLA17] Plachá, D. et al.: Release of volatile organic compounds by oxidative wear of automotive friction materials; Wear 376(377), S.: 705 - 716; 2017
- [POE05] Poeste, T.: Untersuchungen zu reibungsinduzierten Veränderungen der Mikrostruktur und Eigenspannungen im System Bremse; Dissertation; Technische Universität Darmstadt; 2005
- [POP10] Popov, V.-L.: Kontaktmechanik und Reibung; Springer-Vieweg-Verlag, 2. Aufl.; Berlin; 2010
- [POP15] Popov, V.-L.: Kontaktmechanik und Reibung; Springer-Vieweg-Verlag, 3. Aufl.; Berlin; 2015
- [REI12] Reif, K.; Noreikat, E.; Borgeest, K.: Kraftfahrzeug-Hybridantriebe - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen; Vieweg+Teubner Verlag; Wiesbaden; 2012
- [RIE08] Riediker, M.; Gasser, M.; Perrenoud, A.; Gehr, P.; Rothen-Rutishauser, B.: A system to test the toxicity of brake wear particles; 12th International ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles; Zurich; 2008
- [SAG07] Sager, C.: Der Partikeltransport in turbulent durchströmten Rohrleitungen und seine besondere Bedeutung für die Partikelmesstechnik; Dissertation; Universität Duisburg-Essen; 2007
- [SAN03] Sanders, P.-G.; Xu, N.; Dalka, T.-M.; Maricq, M.-M. Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests; Environmental Science & Technology 37, S.: 4060 – 4069; 2003
- [SAR09] Sardá, A.-H.: Wirkungskette der Entstehung von Hotspots und Heißrubbeln in Pkw-Scheibenbremsen, Dissertation, Technische Universität Darmstadt; 2009
- [SCH01] Schmidt, F.: Transport und Abscheidung submikroner Partikel, Habilitation; Gerhard-Mercator-Universität Duisburg; 2001

- [SCH04] Schmid, T.: Laserinduzierte photoakustische Spektroskopie als Sensorprinzip: Anwendungen in der Prozess- und Umweltanalytik; Tenea-Verlag; 1. Aufl.; 2004
- [SCH06] Schumann, M.: Analyseverfahren zur Beurteilung des ungleichförmigen Brems-scheibenverschleißes an Pkw-Scheibenbremsen; Dissertation; Technische Universität Darmstadt; 2006
- [SCH10] Schmidt, K.-G. et al.: Statuspapier Feinstaub. Frankfurt am Main: DECHEMA e.V.; 2010
- [SCH13] Schmid, C.: Heizung, Lüftung, Elektrizität: Energietechnik im Gebäude (Bau und Energie); Vdf Hochschulverlag; 4. Aufl.; Zürich; 2013
- [SEI18] Seifert, P.: Grundlagen der Kalibrierung von Partikelzählern, Munich calibration day 2018; München; 2018
- [SEV95] Severin, D.; Musiol, F.: Der Reibprozess in trockenlaufenden mechanischen Bremsen und Kupplungen, Konstruktion 47, S.: 59 - 68; 1995
- [SOM99] Sommerfeld, M.; Kussin, J.; Kohnen, G.: Transporteffekte in partikelbeladenen Kanalströmungen - Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben SO 204/12-1; Institut für Verfahrenstechnik; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; 1999
- [STI08] Stieb, M.: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie: Beschreibung und Erzeugung von dispersen Stoffen; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 3. Aufl.; 2008
- [THO08] Thorpe, A; Harrison, R.-M.: Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review; Science of the total environment 400 (1–3), S.: 270 - 282; 2008
- [VDI06] VDI 2066-1: Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen, Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung; Beuth-Verlag, Berlin; 2006
- [VER16] Verma, P.-C. et al.: Wear debris from brake system materials: A multi-analytical characterization approach; Tribology International 94, S.: 249 - 259; 2016
- [VON05] von Uexküll, O.; Skerfving, S.; Doyle, R.; Braungart, M.: Antimony in brake pads: a carcinogenic component?; Journal of Cleaner Production 13(1), S.: 19 - 31; 2005
- [WAH08] Wahlström, J. et al.: Airborne wear particles emissions from commercial disc brake materials - passenger car field test; TRITA-MMK 2008:21; 2017
- [WAH09] Wahlström, J.: Towards a simulation methodology for prediction of airborne wear particles from disc brakes: licentiate thesis; Department of Machine Design Royal Institute of Technology; Stockholm; 2009
- [WAH10a] Wahlström, J. et al.: Airborne wear particles from passenger car disc brakes: a comparison of measurements from field tests, a disc brake assembly test stand,

- and a pin-on-disc machine; ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology 1994 - 1996, S.: 179 - 188; 2010
- [WAH10b] Wahlström, J.; Söderberg, A.; Olander, L.; Jansson, A.; Olofsson, U.: A pin-on-disc simulation of airborne wear particles from disc brakes. *Wear* 268, S.: 763 - 769; 2010
- [WAH11] Wahlström, J.: A study of airborne wear particles from automotive disc brakes; Dissertation; Department of Machine Design Royal Institute of Technology; Stockholm; 2011
- [WAH14] Wahlström, J.; Olofsson, U.: A field study of airborne particle emissions from automotive disc brakes; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, S.: 747 - 757; 2014
- [WAH17] Wahlström, J.; Lyu, Y.; Matejka, V.; Söderberg, A.: A pin-on-disc tribometer study of disc brake contact pairs with respect to wear and airborne particle emissions; *Wear* 384 - 385, S.: 124 - 130; 2017
- [WAN17] Wang, F.; Zhang, E.; Wang, J.: A Study of Particle Deposition in Ventilation Ducts with Convex or Con-cave Wall Cavity; *Procedia Engineering* 205, S.: 3285 – 3292; 2017
- [WIK09] Wik, A.; Dave, G.: Occurrence and effects of tire wear particles in the environment - a critical review and an initial risk assessment; *Environmental Pollution* 157, S.: 1 - 11; 2009
- [ZIE15] Zierap, J.; Bühler, K.: Grundzüge der Strömungslehre. Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide; 10. Aufl.; Springer-Vieweg-Verlag; Wiesbaden; 2015

Internetquellen

- [NAN03] NanoWorld AG; Präsentation: Reibung, <http://nano-world2.cs.unibas.ch/frictionmodule/content/0900glossary/reibung.pdf>; Abruf: 03.03.2020
- [STA19] N. N.: Feinstaub (PM10)-Emissionen des Straßenverkehrs seit 1995 in Baden-Württemberg; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Verkehrszählungsergebnisse der Landesstelle für Straßentechnik Baden-Württemberg und eigene Modellrechnungen; URL: <https://www.statistik-bw.de/Umwelt/Luft/l1a07aub.jsp>; Abruf: 14.12.2019
- [TUF18] TU Freiberg: <http://tu-freiberg.de/exphys/festkoerperspektroskopie/geraete/xps>; Abruf: 13.06.2018
- [WAK17] Wakeling, D. et al.: UK Informative Inventory Report (1990 to 2015); https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat07/1703161205_GB_IIR_2017_Final_v1.0.pdf; Abruf: 06.01.2020

Eigene Veröffentlichungen, Vorträge und Patentanmeldungen

- [AUG17] Augsburg, K.; Hesse, D.; Wenzel, F.; Eichner, G.: Measuring and characterization of brake dust particles; EuroBrake Proceedings; EB2017-VDT-040; Dresden; 2017
- [AUG19a] Augsburg, K.; Hesse, D.; Hamatschek, C.: Außermotorische Feinstaubemissionen an Kraftfahrzeugen - Stand und Entwicklungstendenzen; 14. Magdeburger Maschinenbautage; Otto von Guericke Universität Magdeburg; 2019
- [AUG19b] Augsburg, K.; Hesse, D.; Stand und Entwicklungstendenzen bei der Minderung von Non-Exhaust-Emissionen; 17. FAD-Konferenz „Herausforderung – Abgasnachbehandlung“; Dresden; 2019
- [AUG19c] Augsburg, K.; Hesse, D.; Wenzel, F.: Vorrichtung zur Messung und Klassifizierung der Partikelemissionen einer Radbremse eines Fahrzeuges; DE102017006349; 2019
- [AUG20] Augsburg, K.; Hesse, D.: Comparative study of brake particle emissions; 11. Internationales AVL Forum Abgas- und Partikelemissionen; Ludwigsburg; 2020
- [FEI20] Feißel, T.; Hesse, D.; Augsburg, K.: Measurement of Vehicle Related Non Exhaust Particle Emissions under Real Driving Conditions; EuroBrake 2020 Proceedings; EB2020-STP-039; Barcelona; 2020
- [HES18] Hesse, D.; Augsburg, K.: Influence of regenerative braking on the emission behavior of friction brakes; 48th PMP Meeting; Ispra; 2018
- [HES19a] Hesse, D.; Augsburg, K.: Real driving emissions measurement of brake dust particles; EuroBrake Proceedings; EB2019-FBR-017; Dresden; 2019
- [HES19b] Hesse, D.; Augsburg, K.: Investigation of the Potentials of Regenerative Brake Systems towards the Reduction of Brake Particle Emissions; EuroBrake Proceedings; EB2019-EBS-021; Dresden; 2019
- [HES19c] Hesse, D.; Augsburg, K.: Real driving emissions measurement of brake dust particles; SAE Brake Colloquium Proceedings; 2019-01-2138; Orlando; 2019
- [MAM20] Mamakos, A; Arndt, M.; Hesse, D.; Hamatschek, C.; Augsburg, K.: Comparison of particulate matter and number emissions from a floating and a fixed caliper brake system of the same lining formulation; SAE Technical Paper 2020-01-1633; San Antonio; 2020
- [MAM19] Mamakos, A; Arndt, M.; Hesse, D.; Augsburg, K.: Physical characterization of brake wear particles in a PM10 dilution tunnel; atmosphere 10; 2019
- [SAC16] Sachse, H.; Augsburg, K.; Hesse, D.; Wenzel, F.; Lugovyy, D.; Schröder, M.; Sampling of Brake Dust Particles; EuroBrake 2016 Proceedings; EB2016-SVM-061; Mailand; 2016

Betreute studentische Arbeiten

Folgende studentische Abschlussarbeiten und Projektseminararbeiten wurden während der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik der TU Ilmenau durch den Verfasser betreut und stehen mit dem Thema der vorgelegten Arbeit in engem Zusammenhang:

- [AUF17] Aufdemkamp, M.: Vergleich und Bewertung unterschiedlicher Probenahmestrategien von Bremsstaub an einem Schwungmassenprüfstand; Bachelorarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2019
- [BRA18] Brand, L.: Experimentelle und simulative Beschreibung von Abscheidemechanismen am Beispiel eines Probenahmesystems für Realfahrtanwendungen; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2018
- [FEI16] Feißel, T.: CFD-Simulation der emittierten Partikel einer PKW-Bremse in einem gekapselten Aufbau mit Absaugvorrichtung; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2016
- [FOE18] Förner, J.: Entwicklung eines Konstantvolumen-Probenahmesystems zur Erfassung von emittierten Bremsstaubpartikeln im realen Fahrversuch; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2018
- [GER17] Germanow, P.: Entwicklung einer Strategie zur Bestimmung der Partikelmasenkonzentration von Bremsstaubpartikeln bei Teilstromentnahme (in-situ) an einem Schwungmassenprüfstand; Bachelorarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2017
- [GRA18] Grafe, C.: Analyse von Abscheide- und Anhaftmechanismen am Beispiel von partikelförmigen Bremsenemissionen; Bachelorarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2018
- [GUE17] Günther, D.: Bewertung des gesundheitlichen Gefährdungspotentials von partikelförmigem Bremsstaub auf den menschlichen Organismus; Bachelorarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2017
- [JUS17] Just, R.: Klassifizierung und Charakterisierung von luftgetragenen partikelförmigen Bremsstaub am Beispiel variierender Beanspruchungsparameter; Bachelorarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2017
- [JUS19] Just, R.: Untersuchung des Einflusses von Fahrzeug- und Fahrzustandsparametern auf die Charakteristik partikelförmiger Bremsenemissionen; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2010
- [KRO17] Krötter, M.: Probenahme, Messung und Klassifizierung von luftgetragenen Bremsstaubpartikeln an einem Schwungmassen-Bremsenprüfstand (SMP); Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2017

- [LIL19] Lilge, T.: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss des Fahrwiderstandes auf das Emissionsverhalten trockenlaufender Reibungsbremsen; Bachelorarbeit, Technische Universität Ilmenau; 2019
- [LIN18] Lin, B.: Simulative Untersuchung von Einflussgrößen auf die Partikelströmung geschlossener Probenahmesysteme; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2018
- [POP19] Popp, M. L.: In-situ Visualisierung des Abscheideverhaltens partikelförmiger Bremsenemissionen; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2019
- [PRO18] Probst, S.: Experimentelle und simulative Beschreibung von Abscheide- und Anhaftmechanismen partikelförmiger Bremsenemissionen; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2018
- [REI17] Reinhard, J.: Untersuchung des Einflusses variierender Parameter auf das Agglomerationsverhalten von Bremsstaub mithilfe der Methodik der statistischen Versuchsplanung (DoE); Bachelorarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2017
- [REI18] Reinhard, J.: Untersuchung des Einflusses messsystemspezifischer Parameter auf die messtechnische Analyse von Bremsenaerosol; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2018
- [SOM19a] Sommer, J.: Analyse des Einflusses der Vernetzung und der Initialbedingungen auf die simulative Untersuchung partikelförmiger Bremsenemissionen; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2016
- [SOM19b] Sommer, C.: Analyse von Einflussgrößen auf die Emissionscharakteristik von Kfz-Radbremsen unter realen Fahrbedingungen; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2019
- [STO19] Storch, L.: Optimierung eines CFD-Modells zur Simulation von Bremsstaubpartikeln in einem Probenahmesystem für Realfahrtanwendungen; Bachelorarbeit, Technische Universität Ilmenau; 2016
- [UEB19] Übel, F.: Analyse von Einflussgrößen auf die Probenahme von Bremsenemissionen unter variierenden Prüfumgebungen; Masterarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2019
- [WIN19] Winges, M.: Analyse des Einfluss variierender Beanspruchungsparameter auf das Reibwert- und Emissionsverhalten alternativer Reibpaarungen; Bachelorarbeit; Technische Universität Ilmenau; 2018

Anhang

A1 – Abmessungen des stationären Konstantvolumen-Probenahmesystems

