

Messung und Simulation von Non-Exhaust Partikelemissionen

Erstellt im Auftrag des

Bundesamtes für Umwelt, BAFU

Bericht Nr. I-01/25/Hb-EM-Inst-23/04/30-670 vom 21.01.2025

Dieser Bericht darf nur vollinhaltlich, ohne Weglassen und
Hinzufügen, veröffentlicht werden.

Sollte er auszugsweise abgedruckt oder vervielfältigt werden,
so ist vorher die schriftliche Genehmigung der Verfasser einzuholen.

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt Luftreinhaltung und Chemikalien CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: iTnA TU Graz, Inffeldgasse 19,

Autor/Autorin: Univ.-Prof. Dr. Stefan Hausberger, D.I. Lukas Landl, D.I. Enis Ketan

Begleitung BAFU: Harald Jenk (Sektion Verkehr)

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Messung und Simulation von Non-Exhaust Partikelemissionen

Autoren:	Univ.-Prof. Dr. Stefan Hausberger	21.01.2025
	D.I. Lukas Landl	21.01.2025
	D.I. Enis Ketan	21.01.2025

Inhalt

1	Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	5
2	Einleitung	7
3	Literaturrecherche	9
3.1	Bremsabrieb	9
3.1.1	Grundlagen	10
3.1.2	Literaturdaten zu Emissionsfaktoren	12
3.2	Reifenabrieb	15
3.2.1	Grundlagen	15
3.2.2	Literaturdaten zu Emissionsfaktoren	19
4	Prüfstandmessungen	19
4.1	Messaufbau der Reifenabriebmessungen	21
4.2	PKW und LNF Messungen	23
4.3	LKW Messung	27
4.4	2-Rad Messung	31
4.5	Temperatureinfluss auf die Abriebspartikel eines Reifen	34
5	Modellansätze für Non-Exhaust Emissionen	37
5.1	Modell für Bremsabrieb	38
5.1.1	Modell für die Dauerbremsen	40
5.1.2	Berechnung von PM10 und P2.5	43
5.2	Modell für Reifenabrieb	44
5.2.1	Abhängigkeiten	44
5.2.2	Das charakteristische Reifenabrieb Emissions-Polygon	49
5.2.3	Generische Kurvenradien	54
5.3	Modell für Straßenabrieb	57
5.4	Modell für Wiederaufwirbelung	58
6	Beispiel Modellergebnisse	60
6.1	PKW Bremsabrieb	61
6.2	PKW Reifenabrieb	62
6.2.1	Einflüsse durch generische Radiusfunktion auf Reifenabrieb	63
6.3	PKW Summe aller Non-Exhaust Emissionen	64
6.4	LKW Summe aller Non-Exhaust Emissionen	65
7	Zusammenfassung und Empfehlungen	67
8	Literaturverzeichnis	70
9	Annex II: Übersicht der Messmatrizen der einzelnen Testfahrzeuge	73

1 Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Operatoren und Formelzeichen

Σ	Summe
Δ	Differenz zweier Größen

Indizes und Abkürzungen

A	Querschnittsfläche [m ²]
AB	Autobahn
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub
AO	Außerorts
BEV	Battery Electric Vehicle
BWP	Brake Wear Particles
CC	Carbon ceramic brake disc
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
CPC	Condensation Particle Counter
CS	Catalytic stripper
d	Durchmesser [m]
ECE-kh	Economic Commission for Europe– Reibbelag für den europäischen Markt (low steel), kupferhaltig
ECE-kf	Economic Commission for Europe Reibbelag für den europäischen Markt (low steel), kupferfrei
ERMES	European research on mobile emission sources
EU	Europäische Union
F _x	Kraft in Längsrichtung des Fahrzeuges [N]
F _y	Kraft in Querrichtung des Fahrzeuges [N]
F _z	Kraft vertikal auf die Radachse [N]
GCI	(Conventional) grey cast iron brake disc
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr
HDV	Heavy Duty Vehicle (schweres Nutzfahrzeug > 3,5t max. Gesamtgewicht)
HGV	Heavy Goods Vehicle
HMB	Hartmetallbeschichtete Bremsscheibe
HMC	Hybrid metallic-composite (tungsten carbide-coated) brake disc
IO	Innerorts
ITnA	Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme
m	Masse [kg]

MFC	Mass flow controller
MW	Motorway (Autobahn)
NAO	Non-Asbestos Organic Bremsbeläge
NEDC	New European Drive Cycle
NEP	Non-Exhaust Particles
n.v.	Nicht verfügbar
OEM	Original Equipment Manufacturer
PA	Pressured Air
PD	Porous tube diluter
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikel Masse Emissionen (unterschieden nach $< 2.5 \mu\text{m}$ als $\text{PM}_{2.5}$, $< 10 \mu\text{m}$ als PM_{10} und als „total“ Gesamtmasse TPM)
PN	Particle Number: Partikelanzahl Emissionen, unterschieden nach $> 4\text{nm}$ (PN_4); $> 10 \text{ nm}$ (PN_{10}); $> 23 \text{ nm}$ (PN_{23}) und „total“ Gesamtanzahl (TPN)
RDE	Real Driving Emissions
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SOC	State Of Charge
TP	Tail pipe
TPM	Total Particle Mass (Masse über alle Größenklassen inklusive nicht luftgetragene Partikel)
TWP	Tire Wear Particles
uCARe	Eu H2020 Projekt “You Can Always Reduce Emissions because you care”; https://www.project-ucare.eu/
UBA	Umweltbundesamt Deutschland
Urb	Urban (Innerorts)
USA	United States of Amerika
$\dot{V}$	Volumenstrom
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicle Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure

2 Einleitung

Partikel aus Abrieb von Bremsen, Reifen und Straße sowie die wiederaufgewirbelten Partikel haben bisher vermutlich einigermaßen proportional mit der Verkehrsmenge zugenommen. Im Gegensatz dazu, haben die Abgaspartikel durch die Einführung strenger Abgasstandards stark abgenommen. Die damit verbundene Einführung von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen und mit EURO 6d-TEMP auch bei den meisten ottomotorisch betriebenen PKW führt zu mehr als einer Größenordnung geringeren Partikelemissionen gegenüber Kfz ohne Partikelfilter.

Damit nimmt der Anteil der Partikel aus Abrieb, auch als „Non-Exhaust-Partikel (NEP)“ bezeichnet, an den Verkehrsemissionen stark zu. Neben dem steigenden Anteil sind auch die Zusammensetzungen der NEP für die Umweltauswirkungen relevant. Bei Reifenabrieb entstehen große Mengen Mikroplastik, die auch mit Additiven des Reifengummis sowie Einschlüssen von Straßenabrieb versetzt sind. Bei Bremsabrieb entstehen speziell bei hohen Temperaturen der Bremsanlage aus Bindemitteln ultrafeine Partikel und generell bei jedem Bremsvorgang Abrieb von Bremsbelag und Scheibe.

Während die Abgaspartikel des Verkehrs inzwischen sehr genau erfasst werden und auf Daten aus koordinierten Messprogrammen basieren, sind die Datengrundlagen und Modelle zu NEP noch deutlich einfacher und vermutlich ungenauer. So werden z.B. für die Abgas-Emissionsfaktoren die Flottenanteile unterschiedlicher Marken und Typen durch Gewichtung der Messdaten und der Einfluss der Verkehrssituation und der Umgebungsbedingungen durch detaillierte Modelle berücksichtigt. Die vermutlich ebenfalls große Variabilität des Emissionsverhaltens unterschiedlicher Reifentypen bzw. Technologien und Typen von Bremsbelägen und Bremsscheiben sowie Straßenbeschaffenheiten wird in NEP-Emissionsfaktoren bisher nicht systematisch berücksichtigt. Auch der Einfluss der Verkehrssituationen wird, wenn überhaupt, in verfügbaren Emissionsfaktoren nur grob berücksichtigt.

Wegen der steigenden Bedeutung der NEP hat die EU in ihrer Euro 7-Verordnung auch Testverfahren und Grenzwerte für Brems- und Reifenabrieb festgeschrieben. Allerdings ist bislang nur das Messverfahren für Bremsabrieb von PKW nach der GTR 24 fixiert (UN, 2024). Dabei werden die Bremspartikel PM₁₀, PM_{2.5} und PN₁₀ am Komponentenprüfstand in einem genormten Testzyklus (WLTP Brake Cycle) gemessen. Für schwere Nutzfahrzeuge wird vermutlich ein ähnliches Verfahren verwendet werden, dieses ist derzeit noch in Entwicklung.

Für das Testverfahren zum Reifenabrieb an C1 (PKW) Reifen besteht ein Entwurf in der UN Regulierung Nr. 117, der einen Konvoi Test auf der Straße verwendet, bei dem über 8 000 km Fahrt der Gesamtverschleiß von Reifen jeweils im Verhältnis zu einer Referenz-Reifentype ermittelt wird. Der Masseverlust der Reifen wird durch Abwiegen der Reifen vor und nach dem Test bestimmt. Der Einfluss von Strecke, Fahrweise, Kfz-Konfigurationen etc. soll durch das Konvoi-Fahren mit einem Kfz mit der Referenz-Reifentype eliminiert werden. Derzeit laufen beim JRC dazu Flottentests. Eventuell ergeben sich dabei noch Anpassungen an der UNR 117. Da in der Literatur sehr unterschiedliche Verhältnisse von PM₁₀, PM_{2.5} und PN im Verhältnis zum Gesamtverschleiß gefunden werden und auch die Messdaten zu PN-Emissionen im Reifenabrieb stark streuen, z.B. (Chabouillot, 2023), scheint es möglich, dass der Anteil von luftgetragenen Partikelgrößen am Gesamtabrieb stark von den Reifen- und Fahrbahneigenschaften und Fahrbedingungen abhängen könnte. Aus heutiger Sicht ist es daher fraglich, ob die Konvoi-Testmethode fundierte Daten zu den luftgetragenen Partikelemissionen der Reifen liefern können wird.

Bei den Emissionsgrenzwerten für NEP sind bislang erst für die Partikelmassemissionen von PKW-Bremsabrieb Limits definiert. Für Reifenabrieb generell sowie für den Bremsabrieb von schweren Nutzfahrzeugen gibt es noch keine Grenzwerte. Für schwere Nutzfahrzeuge werden derzeit noch die Testmethoden erarbeitet.

Mit der Einführung von Grenzwerten und standardisierten Testverfahren werden vermutlich bald umfangreichere und auch einheitlichere Messdaten zu NEP verfügbar sein. Damit sollte eine genauere und besser auflösende Bestimmung von Emissionsfaktoren für Brems- und Reifenabrieb mit moderaten Kosten möglich werden.

In (Hausberger, 2023) wurden die Grundlagen erarbeitet, um die NEP Emissionsfaktoren für alle Verkehrssituationen des HBEFA basierend auf physikalischen Grundlagen berechnen zu können. Dafür wurde das Simulationsmodell PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) der TU Graz, das schon zur Simulation aller Abgasemissionsfaktoren verwendet wird, um Module für NEP Emissionen erweitert. In PHEM werden die an den Rädern und Bremsen übertragenen Leistungen mit den Gleichungen der Fahrzeuglängsdynamik berechnet. Diese Größen können zur Quantifizierung der NEP Emissionen genutzt werden. Mit den verfügbaren Messdaten wurden die Modellteile für NEP bedatet und ein erster Satz an Emissionsfaktoren berechnet. Bei der Arbeit zeigten sich einige besonders kritische Daten-Lücken, welche auch durch intensive Literaturrecherchen nicht geschlossen werden konnten und daher Gegenstand dieses Folgeprojektes sind. Dabei wurden folgende wesentliche Grundlagen ergänzt:

- Aus Real-World Testfahrten wurde ein „Retarder“ Modell erstellt, dass den Anteil an der Bremsleistung, der bei schweren Nutzfahrzeugen durch die Dauerbremsen (Retarder und Motorstaubremse) geleistet wird, als allgemeine, generische Funktion abbildet. Dazu war bislang keine Information verfügbar.
- Zu den Bussen unter 7,5t und LKW unter 12t TPMLM, welche nicht verpflichtend eine Dauerbremse haben müssen, wurde eine Recherche zu den Flottenanteilen mit Retarder durchgeführt. Dazu wurden keine Daten gefunden aber Aussagen von Experten bei OEMs eingeholt.
- Es wurden Messungen zum PM und PN Reifenabrieb von schweren Nutzfahrzeugen (SNF) und 2-Rädern im Vergleich zu PKW und LNF Reifen durchgeführt, da die Datenlage zu Reifenabrieb von SNF und 2-Rädern bisher sehr dünn war. Mit den Messdaten kann nun zumindest auf ein vergleichbares physikalisches Abriebverhalten als Basis für die Simulation geschlossen werden.
- Die Literaturrecherchen zu allen NEP Emissionen wurden weitergeführt. Damit wurden auch die Ansätze für Straßenabriebemissionen und Wiederaufwirbelung fixiert und die Methode zur Simulation des Reifenabriebs verbessert.
- Es wurde eine Datensammlungskampagne zu Reifen- und Bremsabriebtests gestartet. Ziel ist es, diese Messdaten analog zu den Abgastests zu sammeln um damit in Zukunft nach Flottenanteilen gewichtete Emissionskennfelder oder Kennlinien als Eingabedaten für die Simulation in PHEM erstellen zu können.
- Mit den neuen Messdaten und Informationen wurden die Modellansätze und die Kennlinien aus (Hausberger, 2023) erweitert. Insbesondere wird bei der Simulation des Reifenabriebs jetzt auch die Querdynamik und die Schlupfleistung berücksichtigt, da sich Kurvenfahrten ein wesentlicher Parameter für die Abriebemissionen sein dürften.
- Für die elektrifizierten Antriebe (HEV, PHEV, BEV) wurden die generischen Regelstrategien für Rekuperation und mechanisches Bremsen im Modell PHEM für alle Kfz-Kategorien auf ihre Effekte auf die Bremsemissionen getestet und optimiert.

- Mit den erweiterten Datensätzen und dem verbesserten Simulationsmodell werden letztlich alle NEP Emissionsfaktoren für das HBEFA für alle Verkehrssituationen berechnet und an Infrac zur Integration ins HBEFA geliefert.

Damit steht erstmals ein detailliertes Modell für die Berechnung der NEP für beliebige Kombinationen aus Kfz und Verkehrssituationen zur Verfügung. Ähnlich wie für Abgasemissionen, können damit entsprechend der wesentlichsten physikalischen Abhängigkeiten die Emissionsfaktoren berechnet werden. Zur Bestimmung der Modell-Eingabedaten sind Messdaten zu PM und PN Emissionen gemeinsam mit den relevanten Größen wie Reibleistungen und Drehzahlen notwendig, welche systematisch verarbeitet und dann nach Bestandsdaten gewichtet werden können, um für die Flotte repräsentative Ergebnisse zu erhalten.

Bisher ist die Datengrundlage zu den NEP Emissionsfaktoren noch recht bescheiden, dies sollte sich aber wie schon beschrieben, durch die Euro 7 Verordnungen deutlich verbessern.

3 Literaturrecherche

Als Basis für den gewählten Ansatz wurde die im vorangegangenen Projekt (Hausberger, 2023) schon getätigte Literaturrecherche erweitert. Wir haben Literatur bis August 2024 gezielt gesucht und analysiert. Spätere Veröffentlichungen wurden berücksichtigt, wenn sie noch in den Arbeitsfluss integriert werden konnten allerdings nicht systematisch gesucht.

Die Literatur wurden gesucht und analysiert bezüglich:

- Abhängigkeiten der Brems-, Reifen- und Straßenabriebemissionen sowie von Wiederaufwirbelung von physikalischen Größen als Basis für den Modellansatz
- Messdaten und Modellansätze, die zur Bedatung des von uns entwickelten Modells genutzt werden können

Als Suchmaschinen wurde die TUG-Literatursuche (<https://search-tug.obvsg.at/primo-explore/search?vid=TUG>) mit Zugang zu den meisten Journalen und Veröffentlichungen sowie auch Google genutzt. Die wichtigsten Suchbegriffe waren:

- Vehicle brake wear, particle emissions, size distribution, mass distribution
- Vehicle tire wear, particle emissions, size distribution, mass distribution
- Road wear, particle emissions, size distribution, mass distribution
- Resuspension particle emissions, size distribution, mass distribution

Es wurden dabei 33 gegenüber dem Modellstand Ende 2023 nach (Hausberger, 2023) neue Literaturquellen als relevant gesichtet und ausgewertet.

Bei der Auswertung haben wir NEP als alle Partikel definiert, die mittels CPC im jeweils normalen Messbereich bezüglich Anzahl (PN) bzw. gravimetrisch auf Filtern bezüglich Masse (PM) gemessen werden. Dabei wurde sowohl bei PN als auch PM nach den Größenklassen unterschieden. Messdaten mit vergleichbaren Messaufbauten, speziell mit Impaktoren, wurden auch verwendet, auch wenn damit ein etwas anderer Mobilitätsdurchmesser klassifiziert wird (aerodynamisch statt elektrischer), da die Menge an Daten insgesamt noch eher gering ist.

3.1 Bremsabrieb

NEP aus Bremsabrieb (Brake Wear Particles, BWP) sind hier alle Partikel, die aus Abrieb von Bremsbelag und Scheibe entstehen.

3.1.1 Grundlagen

Bei der Abnutzung von Bremsbelägen und -scheiben entstehen Partikel unterschiedlicher Größe und Morphologie. Verschiedene Kombinationen von Geschwindigkeit, Bremsdruck und Temperatur führen zu einem unterschiedlichen Ausmaß an Abnutzung (OECD, 2020). Kleine Partikel unter ca. 30 nm werden vor allem durch die Zersetzung von Bindemitteln erzeugt. Im Falle von organischen Pads beginnt die Zersetzung bei ca. 160°C (es werden Bereiche von ca. 150 bis 200°C berichtet). Bei anorganischen Pads beginnt die Zersetzung nicht unter 210°C, z.B. (Niemann, 2021). Die in der EU typischerweise verwendeten ECE Beläge enthalten metallische aber auch organische Bestandteile. Oberhalb von ca. 180°C bis 250°C kann die Partikelanzahlemission bei diesen Belägen aufgrund von Verdunstung und anschließender Nukleation der löslichen Bestandteile der Beläge in Bindemitteln stark ansteigen. Ein hoher Eisenanteil im Belag kann zu hohen lokalen Spitzentemperaturen führen, wenn Eisenbestandteile mit hoher Kraft auf die Bremsscheibe gepresst werden, wodurch wiederum ein erhöhtes Partikelbildungspotenzial resultiert, (Hesse, 2020).

Dementsprechend zeigen Messungen von Partikelmasse und Partikelanzahl bei höheren Bremstemperaturen bimodale Verteilungen, mit Peaks unter ca. 10 nm und bei ca. 1000 nm (Zhengyu, 2022). Bei moderaten Bremstemperaturen wird von unimodalen Verteilungen mit Masseschwerpunkt bei ca. 2 bis 5 µm berichtet. Da für die Messung der Partikel Anzahl von 10nm bis 5 µm mehrere unterschiedliche Messmethoden (CPC bis optische Streulichtmessung) erforderlich sind, die verwendeten Messmethoden in der Literatur aber unterschiedlich sind, findet man auch unterschiedliche Aussagen zu den Größenverteilungen der BWP.

In (Hesse, 2020) sind Größenverteilungen bei ECE und NAO (Non-Asbestos Organic)-Bremsbelägen aus umfangreichen Prüfstandtests beschrieben. Der Median der Größenverteilung der Anzahlemissionen sinkt mit steigender Scheibendrehzahl bzw. Fahrzeuggeschwindigkeit. Bei hohen Geschwindigkeiten auch mit zunehmendem Bremsdruck (Abbildung 3-1).

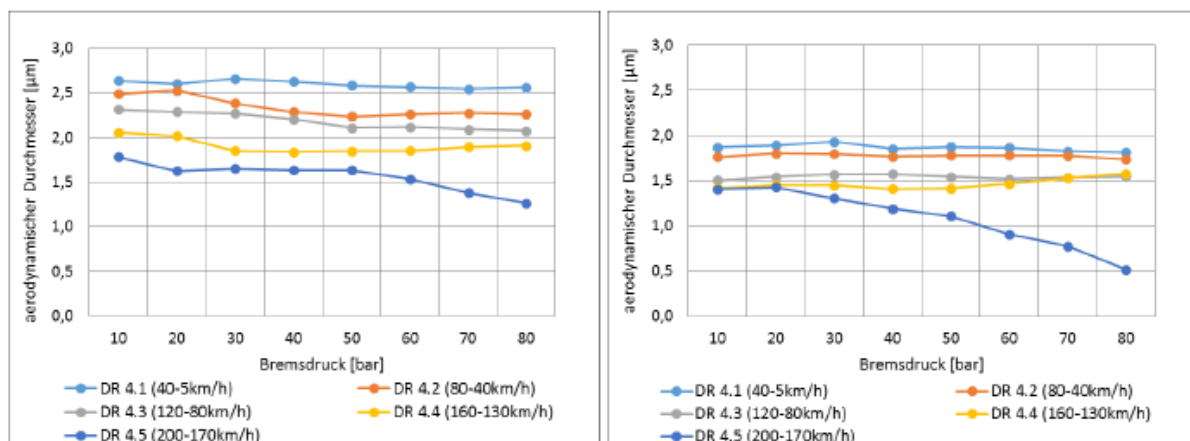


Abbildung 3-1: Median-Partikeldurchmesser über gemessene Druckreihen für ECE-(links) und NA (rechts) Bremsbeläge. Quelle: (Hesse, 2020)

Die Menge des abgebauten Bindemittels bei höheren Temperaturen scheint von der Historie der Bremsvorgänge abzuhängen, wobei die Emissionsmenge pro Ereignis bei wiederholten Bremsvorgängen abnimmt. Größere Partikel entstehen durch den Abrieb von Material an den Belägen und der Scheibe. Die Größe der abgeriebenen und auch ausgebrochenen Partikel dürfte bei geringen Relativgeschwindigkeiten zwischen Scheibe und Bremsbelag zunehmen. In (Hesse, 2020) wurden zeitaufgelöste PN Größenverteilungen gemessen, welche zeigen,

dass Partikelemissionen unter 200 nm mit zunehmender Dauer des Brems Eingriffs bei ausreichend hoher Bremsleistung massiv zunehmen. Dies dürfte auf die o.a. lokalen Temperaturspitzen mit entsprechenden lokalen verdampfungs- und Nukleationsvorgängen zurückzuführen sein.

(Beji, 2020) zeigt für den Bremsabrieb eine Abhängigkeit von Bremskraft und Frequenz.

Die Oberflächen von „Low Steel“ (LS)-Bremsbelägen sind rauer als die von „Non-Steel“-Bremsbelägen (NS), da die Stahlfasern in LS-Bremsbelägen als verschleißfeste Primärkontaktplatten dienen und dadurch die Oberflächenrauheit erhöhen. LS-Bremsbeläge ergeben höhere Partikel-Massenmissionen und tendenziell auch höhere Partikel-Anzahlemissionen als NS-Beläge (Park, 2021).

In (Hesse, 2021) wurden LS-Beläge aus dem EU-Markt (auch ECE Beläge genannt), NAO (Non-Asbestos Organic)-Beläge in Kombination mit konventionellen Bremsscheiben aus Stahl (GCI) sowie mit HMC (wolframkarbidbeschichtet) und Karbon-Keramik (CC)-Bremsscheiben im WLTP-Bremszyklus vermessen. Dabei wurde festgestellt, dass die Partikelemissionen zu Beginn mit einer neuen GCI-Bremse deutlich höher sind (ca. Faktor 2.2 bzgl. Masse und Faktor 5 bzgl. Anzahl während der ersten Trips gegenüber den nachfolgenden Tests). Das wird auf den Abrieb der Anti-Korrosionsschicht und von anfänglichen Unebenheiten zurückgeführt. Bei HMC-Bremsscheiben war der Effekt nicht, bei CC nur gering zu sehen. In eingebremstem Zustand hatten CC-Bremsscheiben bis zu etwa 70% geringere PM₁₀ und 20% bis 86% geringere PN-Emissionen als konventionelle GCI Scheiben. Bei HMC-Scheiben war das Reduktionspotenzial etwas geringer. Sowohl HMC- als auch CC-Bremsscheiben werden aus Kostengründen derzeit so gut wie nicht verwendet, könnten infolge der Euro 7 Grenzwerte aber zur Anwendung kommen.

ECE-Bremsbeläge bestehen aus einer Mischung aus organischen und anorganischen Fasern mit Schleifmitteln, Schmierstoffen und Metallen. Die Verschleißfläche ist entsprechend inhomogen. Abgeriebene Partikel sammeln sich in Oberflächenkavitäten von Belag und Scheibe, von denen einige Kavitäten mit einer harten Schicht (Zunder) bedeckt sind (Abbildung 3-2, rechts). Diese Partikel können freigesetzt werden, wenn sich die Bremse wieder öffnet, wobei bei hohen Scheibendrehzahlen größere Mengen freigesetzt werden als bei niedrigeren Scheibendrehzahlen. (Niemann, 2021) fand diesen Effekt bei Messungen des Bremsenverschleißes und bestätigte den Speichereffekt an Bremsbelägen durch elektronenmikroskopische Analyse der Beläge.

Wir nehmen an, dass die harten Schichten durch die lokal hohen Temperaturen an den Stellen entstehen, an denen Stahlfasern oder andere harte Materialien mit der Bremsscheibe in Kontakt kommen. Dort entsteht eine höhere Reibungskraft als in der umgebenden Fläche, in der weichere Materialien mit der Scheibe in Kontakt sind. Die weicheren Materialien werden schneller abgetragen und sammeln sich um die metallischen Kontaktstellen an. Bei längeren hohen Temperaturen kann dieser Abrieb sintern, es wachsen harte Linsen, die dann bei hohen thermischen Spannungen, wie sie etwa beim Abkühlen auftreten können, wieder zerstört werden. Dieser Vorgang könnte die sehr variablen Bremsabriebemissionen nach Bremsenöffnen erklären.



Abbildung 3-2: Bild der Oberfläche eines ECE-Belages nach 30 Schleppbremsungen bei 80 km/h und 38 bar vor (links) und nach Druckluftreinigung (Mitte) aus (Niemann, 2021) sowie eine Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines ECE Belags nach Bremsungen (rechts)

Gemessen wird der Bremsabrieb meist auf Bremsenprüfständen, auf dem definierte Bremszyklen (Bremsleistung über Zeit) gefahren werden können. On-Board-Messungen erfordern aufwändige Aufbauten, die meist durch eine speziell präparierte Radnabe die Probe absaugen und die Partikelkonzentration messen. Um nur Bremsabrieb zu messen, wird die Bremsanlage dafür teilweise eingehaust, was dann aber die Kühlung der Bremse behindert und zu höheren Temperaturen führen kann, z.B. (zum Hagen, 2019).

Ein genormtes Testverfahren für Bremsabrieb wird durch eine Arbeitsgruppe des Partikel-messprogramms (PMP) unter der Schirmherrschaft der UNECE-Arbeitsgruppe für Umweltverschmutzung und Energie (GRPE) ausgearbeitet, (Grigoratos, 2021), (UN GTR, 2022). Das Messverfahren nutzt Bremsenprüfstände, einen genormten Bremszyklus mit 192 km Länge und über 300 Bremsvorgängen (WLTP-Brake Cycle). Dabei sind Maximalwerte für die Brems-scheibentemperatur für einzelne Testabschnitte vorgegeben um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Bei den Messergebnissen werden alle abgeriebenen Partikel erfasst, die nicht auf Belag oder Scheibe verbleiben. Im realen Betrieb könnte ein größerer Teil der Partikel allerdings auf Felge, Radkasten und anderen Bauteilen bleiben und nicht in die Umgebungsluft gelangen. In der Literatur sind für die Partikelmasseemissionen Werte von 35% bis 70% Anteil an in die Luft gelangenden Bremspartikeln zu finden, (Sanders, 2002), (Garg, 2000). Für PN-Emissionen konnten wir dazu noch keine Angaben finden.

3.1.2 Literaturdaten zu Emissionsfaktoren

In der Literatur zu Emissionsfaktoren werden meistens entweder einfache durchschnittliche Emissionen in mg/km oder geschwindigkeitsabhängige Emissionsfaktoren angegeben z. B. (Monks, 2019), (OECD, 2020), (Mellios, 2022). Ein Ansatz, der die Bremsenergie als erklärende Größe für Bremsabriebemissionen verwendet ist in (Wakeling, 2019) beschrieben. Die Bremsenergie wird dort allerdings aus statistischen Zusammenhängen zu Geschwindigkeit, Beschleunigung und Seehöhe bestimmt und ein konstanter Emissionsfaktor in [mg/kJ] verwendet¹.

Aus dem Entstehungsprozess des Bremsabriebs ist zu erwarten, dass die Emissionen von Bremsfrequenz, Bremskraft- und Bremsdauer, von der Bremsentemperatur sowie vermutlich auch der Scheibengeschwindigkeit abhängen. Die Bremsentemperatur hängt wiederum von Bremsfrequenz, Bremskraft- und Bremsdauer ab. Verschiedene Verkehrssituationen und Fahrzeugkonfigurationen können demnach auch bei ähnlicher Durchschnittsgeschwindigkeit

¹ Die Modellergebnisse der hier entwickelten Methode (Kap. 5.1) wurden mit diesem konstanten Wert verglichen und ergaben für einen 1/3-Mix Innerort/Ausserort/Autobahn einen 10% geringeren Wert (0,9 gegenüber 1,0 mg/kJ)

sehr unterschiedliche Bremsemissionen verursachen. Damit können Abriebemissionsfaktoren für unterschiedliche Testzyklen und Fahrzeugkonfigurationen nicht direkt miteinander verglichen werden.

(Liu, 2022) bestimmte die wesentlichsten Parameter für den Bremsabrieb durch Messungen in WLTP Brake-Zyklus sowie durch Simulation und Literaturrecherche. Dabei zeigte sich die Bremsenergie je Bremsvorgang als der wichtigste Einflussparameter gefolgt von der Geschwindigkeit beim Start des Bremsvorganges und der Bremsscheibentemperatur am Ende des Bremsvorganges. In (Zhengyu, 2022) wird eine ebenfalls deutliche Korrelation zwischen den Abriebemissionen und der in den Bremsen abgebauten kinetischen Energie aufgezeigt. In (Hesse, 2020) wird anhand von Bremsen-Prüfstandmessungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Bremsdrücken gezeigt, dass der gesamte Abrieb je Bremsereignis mit der aufgetragenen Reibenergie korreliert (Abbildung 3-3).

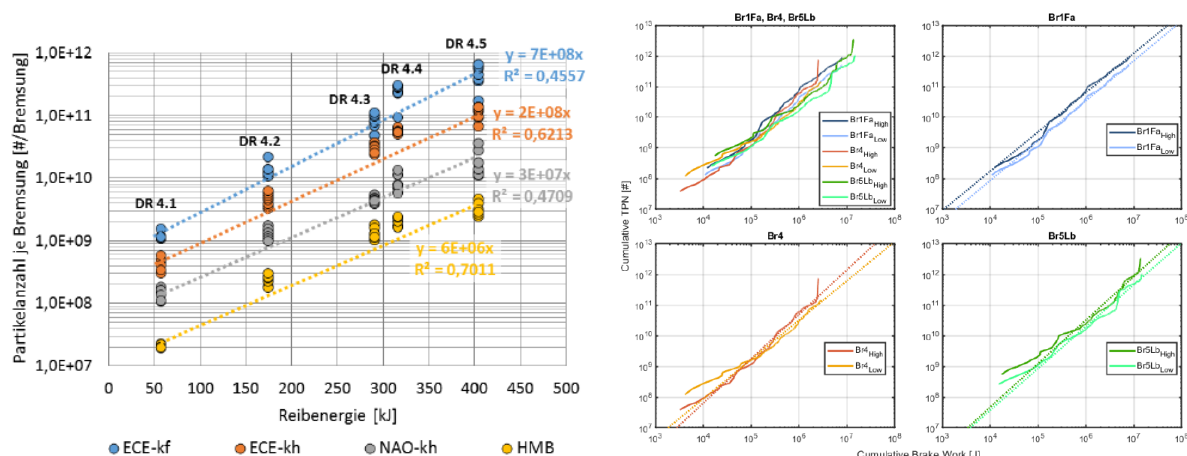


Abbildung 3-3: Partikelanzahl je Bremsung über Reibenergie bei verschiedenen Bremsdrücken und Geschwindigkeiten sowie 4 unterschiedlichen Bremsbelagstypen. Quelle linkes Bild (Hesse, 2020), Quelle rechtes Bild (Mathissen, 2022)

Diesen Zusammenhang nutzt auch das Modell, das wir in dem EU-Projekt uCARE entwickelt haben (Ligterink, 2022). Dieser Ansatz wurde hier weiter entwickelt und mit aktuellen Messdaten erweitert und kalibriert (siehe Kap. 5.1).

Abbildung 3-4 gibt einen Überblick zu den in der Literatur gefundenen Emissionsfaktoren zu Bremsenabrieb von PKW. Im Mittel ergeben sich 16,7 mg PM₁₀/km bzw. 7,3 mg PM_{2.5}/km für ECE Bremsbeläge mit Stahlscheiben, wie sie in der EU typisch sind. Tabelle 3-1 zeigt die mittleren Emissionswerte aus den Literaturstellen nach Bremstypen. Wie schon zuvor beschrieben, haben NAO Beläge, zumindest bei gemäßigten Bremsleistungen, sowie Hartmetallscheiben und Trommelbremsen geringere Abriebemissionen. Da die Messdaten je Bremstyp teilweise aus verschiedenen Tests mit verschiedenen Kfz stammen, sind die Niveauunterschiede der Typen in Tabelle 3-1 nicht unbedingt repräsentativ.

Tabelle 3-1: Mittlere Emissionsfaktoren für PKW aus der Literaturrecherche nach Bremstypen

	PM	PM10	PM2.5	PN
	[mg/Kfz-km]			[#/Kfz-km]
PKW ECE Beläge	51.1	16.7	7.3	9.27E+10
PKW NAO Beläge	125.3	3.8	1.6	6.92E+09
PKW Hartmetallscheibe	n.v.	5.6	n.v.	2.54E+09
PKW Trommelbremse	n.v.	1.4	0.5	2.64E+09

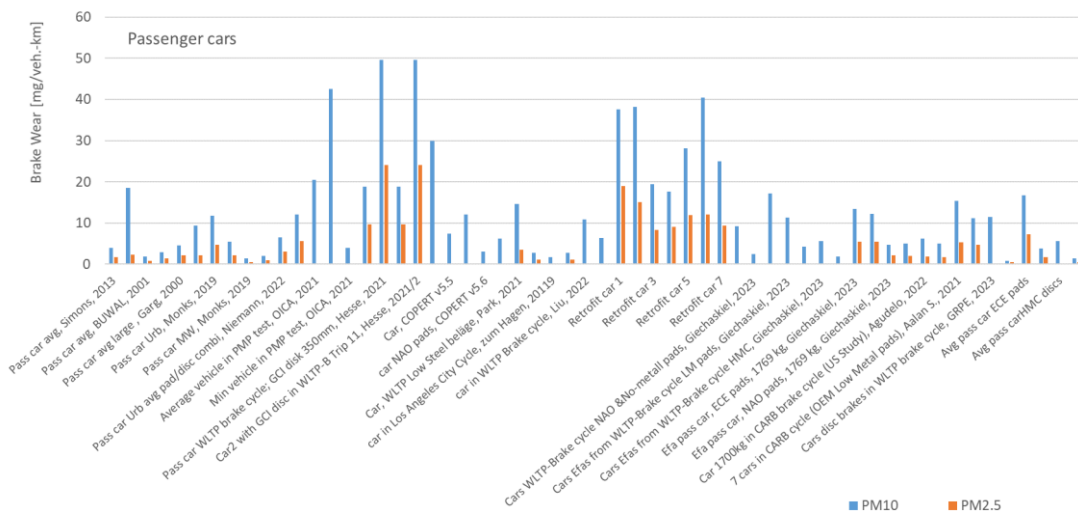


Abbildung 3-4: Literaturdaten zu Bremsabriebemissionsfaktoren für PKW

Für schwere Nutzfahrzeuge wurden 20 Literaturstellen mit Emissionsfaktoren gefunden, die zwischen 7.4 mg PM₁₀ mit Trommelbremsen in USA bis 130 mg PM₁₀/km für ein Müllfahrzeug liegen (Abbildung 3-5).

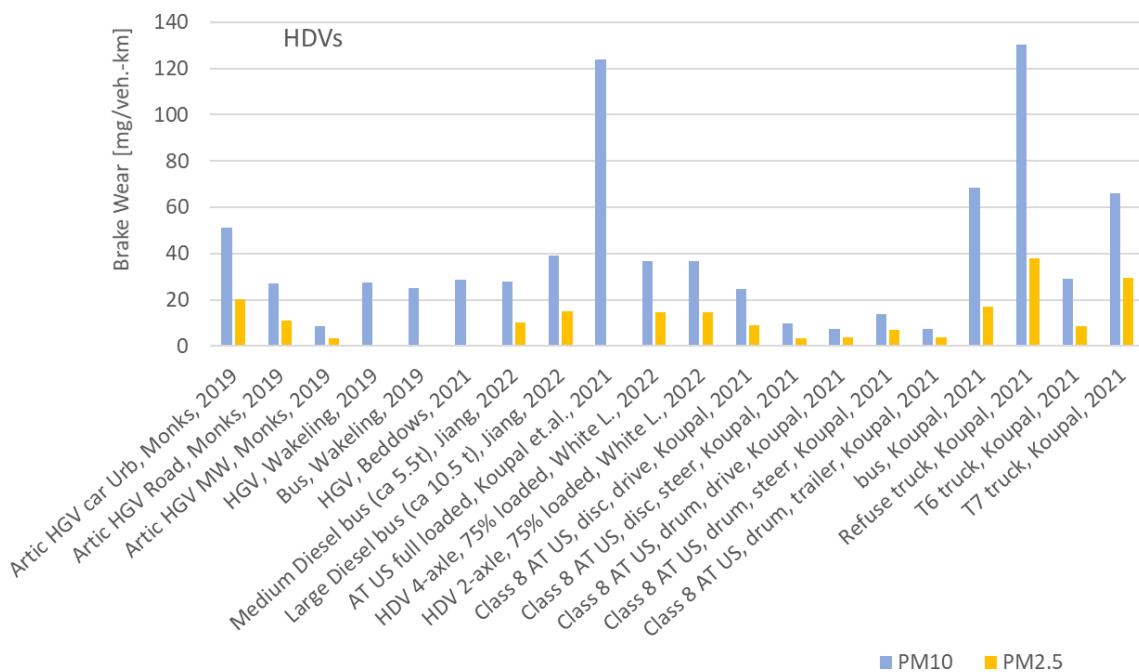


Abbildung 3-5: Literaturdaten zu PM Bremsabriebemissionsfaktoren für schwere Nutzfahrzeuge

Zu PN Brems-Emissionen von PKW gibt es relativ umfangreiche Publikationen. Für die in der EU üblichen ECE Bremsbeläge ergeben sich aus dem Mittelwert der Literaturdaten 9,3E+10 PN/Kfz-km (Abbildung 3-6). Für elektrifizierte Antriebe ergeben sich im Mittel der Daten etwa 95% niedrigere Bremsemissionen.

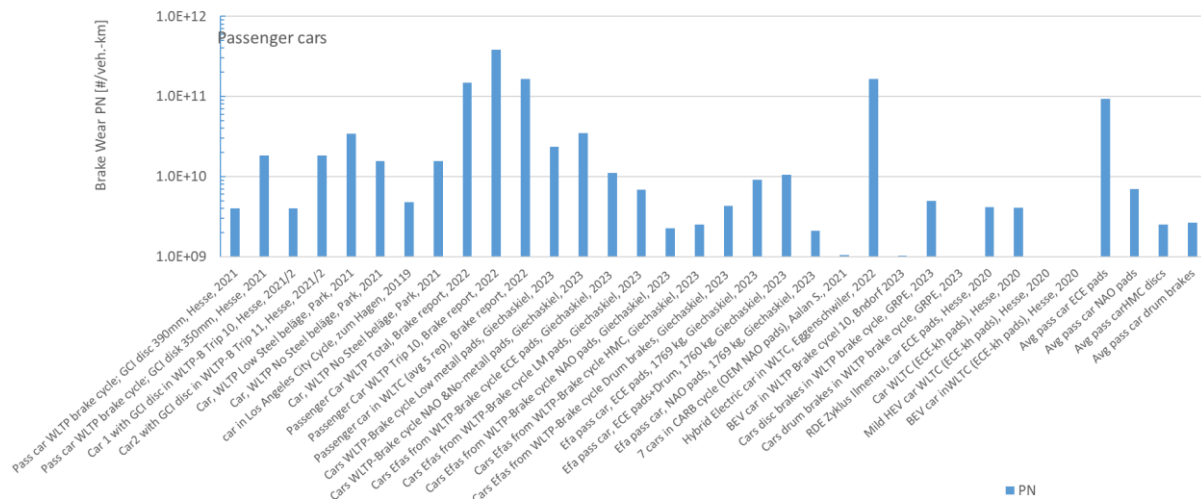


Abbildung 3-6: Literaturdaten zu PN Bremsabriebsmissionsfaktoren für PKW mit ECE Belägen (linker Block), NAO und anderen Belägen sowie Trommelbremsen (rechte Blöcke)

Für SNF und Motorräder wurden keine PN-Emissionsdaten in der Literatur gefunden.

3.2 Reifenabrieb

NEP aus Reifenabrieb (TWP) sind hier alle Partikel, die aus Abrieb von Reifen entstehen.

Partikel aus Straßenabrieb werden separat betrachtet².

3.2.1 Grundlagen

Reifenverschleißmissionen entstehen durch den Abrieb der Lauffläche aufgrund des Kontakts mit der Straßenoberfläche. Folglich bestehen die Partikel, die sich aus der Wechselwirkung zwischen Reifen und Straßenbelag bilden, aus einer komplexen Mischung aus Laufflächengummi und verkrusteten Mineralpartikeln aus dem Straßenbelag (OECD, 2020). Die Reifenabriebpartikel setzen sich aus Weichmachern und Ölen, Polymeren, Ruß und Mineralien sowie elementaren Bestandteilen (hauptsächlich Zink und Schwefel) zusammen (OECD, 2020). Ca. 50% des Reifenabriebs besteht aus Gummi (Rausch, 2020), (Baensch-Baltruschat, 2020), (Steiner, 2021). Eine sehr detaillierte Übersicht zu den Bestandteilen des Reifenabriebs in der Umgebung ist in (Hölting, 2022) zu finden. In (Emission Analytics, 2022) wurde Reifenabrieb mit Gaschromatographen analysiert und dabei ein signifikanter Anteil an Aromaten aus insgesamt über 410 organischen Inhaltsstoffen pro Reifen detektiert.

Nur ein kleiner Massenanteil des gesamten Reifenverschleißes ist PM_{10} , der massengewichtet meiste Abrieb hat Durchmesser über $10 \mu m$. (OECD, 2020) gibt in einer Literaturübersicht an, dass nur 1% des Verschleißes PM_{10} ist, während (Hüglin, 2021) ca. 17% (Messstation Bern Bollwerk) bis 21% (Messstation Zürich-Kaserne) von PM als PM_{10} gemessen hat. Bei den Messungen in (Hüglin, 2021) wurden Partikel bezüglich der Masse von Reifen-Gummi

² Im realen Betrieb enthalten die Reifenabriebpartikel meist auch Komponenten aus Straßenabrieb und sonstigem Staub. Da wir in Zukunft mehr Messdaten von Reifenprüfständen erwarten, also ohne Anteile von Straße und Staub, und vermutlich auch die Anteile von Straßenabrieb nach Oberflächenbeschaffenheit sehr variieren können, erscheint uns eine klare Trennung sinnvoll.

analysiert, die auf den Probenahmefiltern an der Bordsteinkante ankamen. Der höhere Anteil von PM₁₀ in (Hüglin, 2021) als für den gesamten Abrieb typischerweise angegeben ist, deutet darauf hin, dass ein hoher Massenanteil des Reifenabriebs aufgrund seiner Größe nicht luftgetragen ist. (Beji, 2021) findet eine bimodale Verteilung der Reifen-/Straßenabrieb PN Emissionen mit einer ausgeprägten Spitze bei 40nm und einer weiteren bei 200nm. In (Beji, 2020) wurde die Probe hinter dem Reifen abgesaugt. Wegen der starken Turbulenzen durch das drehende Rad und das bewegte Kfz, kann die Absaugung jedenfalls nicht bei allen Fahrbedingungen isokinetisch sein, was zu unterschiedlichen Partikelverlusten nach Größenklassen führen kann. Wird die Probe nur durch den geringen Massenstrom der Pumpe des Messgerätes gezogen, dürfte dieser Effekt deutlich größer sein, als wenn ein hoher Massenstrom abgesaugt wird wie z.B. in (Tonegawa, 2021).

Im Mittel liegen die Literaturdaten für das PM₁₀/TPM Verhältnis bei etwa 7%, wenn man unplausible Werte über 30% aussortiert. Für das Verhältnis PM_{2.5}/PM₁₀ ergeben sich ca. 53%, allerdings scheinen sich mehrere Literaturstellen auf dieselbe Quelle mit 70% Anteil zu beziehen, zählt man diese Literaturstellen nur als einen Wert, ergibt sich im Mittel ein Anteil von 48% PM_{2.5} an PM₁₀³. Die Abbildung 3-7 als „TUG LDVs & HDVs“ gekennzeichneten Balken zeigen die in dieser Studie im Mittel gemessenen Werte.

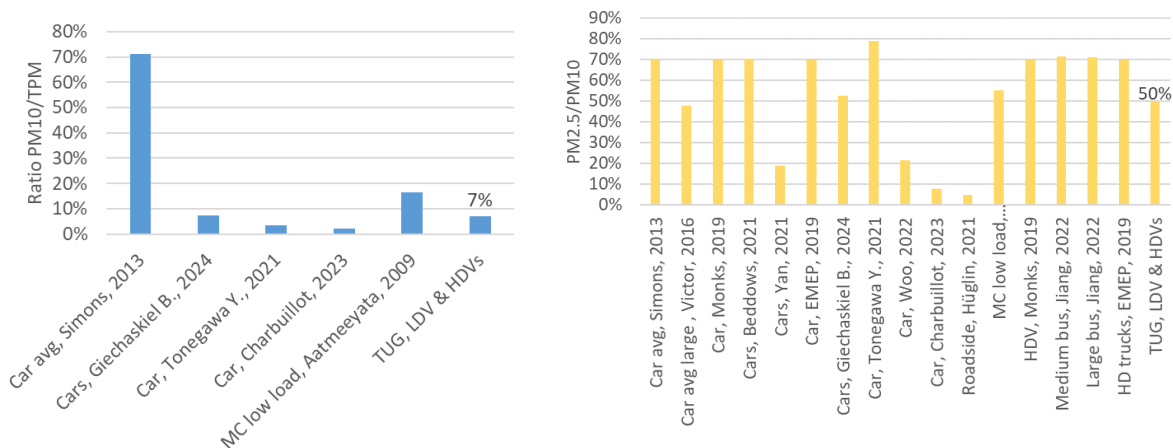


Abbildung 3-7: Verhältnisse PM₁₀ zu Gesamtabriebmasse (links) sowie PM_{2.5} zu PM₁₀ (rechts)

Mit den Verhältnissen zum gesamten Abrieb (TPM) aus Abbildung 3-7 können ermittelte PM₁₀ und PM_{2.5} Emissionsfaktoren auf Plausibilität überprüft werden, da der Gesamtverschleiß aus den Mindestprofiltiefen, der Profiltiefe von neuen Reifen, der Reifenbreite und der Dichte vom Abrieb (ca. 940 kg/m²) einigermaßen sicher schätzbar ist:

- Für einen PKW Reifen 215/60 R16 aus Umfang x Breite x Änderung Profiltiefe x Profilmfaktor x Dichte (2 x 0.2 x 0.005 x 0.8 x 940) etwa 1.5 kg Abrieb. Mit einer Haltbarkeit von ca. 50 000⁴ km sind das 30mg/km je Reifen bzw. 120 mg/Kfz-km

³ Für das Masseverhältnis wurden jeweils die mittleren Massen für PM₁₀ und PM_{2.5} aus den Literaturquellen berechnet, welche beide Werte angeben und aus den mittleren Massen dann das Verhältnis berechnet.

⁴ Der ADAC untersuchte den Verschleiß an 99 gängigen PKW-Reifen. Im Mittel ergab sich eine Haltbarkeit über 47 700 km und ein Reifenabrieb von 69,2 mg/km/Tonne Fahrzeugmasse (<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/reifen/reifentest/>)

- Für einen LKW Reifen 315/80 R22,5 ergeben sich analog ($3.4 \times 0.315 \times 0.005 \times 0.8 \times 940$) etwa 4 kg Abrieb. Mit einer Haltbarkeit von ca. 150 000 und 3 Achsen a 2 Reifen km ergibt das ca. 160 mg/Kfz-km.

Der Abrieb hängt natürlich von der Route und Fahrweise ab (Straßenoberfläche, Kurvigkeit, Höhenprofil, Beladung, etc.).

Der „UTQG (Uniform Tire Quality Grading)“ Wert von Reifen zu „Treadwear“ ist ein Klassifizierungsverfahren des US-Amerikanischen Verkehrsministeriums und gibt die relative Verschleißneigung an. Der Referenzwert ist 100, höhere Werte bedeuten längere Lebensdauer (150 ist 1,5 x Referenzstrecke). Die Tests werden von den Reifenherstellern auf einer Referenz-Teststrecke in den USA durchgeführt. In (Woo, 2022) wurden Reifen mit unterschiedlichen UTQG Werten am Trommelprüfstand vermessen. Tendenziell zeigten Reifen mit höheren Haltbarkeitsindex nach UTQG auch geringere Abriebpartikel, was auf die stabilere Gummimischung zurückgeführt wird. Der UTQG700 Reifen hatte allerdings höhere Partikelemissionen als die UTQG250 und 500 Reifen und höhere PN Emissionen als alle anderen. Dieses Ergebnis deutet doch darauf hin, dass die Bildung ultrafeiner Abriebpartikel anderen Mechanismen als der für den Verschleiß relevante Abrieb größerer Partikel folgt. Im Nanometerbereich werden z.B. Nukleationspartikel z.B. von Schwefel und Zinkanteilen vermutet. Die Verdampfung kann durch lokal höhere Temperaturen durch Reibungsenergie erklärt werden. Das UTQG Testverfahren hat Ähnlichkeit mit dem für EURO 7 vorgesehenen UNR 117 Konvoi Test. Eine solide Einstufung von Reifen bezüglich der Gesundheitsrelevanz ihrer Abriebpartikel scheint dabei nicht sichergestellt zu sein.

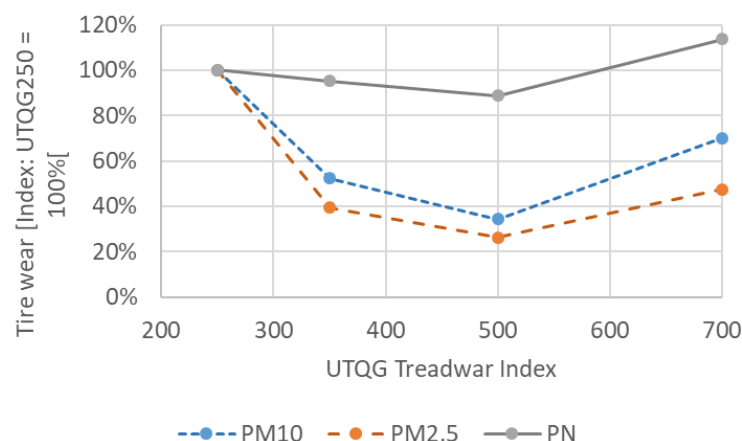


Abbildung 3-8: An 4 verschiedenen Reifen am Trommelprüfstand im WLTC Zyklus gemessene Abriebemissionen aufgetragen über dem UTQG Index der Reifen. Messdaten aus (Woo, 2022)

Grundsätzlich scheint es noch wenig Arbeiten zur Korrelation von Straßen- und Rollentests zum Reifenabrieb zu geben. Problematisch sind dabei die bei Realfahrten unvermeidlich mit-gesammelten Partikel aus Bremsen-, Straßenabrieb und Wiederaufwirbelung sowie aus Abgas, bei Prüfstandtests die möglicherweise abweichenden Randbedingungen bezüglich Oberflächenbeschaffenheit und Temperatur.

Eine Unterscheidung zwischen Reifenabrieb, Straßen- und Bremsenabrieb und aufgewirbelten Partikeln bei Straßenmessungen erfordert eine chemische oder morphologische Analyse der Partikel. Chemische Analysen sind in der Regel nur für größere Partikel möglich, da kleine

Partikel kaum zur beprobten Masse beitragen. Kleine Partikel sind entsprechend für die Masseanteile aber auch nicht relevant. Es gibt daher keine einigermaßen sichere Referenzwerte zu Reifenabriebpartikeln von realen Straßenmessungen.

(Beji, 2021) hat PM und PN in Größenklassen in realen Straßenfahrten hinter dem Fahrzeugvorderrad simultan in Bremsen- und in Reifennähe gemessen. Damit und aus Größenverteilungen wurde auf Anteile Reifen- und Bremsabrieb sowie Summe an NEP, also inklusive Aufwirbelung und Straßenabrieb geschlossen. Die Messungen erfolgten auf unterschiedlichen Straßenbelägen und zeigten eine sehr starke Abhängigkeit der Reifen- und Straßenemissionen von den unterschiedlichen Asphaltqualitäten. Es wurde dabei auch eine signifikante Abhängigkeit von der Beschleunigungs- bzw. Bremsenergie gemessen. Informationen zu Radleistungen, Kurvenradien etc., mit denen ein Vergleich am Prüfstand möglich wäre, sind nicht angegeben.

Bei Messungen auf Reifenprüfständen ist jeweils fraglich, ob die realen Verhältnisse bezüglich Reibung, Schlupf, Temperatur etc. gut abgebildet werden. Trommelprüfstände können zwar eine ähnliche Oberflächenrauigkeit wie Straßenbeläge haben, es ergeben sich aber tendenziell höhere Oberflächentemperaturen, da ja ständig wiederholt dieselbe Trommeloberfläche Leistung übertragen muss. In einem solchen Set-Up muss bei Messungen aus derzeitiger Sicht entweder gut gekühlt oder nur kurz gemessen werden. Oberflächen aus Stahl erzeugen keine störenden Abriebpartikel, haben aber andere Temperatureigenschaften als Asphalt. Die Oberflächenstruktur ist bei Stahlrollen von konventionellen Fahrzeug-Rollenprüfständen typischerweise nicht auf die Oberflächenrauigkeit von Straßenbelägen abgestimmt, da diese Prüfstände bislang nur für die Abgasmessung ausgelegt wurden.

Messungen an großen Innentrommelprüfständen erlauben eine Beschichtung mit Asphalt und haben geringere thermische Probleme, dafür wird Abrieb von Asphalt mitgemessen (Schläfle, 2023).

In (Yan, 2021) wurde der Reifenabrieb auf einem Prüfstand mit Drehscheibe unter dem Testreifen gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass mit einer Erhöhung des Silica-Gehalts im Laufflächengummi die emittierte Menge an feinen Reifenabriebpartikeln zu-, die emittierte Menge an groben Reifenabriebpartikeln (über 1mm Durchmesser) aber abnahm. Mit zunehmender Belastung und Geschwindigkeit nahmen die groben Reifenabriebpartikel-Mengen zu während die Feinpartikel zunächst zu und dann abnahmen. (Yan, 2021) führt dies auf die Bildung einer Schmierschicht auf der Reifenoberfläche zurück. Der Effekt könnte auf die o.a. höhere Oberflächentemperatur zurückzuführen sein.

Bei Scheibenprüfständen, auf denen die Reifen dann etwa wie am Karussell im Kreis fahren entsteht durch den starken Lenkwinkel ein starker Schlupf in lateraler Richtung, oft werden dafür aber keine oder sehr geringe Längskräfte übertragen. Solche Messergebnisse sind für reales Fahren aus unserer heutiger Sicht nicht direkt repräsentativ (siehe Kap. 5.2.1).

3.2.2 Literaturdaten zu Emissionsfaktoren

Abbildung 3-9 gibt einen Überblick zu den in der Literatur gefundenen Emissionsfaktoren zu Reifenabrieb von PKW und SNF. Ohne die jeweils niedersten und höchsten Werte ergeben sich für PKW im Mittel 5,9 mg PM₁₀/km bzw. 3,5 mg PM_{2.5}/km. Eine Differenzierung nach Straßenkategorien wird im Allgemeinen nicht gegeben. In (Monks, 2019) werden für PKW und LKW im Stadtverkehr etwa 22% höhere PM10 Werte, für Autobahnfahrt etwa 18% niedrigere Werte als im 1/3-Mix angegeben.

Für schwere Nutzfahrzeuge konnten fünf Literaturstellen mit Angaben zu Reifenabrieb Emissionsfaktoren gefunden werden. Die Werte liegen dort für PM₁₀ zwischen 17,4 und 47,1 mg/km.

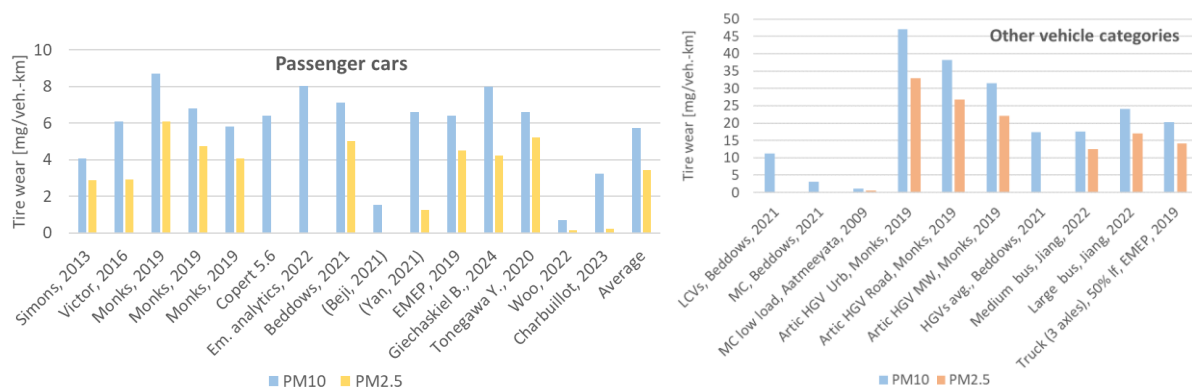


Abbildung 3-9: Literaturdaten zu Reifenabriebemissionen von PKW (linkes Bild) und sonstigen Kfz (rechtes Bild)

4 Prüfstandmessungen

Im Zuge dieses Projekts wurden Prüfstandmessungen an Rollenprüfständen für PKW, LNF, SNF und 2-Räder durchgeführt. Ziel der Messungen war es zu prüfen, ob sich Reifen von SNF und 2-Rädern bezüglich der Abriebpartikel ähnlich verhalten wie PKW-Reifen. Bislang waren als Basis für die Abriebsimulation nur Messdaten an PKW-Reifen verfügbar. Für die Vergleiche wurden Messungen an zwei PKW, einem SNF und einem Motorrad durchgeführt.

Tabelle 4-1 und

Tabelle 4-2 zeigen eine Übersicht der getesteten Reifen.

Tabelle 4-1: Übersicht der getesteten Nutzfahrzeugreifen

ID	Reifenmarken und Modell	Dimension	Reifentyp	UTQG*
127	Goodyear KMAX D	305/70R22.5	Winterreifen	n.v.**
206	Continental VanContact Winter	205/65R16C	Winterreifen	n.v.**
	Continental ContiVanContact 100	215/65R16C	Sommerreifen	n.v.**

* UTQG = Uniform Tire Quality Grading (Verschleiß / Traktion / Temperatur)

** n.v. = nicht verfügbar

Tabelle 4-2: Übersicht der getesteten PKW-Reifen

ID	Reifenmarken und Modell	Dimension	Reifentyp	UTQG
389	SAVA Eskimo S3+	205/55R16	Winterreifen	n.v.
	Bridgestone Potenza S001	225/40R18	Sommerreifen	280/A/A
404	Hankook Ventus Prime 3	195/55R16	Sommerreifen	240/A/A

Tabelle 4-3: Der getestete Motorradreifen

ID	Reifenmarke und Modell	Dimension	Reifentyp	UTQG*
1	Continental TKC70 (Hinterrad)	130/80-17	Straßen- & Off-road Reifen	n.v.**

4.1 Messaufbau der Reifenabriebmessungen

Der grundlegende Aufbau zur Messung von Nichtabgasemissionen (siehe Abbildung 4-2 für 2-Räder und Abbildung 4-2 für PKW) auf einem Rollenprüfstand umfasst das jeweilige Testobjekt, eine Partikelabsaugvorrichtung, ein Partikelentnahmerohr, eine beheizte Leitung, ein Partikelverdünnungssystem, drei Kondensationspartikelzähler mit cut-off Punkten bei 23, 10 und 4nm, ein Partikelfiltergehäuse mit Partikelfilter zur Massemessung, ein Diaphragma-Gas-Meter, ein Radialgebläse und einen Heißfilmluftmassensensor. Die Ausführung der Partikelabsaugvorrichtung kann je nach Art der Nichtabgasemissionen (Brems- oder Reifenemissionen) sowie den Anforderungen des Fahrzeugs variieren. So wird zur Erfassung der Bremsmissionen eine Bremseinhausung genutzt, während für die Reifenemissionen, welche in diesem Projekt untersucht werden, ein Absaugtrichter und Seitenverkleidungen zum Einsatz kommen.

Die emittierten Partikel werden durch den Trichter aufgefangen und in das Partikelentnahmerohr gezogen. Die erste Partikelentnahmestelle bildet das Partikelanzahlmesssystem. Über eine beheizte Leitung gelangen die Partikel in die Verdünnungsanlage und werden nach anschließender Abscheidung der volatilen Partikel in die drei Kondensationspartikelzähler weitergeleitet. Die zweite Partikelentnahmestelle bildet das Partikelmassemesssystem, das je nach Testanforderung selektiv ein- oder ausgeschaltet werden kann. Das Diaphragma Gas-Meter enthält eine integrierte Pumpe, welche die Partikel aus dem Probeentnahmerohr über den Partikelfilter ansaugt. Anhand des gemessenen Volumenstroms und der Messdauer kann die tatsächliche Luftmenge über den Filter berechnet werden. Das Radialgebläse bildet durch den erzeugten Unterdruck an der Partikelabsaugvorrichtung die treibende Kraft der Partikelbewegung. Der Heißfilmluftmassensensor zeichnet die Luftmassenstrom während des gesamten Prüfzyklus auf. Aus dem über den Filter geleiteten Volumenstrom und dem gesamten abgesaugten Volumenstrom wird für die Auswertung der Massemissionen der Verdünnungsfaktor berechnet. Das Verdünnungs- und Trocknungssystem für die PN-Messung misst die Verdünnung im System aus integrierten Massenstromreglern.

* UTQG = Uniform Tire Quality Grading (Verschleiß / Traktion / Temperatur)

** n.v. = nicht verfügbar

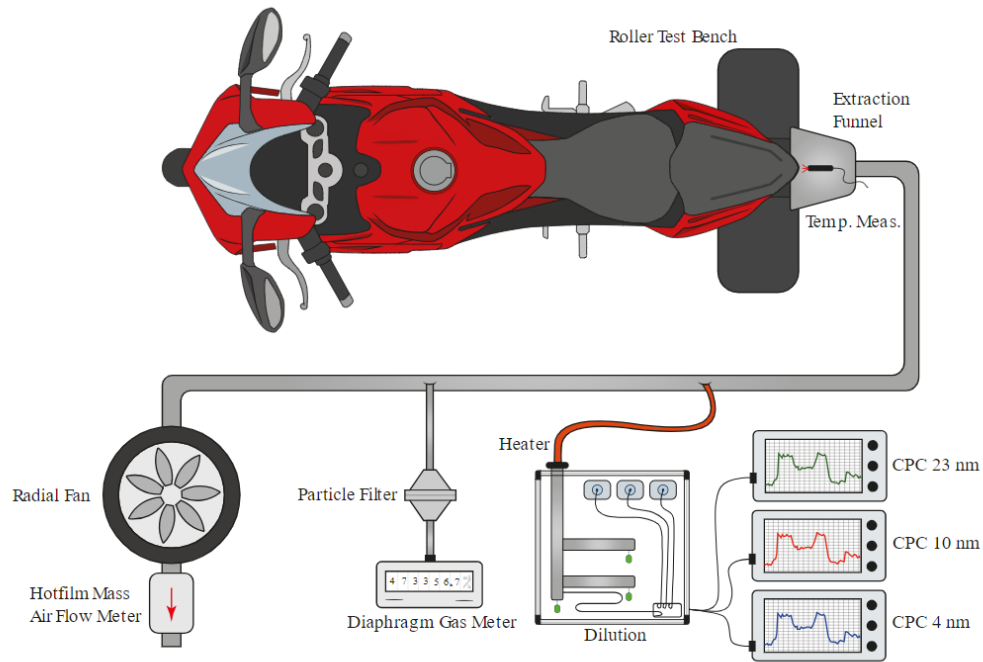


Abbildung 4-1: Schematischer allgemeiner Messaufbau von Reifenemissionsmessungen (hier dargestellt mit Motorrad als Testobjekt)

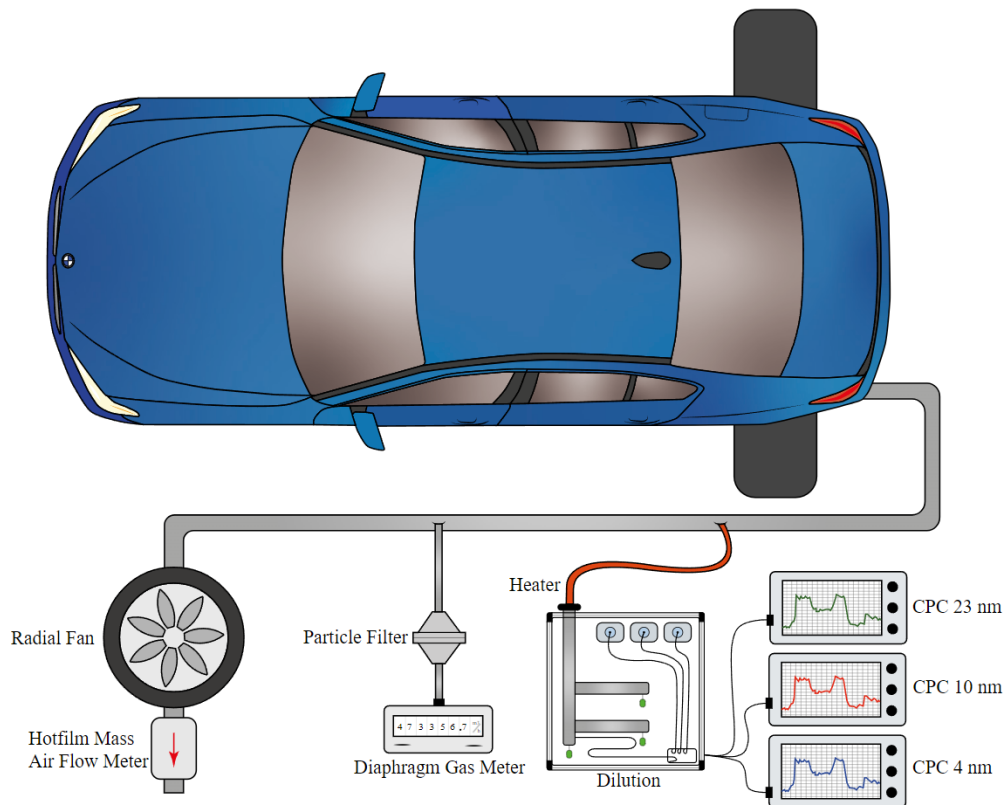


Abbildung 4-2: Schematischer allgemeiner Messaufbau von Reifenemissionsmessungen (hier dargestellt mit PKW als Testobjekt)

Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge wurden auf dem iTnA PKW-Rollenprüfstand getestet. Aufgrund der Größe und der spezifischen Anforderungen bei schweren Nutzfahr-

zeugen erfolgten die Tests dieser Fahrzeuge auf dem ITnA LKW- Rollenprüfstand. Eine Herausforderung dabei stellte der Rollentyp dar: Während der Prüfstand für PKW standardmäßig eine Scheitelrolle nutzt, ist der für SNF mit einer Zwillingssrolle ausgestattet. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit den Tests auf dem PKW-Rollenprüfstand wurde das Fahrzeug auf der gebremsten Rolle mittels Scheitelaufspannung fixiert und die zweite Rolle entkoppelt, siehe Abbildung 4-3.



Abbildung 4-3: Absaugtrichter mit Leitblech (grün hervorgehoben) für Reifenabriebemissionen am LKW-Rollenprüfstand. Der LKW ist auf der angetriebenen Hinterachse auf den Scheitel eines Zwillingssrollenkörpers aufgespannt

Zur Standardisierung wird der Reifen vor jeder Messung fünf Minuten lang eingefahren, um die Messwiederholbarkeit zu erhöhen. Um das Fahrzeug ohne Bremsen anzuhalten, wurde bei Verzögerungen eine simulierte Steigung am Prüfstand aufgeschaltet. Damit wird vermieden, dass Bremsabrieb mit erfasst wird.

4.2 PKW und LNF Messungen

Im Zuge dieses Projekts wurden zwei PKW und ein LNF am PKW Rollenprüfstand auf Reifenemissionen untersucht. Abbildung 4-4 zeigt die Ergebnisse der ersten (ungültigen) Messserie der Reifenemissionspartikelanzahl für das LNF für verschiedene aerodynamische Durchmesser und die zugehörige Fahrzeuggeschwindigkeit für einen WLTC-Abgaszyklus über der Zeit. Auffällig ist, dass keine eindeutigen Abhängigkeiten der Partikelemissionen über der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Radleistung erkennbar sind und der Verlauf der Reifenpartikelanzahl einem Hintergrundrauschen ähnelt. Die weiteren Messungen in dem Aufbau weisen eine ähnliche Charakteristik auf. Aufgrund dessen wurden verschiedene Maßnahmen, wie diverse Anpassungen an der Messkonfiguration, das Wechseln der Bereifung von Winter- auf Sommerreifen und letztlich das Abschalten des Fahrtwindes während eines Prüflaufes getroffen. Die Begründung für den Wechsel des Reifens liegt in der Reifencharakteristik. Der weichere Winterreifen neigt während des Prüflaufes bei 20°C Raumtemperatur zu einem schnellen Überhitzen der Reifenoberfläche und dadurch zur Bildung größerer Partikel, die für die Erfassung als PM₁₀ zu groß sind und somit messtechnisch in diesem Messaufbau nicht erfasst werden. Bei hohen Oberflächentemperaturen entsteht auch eine klebrige Oberfläche, die vermutlich die PN-Emissionen stark reduziert.

Variationen im Messaufbau zeigten, dass durch den Luftstrom des Fahrtwindgebläses, welches vor dem Kfz angebracht ist, der Reifenabrieb turbulent verteilt wird und so nur in geringem Umfang abgesaugt werden kann.

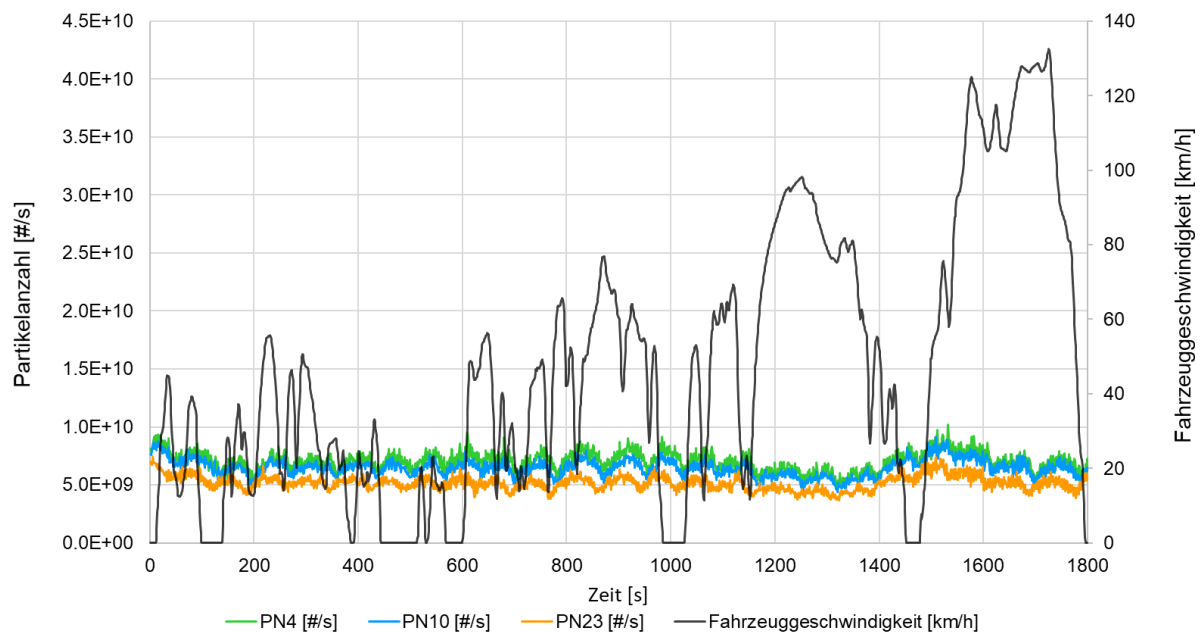


Abbildung 4-4: Reifenpartikelanzahl und Fahrzeuggeschwindigkeit im WLTC mit eingeschaltetem Fahrtwindgebläse und Winterreifen (ungültige Messung wegen Gebläse)

Das Ausschalten des Fahrtwindgebläses ermöglichte gültige Messserien. Da ohne Fahrtwindgebläse die Motorabwärme nicht abtransportiert werden kann, können jeweils nur Teilzyklen gefahren werden um Überhitzung von Motor und Reifen zu vermeiden.

Abbildung 4-5 zeigt einen Testzyklus, in dem mehrmals auf eine vordefinierte Geschwindigkeit beschleunigt und anschließend bis zum Stillstand nur mit Hilfe der Motorbremse ausgerollt wurde. Ab etwa Sekunde 300 wird die Oberflächentemperatur des Reifens offensichtlich zu hoch und senkt den Abrieb an PN. Aus den Daten wurde eine maximale Referenzenergie je Test definiert, die dem Energieeintrag und somit dem Wärmeeintrag in den Reifen gleichgestellt ist. Teilzyklen wurden so festgelegt, dass die maximale Referenzenergie nicht überschritten wird.

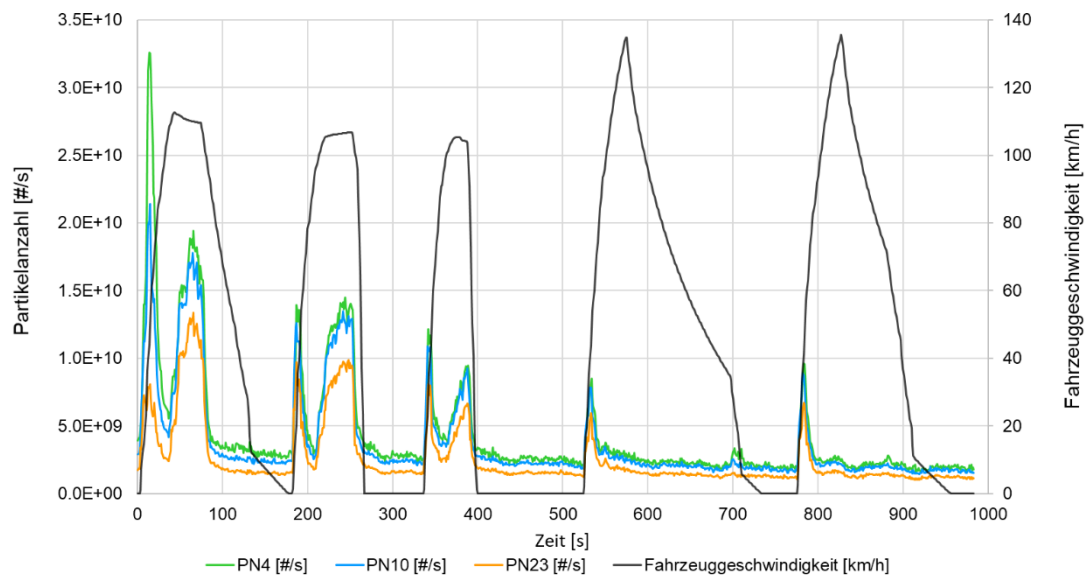


Abbildung 4-5: Reifenpartikelanzahl und Fahrzeuggeschwindigkeit eines LNF Tests mit ausgeschaltetem Fahrtwindgebläse und Sommerreifen (ungültige Testergebnisse ab Sekunde 300 wegen zu heißer Reifenoberfläche)

Die aus den gültigen Messungen gewonnenen Daten und Kennlinien für das Simulationsmodell sind in Abbildung 4-6 dargestellt. Auf der X-Achse ist jeweils die Radleistung mal dem Verhältnis von Längs- zu Aufstandskraft aufgetragen, da das Reifenmodell im letzten Update von einer Abhängigkeit von der Radleistung auf die Schlupfleistung geändert wurde (siehe Kap. 5.2.). Der Schlupf ist bei konstanten Bedingungen über weite Bereiche proportional zum Verhältnis von Längs- zu Aufstandskraft. Der Reifenschlupf wurde bei den Messungen allerdings nicht erfasst, da bei den Messungen die Modelländerung noch nicht absehbar war. Es könnte sein, dass der reale Schlupf mit der über die Testdauer variablen Reifentemperatur ebenso variierte.

Auffällig ist, dass während des Konstant-Geschwindigkeitszyklus (Zyklusnummer 8920) eine hohe Anzahl an Reifenpartikeln bei niedriger proportionaler Reibleistung emittiert wurde. Die höchste proportionale Reibleistung tritt während des Beschleunigungszyklus auf, während der mittlere Leistungsbereich von den Messpunkten des standardisierten Abgaszyklus dominiert wird. Die Unterschiede können mit variablem Schlupfverhalten, mit der unterschiedlichen Reifentemperatur oder auch mit anderen, bislang unbekannten Einflussgrößen zusammenhängen. Bei weiteren Messkampagnen zu Reifenabrieb sollten jedenfalls neben den Kräften auch der Schlupf, also Relativgeschwindigkeit von Radumfang zu Rollenumfang sowie die Oberflächentemperatur aufgezeichnet werden.

Die aus allen Messdaten am LNF Sommerreifen resultierende gemittelten Kennlinien sind in Abbildung 4-6 zusammengefasst. Die mittleren Kennlinien wurden jeweils aus den Mittelwerten je Reibleistungs-kategorie erstellt.

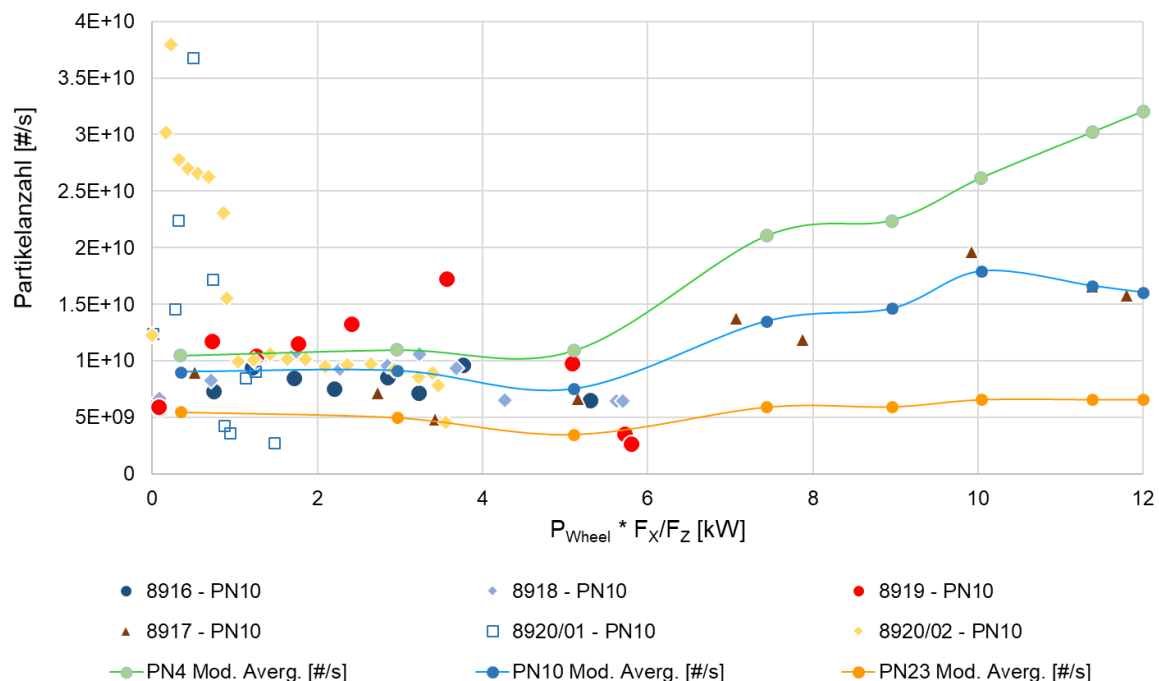


Abbildung 4-6: PN Reifenabriebemissionen gemessen am LNF mit Sommerreifen in gültigen Messungen und mittlere Kennlinien aus allen Messdaten.

Anschließend an das LNF wurde ein PHEV und ein BEV als Versuchsfahrzeug ausgewählt, da wie zuvor erwähnt, Reifenemissionsmessungen am Rollenprüfstand sinnvoller Weise ohne Fahrtwindgebläse durchgeführt werden und BEV und PHEV die in diesem Projekt gefahrenen Zyklen zumeist rein elektrisch fahren können. Die drei vermessenen Reifen am PHEV und BEV zeigten keine Abhängigkeiten der Reifenpartikelemissionen gegenüber der Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. der Radlast. Abbildung 4-7 zeigt den Verlauf der PN- Reifenemissionen in einem WLTC, welcher ohne Betätigung der mechanischen Bremse gefahren worden ist. Das Fahrzeug rollte bei jeder Verzögerung aus, bis es wieder die Sollgeschwindigkeit erreichte. Die PN Messsignale ähneln einem Hintergrundrauschen, was eine Erstellung von Kennlinien für die zwei vermessenen PKW überflüssig macht, da sich nach Abzug des Hintergrundniveaus PN Emissionen im Bereich der Messunsicherheit ergeben.

Offensichtlich streut das Verhalten von PKW Reifen bezüglich Partikelanzahlemissionen deutlich. Unterschiede im Messaufbau gegenüber dem LNF waren nicht vorhanden.

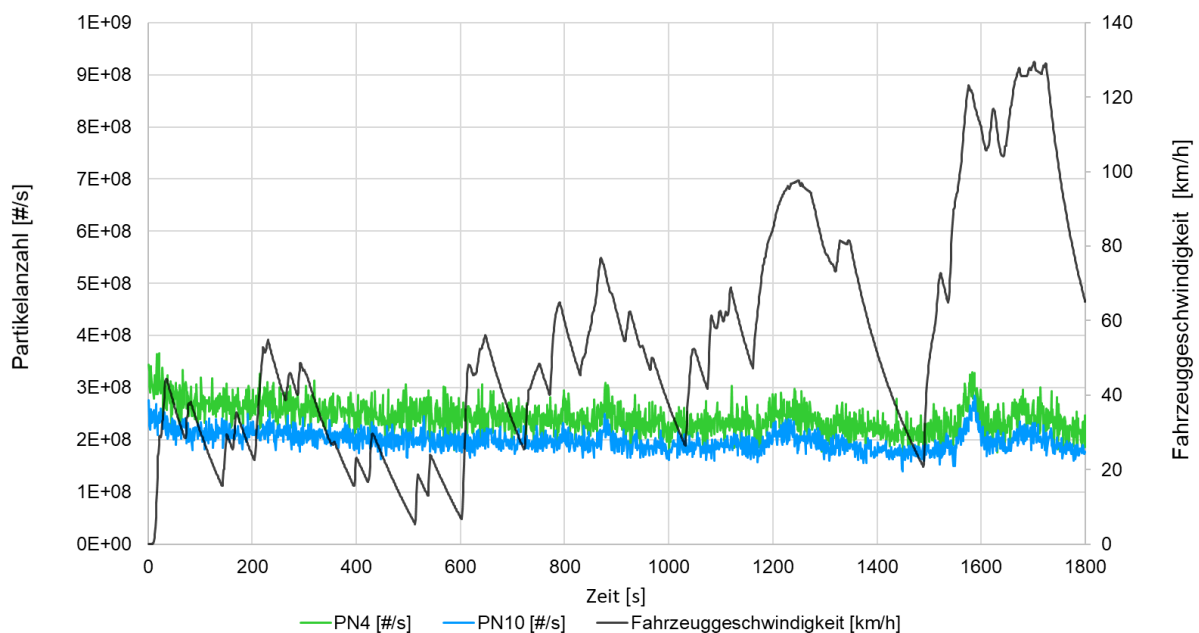


Abbildung 4-7: Reifenpartikelanzahl und Fahrzeuggeschwindigkeit gemessen mit dem BEV im WLTC ohne mechanisches Bremsen und ohne Fahrtwindgebläse

4.3 LKW Messung

Bei dem SNF Versuchsfahrzeug handelte es sich um einen MAN Verteiler-LKW. Technische Daten sind Tabelle 4-4 zu entnehmen. Der Messaufbau für die Reifenabriebmessungen ist in Abbildung 4-8 dargestellt. In diesem Kapitel werden ausgewählte Zyklen und Messergebnisse genauer beschrieben. Informationen über die Messmatrix dieses Testfahrzeugs sind Kapitel 9 Annex II zu entnehmen.

Tabelle 4-4: Technische Daten sowie Reifendaten Fahrzeug 127; MAN TGM 15.250

Technische Daten SNF 127; MAN TGM 15.250	
Marke	MAN
Type	TGM 15.250
Nennleistung [kW]	184
WHTC Arbeit [kWh]	20.24
Referenzdrehmoment [Nm]	1169
Emissionsstufe	Euro VI-D
Laufleistung [km]	21 000
Fahrzeugkategorie	N3<16t
Getriebe	MT
Leermasse [kg]	7280

höchstzulässige Gesamtmasse [kg]	15000
Reifenmarken und -modell	Goodyear KMAX D
Reifendimension	305/70R22.5
Reifentyp	Winterreifen
UTQG	<u>n.v.</u>

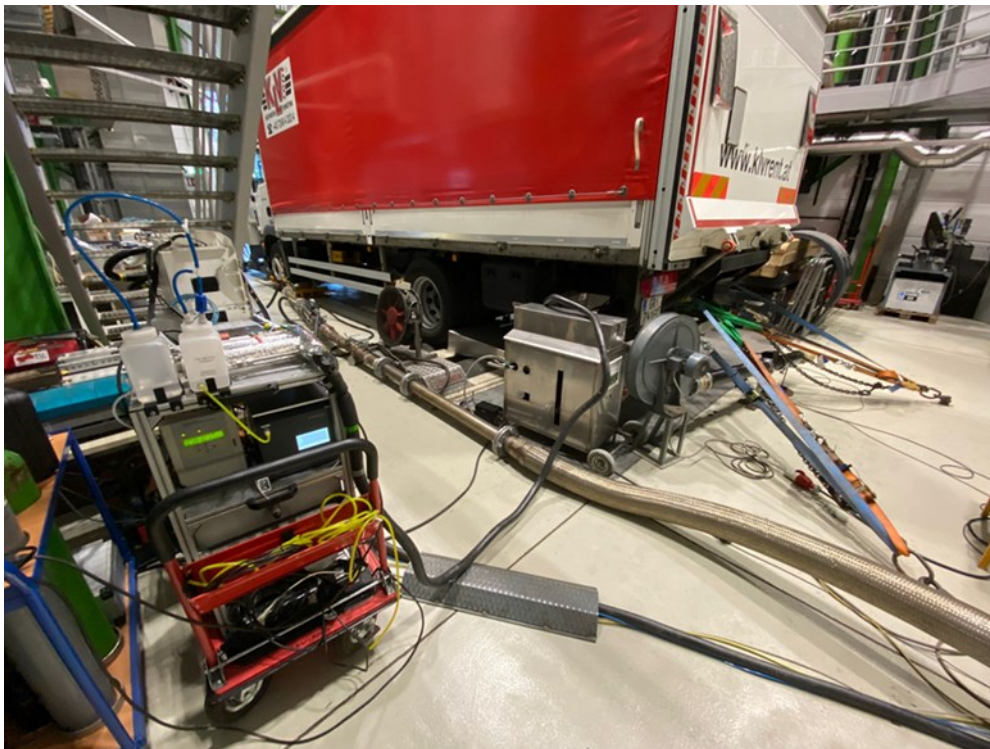


Abbildung 4-8: Messaufbau Reifenabriebmessungen MAN TGM 15.250

Abbildung 4-9 zeigt die Messergebnisse des Zyklus 2886 (WHVC kalt und dann warm gestartet). Die Reifenpartikelanzahlemissionen fallen im Vergleich zu den Reifenemissionen des Transporters gering aus, sind aber höher als die nahezu nicht vorhandenen Emissionen der zwei getesteten PKW Reifen. Die Filterbeladung nach dem Zyklus (siehe Abbildung 4-10) weist größere Partikel auf, die als kleine schwarze Punkte in der Mitte des Filters sichtbar sind. Im Absaugtrichter sind ebenfalls Ablagerungen größerer Partikel (siehe Abbildung 4-11) zu erkennen, insbesondere im rechten unteren Eck des Trichters. Angesichts der eher rauen Rollenoberfläche liegt die Vermutung nahe, dass diese die Entstehung größerer Reifenpartikel begünstigt, die außerhalb des Messbereiches des Kondensationspartikelzählers liegen. Eine weitere Ursache für die Entstehung größerer Partikel könnte in der Zusammensetzung und den daraus resultierenden Eigenschaften des Reifens liegen.

In kommenden Projekten müsste wie beschrieben auch Schlupf und Oberflächentemperatur mit gemessen werden und nach Möglichkeit auf gleiche Oberflächenrauigkeiten geachtet werden. Hier handelte es sich ja um erste Versuche an LKW-Reifen um festzustellen, ob diese ähnliche Abhängigkeiten zeigen wie die Bandbreite der PKW-Reifenmessdaten. Dabei entstehen erwartungsgemäß Lerneffekte.

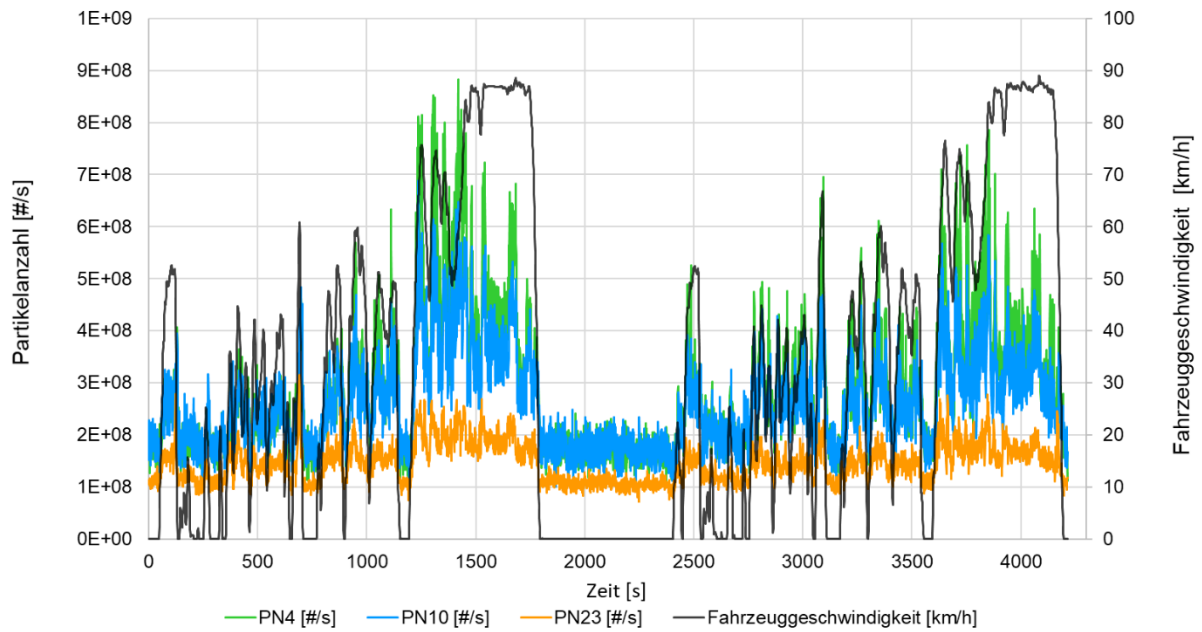


Abbildung 4-9: Reifenpartikelanzahl und Fahrzeuggeschwindigkeit über die Zeit im WHVC kalt und dann warm gestartet ohne Fahrtwindgebläse in der ersten Phase und mit Fahrtwindgebläse in der zweiten Phase.

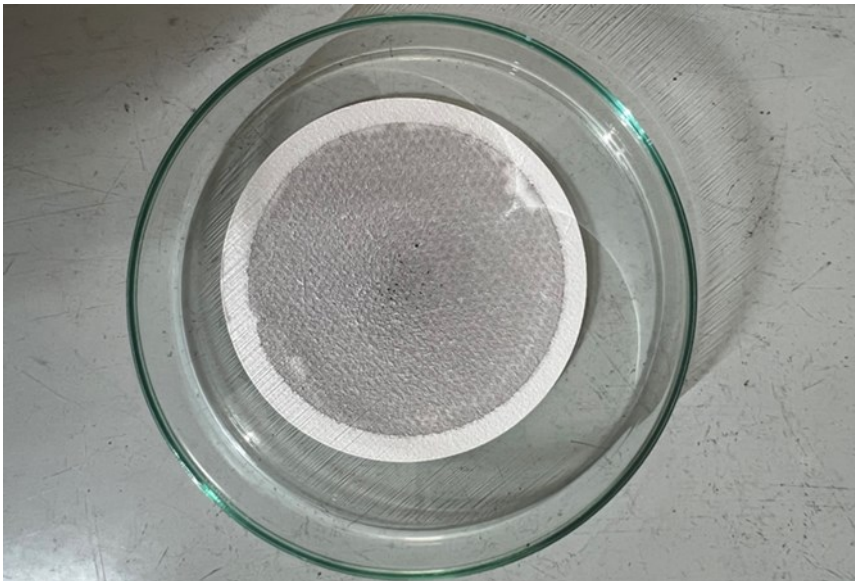


Abbildung 4-10: Filterbeladung aus der Messung im WHVC



Abbildung 4-11: Reifenpartikel im Absaugtrichter des schweren Nutzfahrzeugs

Zyklen mit niedriger Reifenbelastung führen auch bei LKW-Reifen zu Messergebnissen, die einem Messrauschen ähneln. Die gemittelte Schlupfleistung ist im Vergleich zum LNF deutlich höher. Die für die Berechnung der Abszisse (Radleistung $\times F_x/F_z$) notwendige vertikale Reifenkraft wurde mittels einer angenommenen Achslastverteilung von 40% auf der Hinterachse⁵ und dem Testgewicht des Fahrzeugs berechnet. Wie zuvor beschrieben, war die Änderung am Simulationsmodell bei der Messserie noch nicht geplant und daher wurden die für die Schlupfberechnung nötigen Werte nicht aufgezeichnet.

Abbildung 4-12 zeigt die Messergebnisse für die Antriebsreifen des MAN TGM für die verschiedenen Tests. Da der Schlupf über dem Verhältnis von F_x/F_z auf der raueren LKW-Rolle geringer sein dürfte als auf der PKW-Rolle, können auch die Messwerte nur unsicher miteinander verglichen werden, zumindest, wenn man die Schlupfleistung als wesentlichen Parameter für den Abrieb annimmt (siehe Kap. 5.2)

Die Tendenzen und die Abriebemissionswerte des LKW-Reifens liegen im Bereich der (sehr weiten) Streuung von PKW und LNF Messdaten mit verschiedenen Reifenmodellen aus den zuvor beschriebenen Messungen. Um Aussagen zum mittleren Emissionsverhalten von LKW Reifen gegenüber PKW Reifen treffen zu können, müssten mehrere Reifenmodelle unter Beachtung der zuvor erwähnten zusätzlichen Messparameter gemessen werden, da auch zwischen den LKW-Reifen eine erhebliche Streuung im Abriebverhalten vermutet werden kann. Mit den Messdaten erscheint es aber jedenfalls zulässig, das Reifenmodell für LKW auch mit dem durchschnittlichen Abriebverhalten aller C1 und C3 Messdaten zu verwenden.

⁵ Die Achslastverteilung bei schweren Nutzfahrzeugen ist unter anderem von dem Beladungszustand und dessen Anordnung im Anhänger des Fahrzeugs abhängig. Bei höherer Beladung verschiebt sich die Hauptlast auf die Hinterachse. Da das Versuchsobjekt während des Prüflaufs leer war, liegt die Hauptbelastung auf der Vorderachse.

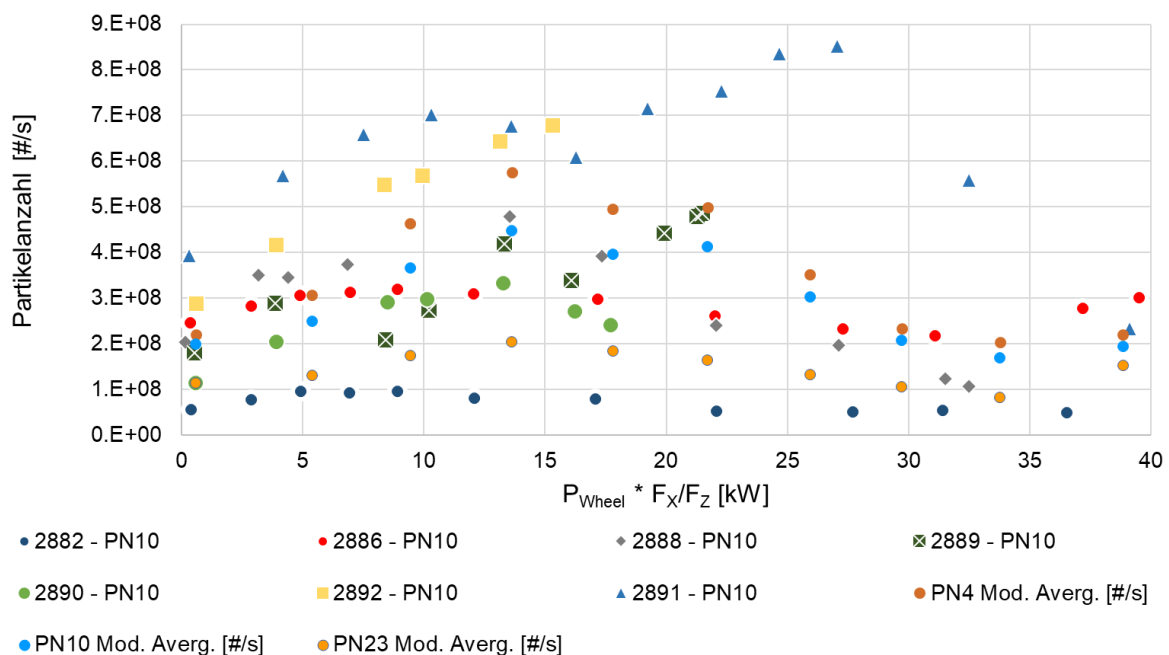


Abbildung 4-12: Reifenemissionsmesswerte für das SNF, MAN TGM 15.250 alle Zyklen ohne Verkürzung der Testdauern (PN...Mod.Averg. Werte entsprechen den Mittelwerten der modalen Messdaten aus allen Testzyklen, die in der jeweiligen Leistungsklasse ($P_{Wheel} * F_x/F_z$) sind)

4.4 2-Rad Messung

Das Messobjekt war ein Motorrad des Herstellers KTM vom Typ Adventure 390, mit einer Leistung von 32kW (siehe Abbildung 4-13). Das Motorrad ist Baujahr 2023 und hat die Abgasklasse Euro 5. Der Hinterreifen ist vom Typ TKC70 mit der Dimension 130/80-17 vom Hersteller Continental. Der Reifen kann sowohl auf der Straße, als auch im Offroad-Bereich eingesetzt werden. Die technischen Daten können Tabelle 4-5 entnommen werden. In diesem Kapitel werden wieder ausgewählte Zyklen und Messergebnisse beschrieben. Informationen über die Messmatrix dieses Testfahrzeugs sind Kapitel 9 Annex II zu entnehmen.

Tabelle 4-5: Technische Daten sowie Reifendaten Motorrad LTM Adventure 390

Technische Daten KTM Adventure 390	
Marke	KTM
Type	Adventure 390
Nennleistung [kW]	32
Bauart	1 Zylinder 4-Takt
Referenzdrehmoment [Nm]	37
Emissionsstufe	Euro 5
Getriebe	6 Gang
Leermasse [kg]	161
Radstand [mm]	1430

Technische Daten KTM Adventure 390	
Reifenmarken und –modell (Hinterreifen)	Continental TKC70
Hinterrad-Reifendimension	130/80-17
Reifentyp	Straßen-& Offroad Reifen
UTQG	<u>n.v.</u>



Abbildung 4-13: KTM Adventure 390 Euro 5 am TUG 2-Rad Rollenprüfstand mit aufgebautem Absaugtrichter und Kettenspritzschutz

In Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15 ist der Zyklus 10 mit gemessener Reifenoberflächentemperatur, Geschwindigkeit, Zugkraft am Rad und gemessenen PN dargestellt. In Zyklus 10 wurden verschiedene Last- und Geschwindigkeitsniveaus abgefahren um mögliche Probleme aus überhitzter Reifenoberfläche etc. zu erkennen. Ab Sekunde 270 wurde die Zugkraft konstant bei 800 N gehalten und dann die Geschwindigkeit schrittweise erhöht. Die Oberflächentemperatur des Reifens steigt von anfänglich 23°C bis zu einem Höchstwert von 79°C bei

Sekunde 780. Dabei ist zu beobachten, dass von Sekunde 270 bis Sekunde 570 trotz steigender Oberflächentemperatur keine Veränderung bei den emittierten Partikeln zu erkennen ist. Bei Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit (Sekunde 570) von 50 auf 75 km/h ist erstmals ein Anstieg der Partikel zu erkennen. Bei weiterer Erhöhung von 75 auf 90 km/h ist selbiges zu beobachten. Zusätzlich ist zu erkennen, dass PN4 und PN10 etwa gleich groß sind und im Verhältnis zu PN23 stärker ansteigen. Daraus ist zu schließen, dass Großteils kleine Partikel zwischen 10nm und 23nm erzeugt werden. Bei weiterer Steigerung der Fahrgeschwindigkeit von 90 auf 100 km/h steigen insbesondere PN4 und PN10 weiter an.

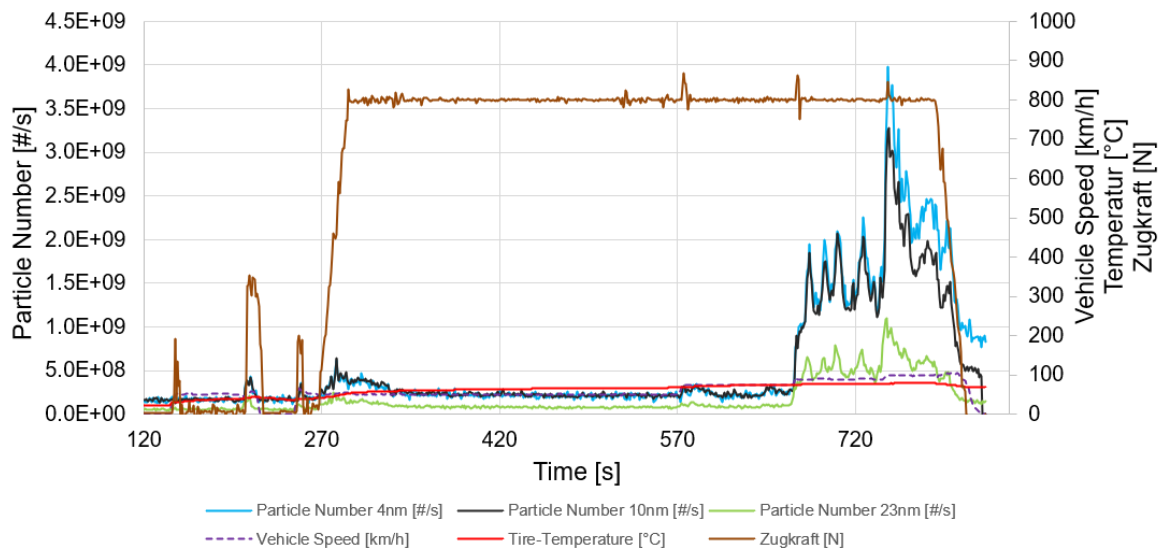


Abbildung 4-14: Zyklus 10 – Temperaturmesskurve mit Zugkraft

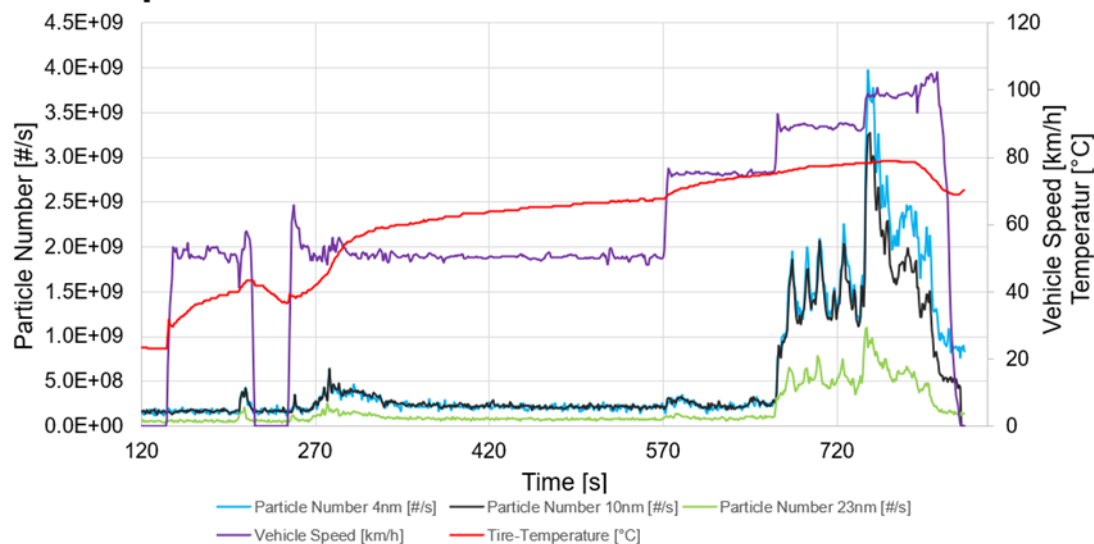


Abbildung 4-15: Zyklus 10 – Temperaturmesskurve

In Abbildung 4-16 sind die Partikelanzahlemissionen PN23, PN10 und PN4 jeweils in [#s] über der Radleistung $\times F_x/F_z$ dargestellt. Die Datenpunkte stellen die Mittelwerte aus allen Messungen je „Radleistung $\times F_x/F_z$ Klasse“ zusammen. Die Partikel nehmen mit steigender Reibleistung zu. Es ist ein größer werdendes Verhältnis von PN4 beziehungsweise PN10 zu PN23 erkennbar. Mit steigender Leistung sinken die PN4 und PN10 wieder, was eventuell auf

die steigende Oberflächentemperatur des Reifens zurückzuführen ist. Wie schon beschrieben, steigt die Reifentemperatur am Rollenprüfstand stärker als auf der Straße, da die selbe Oberfläche bei jeder Umdrehung mit der Energie der Schlupfleistung und des Rollwiderstandes beaufschlagt wird.

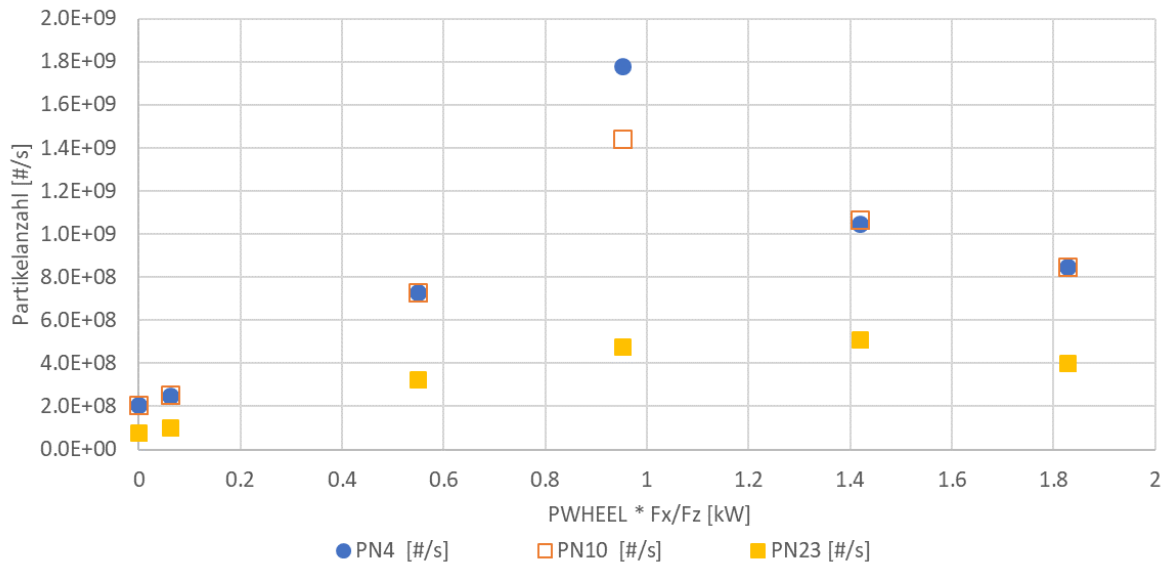


Abbildung 4-16: Partikelanzahl PN23, PN10 und PN4 aus Reifenabrieb über Radleistung x F_x/F_z für den Motorrad-Hinterradreifen

Wie schon beim LKW-Reifentest beschrieben, ist auch hier die Vergleichbarkeit mit den PKW-Ergebnissen nicht exakt gegeben, da Oberfläche und Durchmesser der 2-Radrolle anders sind als die der PKW-Rolle und der Schlupf in dieser Kampagne noch nicht mit gemessen wurde. Es liegen aber auch die Messwerte des 2-Radreifens im Bereich der Streubreite der Messdaten an PKW-Reifen, so dass für die mittleren Reifenkennlinien alle Reifentypen gemittelt wurden.

4.5 Temperatureinfluss auf die Abriebspartikel eines Reifen

Der Temperatureinfluss auf die Reifenabriebspartikel wurde bei den Messungen am 2-Rad genauer untersucht. Dazu wurde der Messaufbau um einen Temperatursensor, der auf einer optischen Messung der Wärmestrahlung⁶ basiert (siehe Abbildung 4-1), erweitert. Der Temperatursensor wurde so platziert, dass die Temperatur in der Mitte der Reifenoberfläche und unmittelbar nach dem Aufstandspunkt des Reifens erfasst wird.

Um den alleinigen Einfluss der Temperatur analysieren zu können, wurden die anderen Einflussgrößen, wie Geschwindigkeit und Radleistung bzw. Schlupfleistung, in einigen Testläufen konstant gehalten. Dafür wurden Fahrzyklen mit konstanten Geschwindigkeiten und Leistungen (siehe Messung 9 und Messung 10 in Tabelle 9-5) ausgewählt. Der sekundliche Verlauf von Geschwindigkeit, Temperatur und der hintergrundkorrigierten Partikelanzahl ist im nachfolgenden Diagramm (siehe Abbildung 4-17) für die Messung Nr. 9 dargestellt. Die Zielge-

⁶ Der Sensor wurde mit Reifengummi bei unterschiedlichen Temperaturen kalibriert.

schwindigkeiten wurden hierbei angefahren, etwa 100 Sekunden konstant gehalten und anschließend erhöht. Um ein Überhitzen des Reifens zu verhindern, wurde nach der dritten Geschwindigkeitserhöhung eine Abkühlphase des Reifens von etwa 250 Sekunden in den Fahrzyklus integriert. Eine analoge Vorgehensweise wurde in der Messung Nr. 10 gewählt (siehe Abbildung 4-15), jedoch wurde hier bewusst die Abkühlphase ausgelassen, um höhere Oberflächentemperaturen zu erreichen.

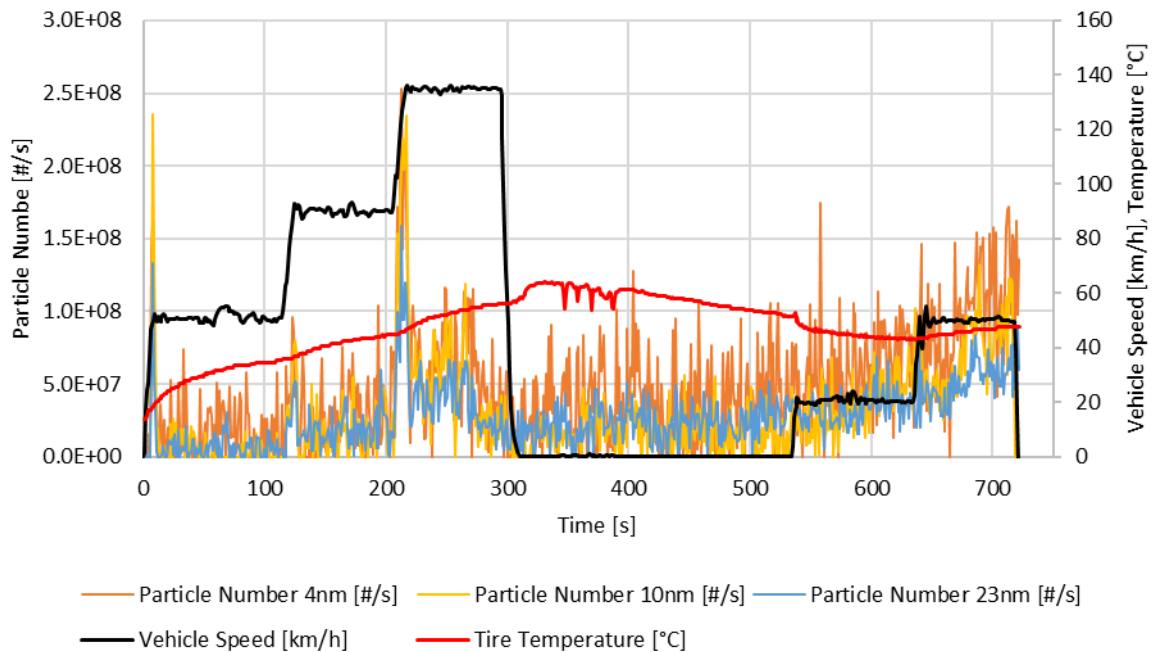


Abbildung 4-17: Messung 9 – Partikelanzahl PN23, PN10 und PN4 aus Reifenabrieb, Fahrzeuggeschwindigkeit und Reifenoberflächentemperatur über die Zeit für den Motorrad-Hinterradreifen

Zur Analyse der temperatureinflüsse wurden die Messdaten zur Partikelanzahl der zugehörigen Geschwindigkeit zugeordnet, mithilfe eines gleitenden Mittelwerts geglättet und in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen (siehe Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19). Aus dem Messzyklen ergeben sich sechs verschiedene Geschwindigkeitsniveaus bei 20, 50, 75, 90, 100 und 130 km/h, wobei die Geschwindigkeit von 50 km/h im Zyklus Nr. 9 gegen Ende des Fahrzyklus erneut gefahren wurde. Das wiederholte Fahren derselben Geschwindigkeit ermöglicht einen Vergleich bei gleicher Antriebsleistung und unterschiedlicher Oberflächenreifentemperatur. Während eines Geschwindigkeitsniveaus zeigt die sekundliche Aufzeichnung der Temperatur, dass die Oberflächentemperatur durch den zunehmenden Energieeintrag in den Reifen kontinuierlich ansteigt. Somit sollte bei der Betrachtung eines Geschwindigkeitsniveaus die Abhängigkeit der Temperatur bei sonst konstanten Bedingungen beobachtbar sein.

Wegen der sehr unterschiedlichen PN-Niveaus in den Geschwindigkeitsstufen wurden die Messdaten in zwei verschiedene Diagramme mit unterschiedlicher Skalierung der Ordinate dargestellt. Abbildung 4-18 zeigt die Abhängigkeiten bei mittlerer Temperatur für niedrigere Partikelanzahl, während Abbildung 4-19 die Abhängigkeiten auch für hohe Partikelanzahl darstellt. Für den mittleren Temperaturbereich ist mit steigender Temperatur ein Anstieg der Partikelemissionen zu erkennen. Dieses Phänomen tritt sowohl bei PN10 als auch bei PN23 auf. Eine mögliche Erklärung für den Anstieg der Reifenpartikel könnte das Verdampfen

flüchtiger Komponenten mit anschließenden Nukleationsprozessen sein. Zu beachten ist, dass die im Kontaktpunkt zur Rolle herrschenden Temperaturen vermutlich wesentlich höher sind als die gemessenen Oberflächentemperaturen. Mit weiterem Anstieg der Reifentemperatur lässt sich eine sinkende Tendenz der Partikelemissionen beobachten. Ursache hierfür ist vermutlich die temperaturbedingte Veränderung der Eigenschaften der Reifenoberfläche. Bei steigender Oberflächentemperatur bildet sich eine klebrige Oberflächenstruktur auf der Lauffläche des Reifens, was zu einer Abnahme feiner und ultrafeiner Partikel im Abrieb führt. Das Resultat in diesem Betriebsbereich ist eine geringere Anzahl an luftgetragenen Partikeln. Dafür traten größere Reifenwülste als Abrieb auf, die mit auch bloßem Auge gut erkennbar waren. Bei weiterem Anstieg der Reifenoberflächentemperatur (siehe Abbildung 4-19, ab circa 75°C) ist ein erneute Zunahme der Partikelanzahlemissionen zu beobachten. Eine mögliche Ursache hierfür könnte das weitere Ausdampfen von Komponenten aus der klebrigen Oberfläche und anschließende Nukleationsprozesse sein. Zusätzlich wurden auch wieder größere, wulstförmige Abriebpartikel beobachtet. Je nach Reifeneigenschaften kann diese Wulstbildung stärker oder geringer ausfallen. Die Ursache für die steigende Reifenoberflächentemperatur ist neben dem stetigen Energieeintrag in den Reifen auch die Rollenoberfläche, die mit zunehmender Zyklusdauer selbst wärmer wird sowie eventuell unterschiedliche Kontaktbedingungen zu Straßenfahrten wegen der Rollenoberfläche. Inwieweit die Abriebmechanismen und damit PN und PM_{2.5} sowie PM₁₀ Abriebemissionen der Straße von Rollenprüfständen ausreichend repräsentativ abgebildet werden bzw. wie der Aufbau am Prüfstand gestaltet werden müsste, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, ist ein noch näher zu erforschendes Thema.

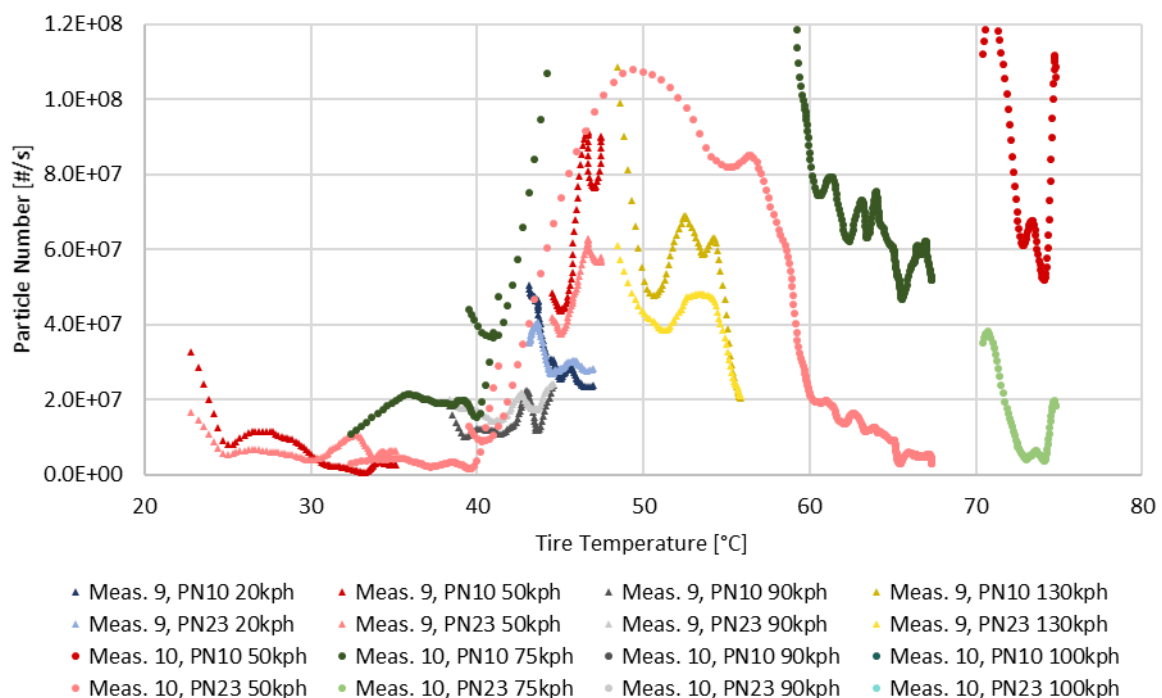


Abbildung 4-18: Partikelanzahl PN23 und PN10 aus Reifenabrieb über die Reifenoberflächentemperatur des Motorrad-Hinterradreifes (y-Achse mit 1.2E+08 limitiert)

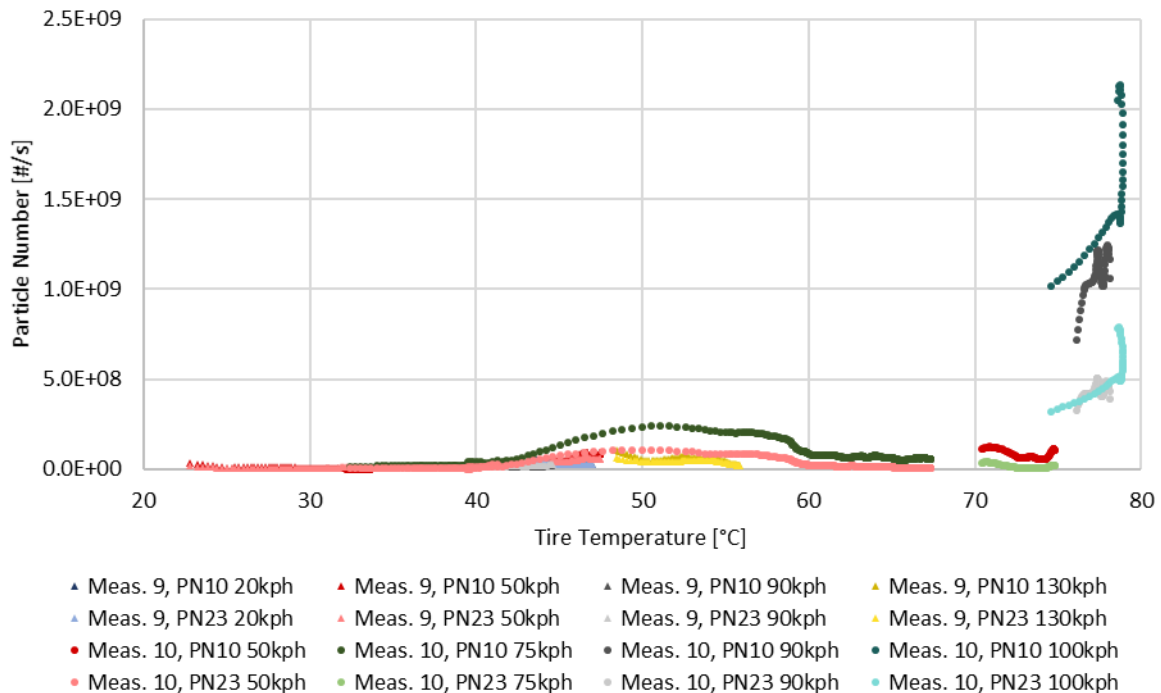


Abbildung 4-19: Partikelanzahl PN23 und PN10 aus Reifenabrieb über die Reifenoberflächen-temperatur des Motorrad-Hinterradreifes (**y-Achse nicht limitiert**)

Der Temperatureinfluss auf Partikelanzahl, Partikelmasse und Partikelgrößenverteilung ist also signifikant. Um zukünftige Messungen insbesondere am Prüfstand repräsentativ zu gestalten sind weitere Messungen und Analysen nötig, die vergleichbare Reifenabrieb- und Temperaturmessungen auf der Straße und am Prüfstand (bzw. an verschiedenen Prüfständen) umfassen sollten.

5 Modellansätze für Non-Exhaust Emissionen

Nachfolgend sind die Modellansätze für Brems- und Reifenabrieb, wie sie mit Stand 29.11.2024 in der Software PHEM (Version 13.9.01) implementiert sind, beschrieben.

Dies stellt die ein Update der Softwareversion von PHEM von 20.12.2023 dar.

Mit allen Einschränkungen infolge eingeschränkter und teilweise stark streuender Messdaten als Basis stellen die nachfolgend beschriebenen Modelle die erste bekannte Methode dar, mit der Abriebemissionen von Bremsen, Reifen, Fahrbahn und durch die Wiederaufwirbelung von Partikeln konsistent auf Basis physikalischer Zusammenhänge für unterschiedlichste Fahrzustände und Fahrzeugkonfigurationen berechnet werden können. Weitere Optimierungen der Berechnungsmethoden und auch eine Erweiterung der zugrundeliegenden Messdatensätze sind in Zukunft möglich und sicher sinnvoll um das durchschnittliche Verhalten der Fahrzeugflotten genauer zu beschreiben. Die Berücksichtigung zusätzlicher erklärender Parameter, wie etwa Bremsscheibentemperatur und Bremsmoment könnten sinnvoll sein, können allerdings erst berücksichtigt werden, wenn die zur Entwicklung und Bedienung nötigen Messdaten verfügbar sind.

5.1 Modell für Bremsabrieb

Die Methode zur Berechnung des Bremsabriebs hat sich gegenüber der PHEM Version von 20.12.2023 nicht geändert, mit den zusätzlichen Messdaten ergab sich allerdings ein Update für die charakteristische Abrieb-Kennlinie. Der Ansatz ist in (Hausberger, 2023) beschrieben und wird hier kurz zusammengefasst, um die Methode in einem Bericht zu dokumentieren.

Als Parameter für die Quantifizierung des Bremsverschleißes in [mg] haben wir die Bremsenergie [Ws] angenommen. Somit werden die Bremsemissionen [mg/s] bzw. [#s] mit der Bremsleistung [W] erklärt. Diese Annahme wird durch verschiedene Literaturdaten gestützt (Kap. 3.1.1). Die Bremsleistung ist dabei gleich der Reibleistung, da sich die Bremsscheibe mit der Raddrehzahl relativ zu den Bremsbelägen bewegt. Da noch wenig Messdaten zur Scheibentemperatur im realen Fahren verfügbar sind, die wir für eine Modellentwicklung nutzen könnten, wird die Scheibentemperatur vorerst im Modell nicht berücksichtigt. Der Einfluss der Scheibentemperatur ist bei normalen Bremsvorgängen gering. NEP-Emissionen bei hohen Bremsleistungen über längere Zeiträume dürften von dem aktuellen Modellansatz damit aber deutlich unterschätzt werden.

Wir berechnen die Bremsleistung mit dem Modell PHEM⁷ aus den Gleichungen der Längsdynamik aus der Summe aller Antriebskräfte am Rad (Massenträgheit, Luft- und Rollwiderstand sowie Steigung und die vom Antriebsstrang bereitgestellte Bremsleistung, Gleichung 1 1). Die Berechnung erfolgt in 1Hz.

$$P_b = (-1) \cdot P_a + P_{Roll} + P_{Luftw} + P_{Stg} + P_e = F_b \cdot r \cdot \omega \quad \text{Gleichung 5-1}$$

Von der berechneten Bremsleistung werden 2/3 den Bremsen der Vorderachse zugeordnet, der Rest gleichmäßig auf die Bremsen der anderen Achsen verteilt.

mit:	P_b	Summe Bremsleistung der mechanischen Bremsen [W], nur relevant wenn positiv
	P_a	Beschleunigungsleistung (negativ bei Verzögerung) [W]
	P_{Roll}	Leistung zur Überwindung des Rollwiderstandes [W]
	P_{Luft}	Leistung zur Überwindung des Luftwiderstandes [W]
	P_{Stg}	Leistung zur Überwindung des Steigungswiderstandes (negativ bei Gefälle) [W]
	P_e	Leistung vom Antrieb (bei Verzögerung die Schleppleistung Motor und Verluste in Achse und Getriebe)
	F_b	Bremskraft [N]
	ω	Drehzahl der Bremsscheibe [s-1]
	r	Radius der Bremsscheibe [m]

⁷ Passenger car and Heavy duty Emission Model der TU Graz. Das Modell wird auch zur Berechnung der Abgas-Emissionsfaktoren im Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) genutzt (www.hbefa.net). PHEM berechnet die Antriebsleistung aus den Gleichungen der Fahrzeuglängsdynamik in 1 Hz Auflösung.

Da die in den Hohlräumen der Beläge gespeicherten Partikel eher bei höheren Geschwindigkeiten freigesetzt werden⁸, haben wir eine Abhängigkeit von der Drehzahl der Scheiben angenommen.

Die Bremsabriebs-PN-Emissionen in [#s] werden aus einer entsprechenden Kennlinie interpoliert, die aus allen verfügbaren Messdaten von Tests am Bremsprüfstand mit für die EU typischen ECE Bremsbelägen gewonnen wird. Dafür werden alle Testdaten eingerastert, in den Rastern jeweils die Mittelwerte gebildet und durch diese ein Polygon aufgespannt (Abbildung 5-1). Die bisherigen Messdaten stammen aus dem Projekt uCARE (Ligterink, 2021) von WLTP-Bremsentests sowie von Messungen in diesem und dem Vorgänger-Projekt und anderen Realzyklen.

Das charakteristische Polygon für PN wurde aus den durchschnittlichen PN-Emissionen pro ($P_b \cdot \omega^z$) - Raster aus allen Testdaten berechnet. Der beste Regressionskoeffizient für eine Anpassungsfunktion wurde für $z=0,5$ gefunden. Daher haben wir ($P_b \cdot \omega^{0.5}$) auf der x-Achse verwendet. Dies unterstützt den Einfluss der Geschwindigkeit der rotierenden Scheibe, ist aber ein geringerer Einfluss als in (Niemann, 2021) berichtet. Die Stützpunkte des Polygons wurden über ($P_b \cdot \omega^{0.5}$) aufgetragen und dann geglättet, um Ausreißer in Abschnitten mit wenigen Messwerten zu entfernen. Abbildung 5-1 zeigt die resultierende Kurve für PN.

Damit können die PN-Bremsabriebemissionen wie folgt berechnet werden:

$$E_{bn} = C_{(P_b \cdot \omega^z)} \quad \text{Gleichung 5-2}$$

$$\omega = \frac{v}{r_w} \quad \text{Gleichung 5-3}$$

$$E_b = E_{bn} \cdot R_f \cdot D_{(\omega)} \quad \text{Gleichung 5-4}$$

mit: E_{bn}Bremsabrieb PN [#s]
 E_bBremsabrieb PM [mg/s]
 $C_{(P_b \cdot \omega^z)}$...Charakteristische Kurve als Polygon (aus Messdaten)
 r_wDynamischer Rad-Radius [m]
 vFahrzeuggeschwindigkeit in [m/s]
 R_f„Release factor“, hier = 1.0, da derzeit kein sicherer Hinweis, dass große Mengen PN und PM10 nicht frei gesetzt werden
 $D_{(\omega)}$PM/PN Verhältnis als Funktion der Scheibendrehzahl (Abbildung 5-4)

Der Anteil an abgeriebenen Bremspartikeln, die in die Umgebungsluft emittiert werden, wird hier vorläufig mit 100% angesetzt. Verlässliche Daten zu Anteilen die auf der Felge und im Radkasten verbleiben sind nicht verfügbar und scheinen aus heutiger Sicht im Vergleich zu anderen Unsicherheiten eher vernachlässigbar zu sein.

⁸ Ein Berechnungsansatz für PHEM, der die Einspeicherung während des Bremsvorganges und Freisetzung von Abriebpartikeln nach öffnen der Bremse als Funktion der Winkelgeschwindigkeit beschreibt ist in Entwicklung und kann ggf. beim nächsten Update genutzt werden.

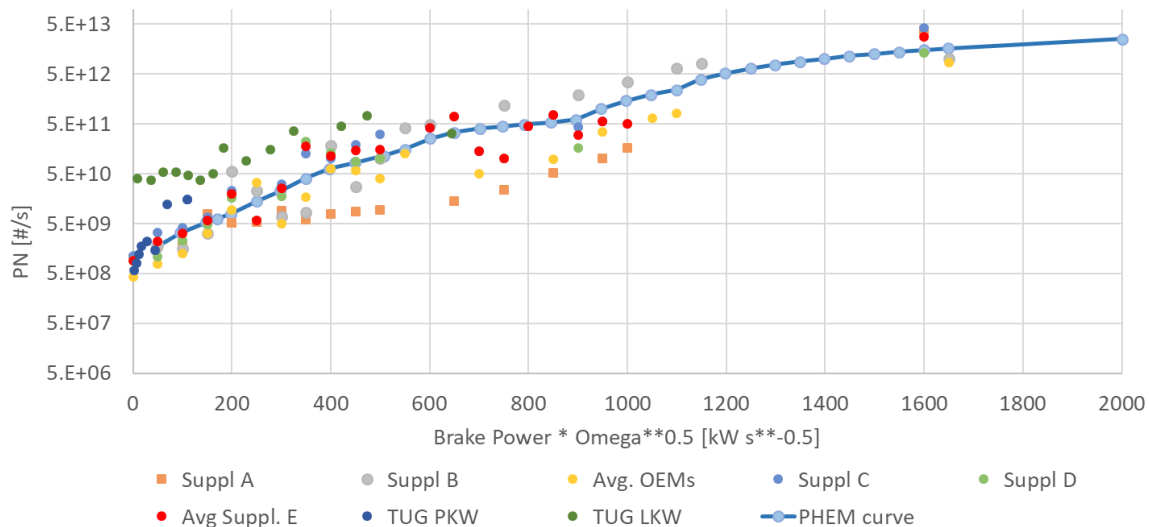


Abbildung 5-1: Charakteristisches Polygon für die PN Emissionen je Bremse⁹

5.1.1 Modell für die Dauerbremsen

Bei schweren Nutzfahrzeugen ist für Busse ab 7,5 t TPMLM und bei LKW und Sattelzügen ab 12 t TPMLM eine Dauerbremse vorgeschrieben. Diese kann ein Retarder und/oder eine Motorstaubremse sein. Retarder sind mit dem Antrieb verbunden und erzeugen durch Reibung eines Fluids zwischen Rotorscheufeln Bremsenergie. Motorstaubremsen betätigen eine Klappe oder ein Ventil, das den Querschnitt im Abgasstrang reduziert und so die Ladungswechselarbeit stark erhöht. Dadurch entsteht ein starkes Bremsmoment. Fahrzeuge können auch Retarder und Staubbremse installiert haben.

Die von den Dauerbremsen aufgebrauchte Bremsenergie muss zum großen Teil vom Fahrzeugkühlsystem abgeführt werden, das meist so ausgelegt ist, dass beim Fahrbetrieb unter Vollast die Abwärme im Kühlwasser abgeführt werden kann. Diese Abwärme hat etwa den Betrag der abgegebenen Motorleistung. Damit sind die Dauerbremsen auch etwa mit der Motornennleistung dimensioniert. Typischerweise benötigt der Retarder wegen der Trägheit der Hydraulik eine kurze Zeitspanne, bis er vom Steuergerät zugeschaltet wird, davor bremst nur die mechanische Bremse, der Motor und bei vorhanden sein eines Elektromotors auch dieser. Wird die maximale Retarderleistung bei seiner aktuellen Drehzahl überschritten, muss jedenfalls mechanisch zugebremst werden. Moderne Steuergeräte schalten die Dauerbremse auch automatisch, der Fahrer kann Retarder und Staubbremse aber auch manuell schalten.

Nutzbare Informationen zur Quantifizierung des Anteils der Dauerbremsen an der gesamten Bremsleistung von Nutzfahrzeugen wurden weder in der Literatur noch in Datensammlungskampagnen gefunden. Da die Dauerbremsen signifikante Anteile der Bremsleistung ver-

⁹ Aus den Messdaten ergeben sich wegen der aus vorangegangenen Bremsvorgängen gespeicherten Abriebpartikel auch ohne Bremsleistung Abriebemissionen. Um in der Simulation keine Abriebemissionen zu berechnen, wenn zuvor keine Bremsungen erfolgten, wurden diese Emissionen auf Punkte mit Bremsleistung aufgeschlagen. In Zukunft könnte dafür ein Speichermodell entwickelt werden.

schleißfrei, also ohne Partikelabrieb erzeugen, musste für eine ausreichend detaillierte Simulation der Bremspartikelemissionen von Nutzfahrzeugen ein Modell für die verbleibenden Anteile der mechanischen Bremsen erzeugt werden.

Wir haben dafür Messfahrten an drei schweren Nutzfahrzeugen über insgesamt ca. 650 km durchgeführt, bei denen neben der Erfassung von Geschwindigkeit und Höhenprofil mittels GPS-Logger auch Bremsdruck und die Prozente der drehzahlabhängigen Maximalmomente der Staubremse und der Retarder aus dem CAN Signal der LKW aufgezeichnet werden konnten. Aus diesen Signalen wurden die Bremsleistungen in 1Hz Intervallen berechnet. Die gefahrenen Routen wurden auch mit dem Modell PHEM nachgerechnet und die so berechnete gesamte Bremsleistung mit den Ergebnissen der Bremsleistung aus den CAN Signalen verglichen. Die Abweichung betrug jeweils unter 5%, was Anbetracht der Unsicherheiten aus den GPS-Signalen, realen Fahrwiderständen und Umrechnungsmethoden aus CAN Signalen ausreichend genau erscheint.

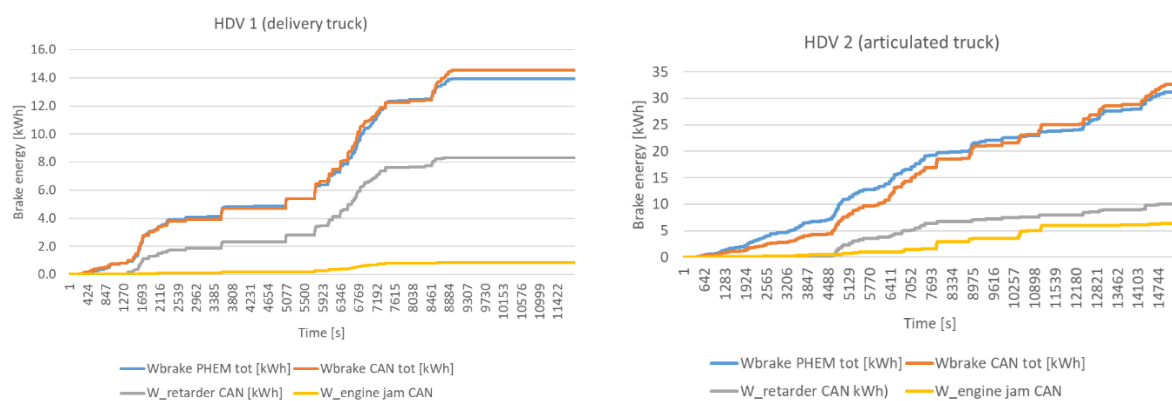


Abbildung 5-2: Vergleich der aus CAN-Signalen berechneten mit der von PHEM simulierten gesamten kumulierten Bremsenergie und aus den CAN-Signalen ermittelten Dauerbremsenergien für zwei Messfahrten

Aus den sekundlichen Daten wurden jeweils Absolutwerte und Anteile der einzelnen Bremsysteme an der gesamten Bremsleistung berechnet. Zusammen mit den Signalen zur Geschwindigkeit, Fahrbahnsteigung und aktueller Bremsenergie über verschiedene Intervalle (+/-1 bis 5 Sekunden um die aktuelle Sekunde) wurden die Daten mittels multipler, linearer Regressionsanalyse getestet. Bremsleistungen und Energien wurden dabei jeweils mittels Division durch die Motornennleistung normiert, um die Ergebnisse für alle SNF-Größenklassen anwenden zu können. Das beste Modell mit einem R^2 von 0,36 und den signifikantesten Einflussgrößen ist in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Ergebnis der multiplen Regressionsanalyse mit dem %-Anteil der mechanischen Bremse an der gesamten Bremsleistung als abhängige Größe

	Parameter	Standardfehler	Signifikanz
Konstante	88.5	0.94	0
V [km/h]	-0,58	0.02	0
Steigung [%]	2,47	0.34	0
5 Sek W-Brake/kW P _{rated} ⁽¹⁾	-10,39	2.21	0

(1) Summe der Bremsenergie von -2 bis +2 Sekunden in gegenüber der aktuellen Sekunde [Wh] je kW Motornennleistung (=W_{bn})

Die entsprechende Formel ist in Gleichung 5-5 zusammengefasst.

$\frac{P_{mech} \cdot 100}{P_{brake} - tot} = 88.5 - 0.58 \cdot v \left[\frac{km}{h} \right] + 2.47 \cdot Gradient[\%] - 10.39 \cdot W_{bn} \left[\frac{Wh}{kWh} \right]$	Gleichung 5-5
---	---------------

Zusätzliche Filter:

- + Anteil mechanische Bremsleistung muss zwischen 0 und 100% liegen
- + Unter 8 km/h ist der Anteil mechanische Bremse = 100% (aus den Messdaten)
- + Maximale absolute mechanische Bremsleistung = 1,25 x Motornennleistung (um bei unrealistischen gesamten Bremsleistungen keine unrealistischen Bremsemissionen zu berechnen, wenn z.B. das Gefälle oder die Verzögerung aus GPS Daten in einzelnen Zeitschritten fehlerhaft sind)

Das Ergebnis ist durchaus plausibel:

- Mit steigender Geschwindigkeit wird zunehmend die Dauerbremse genutzt, der Anteil der mechanischen Bremsen sinkt also
- Mit zunehmendem Gefälle (negative Steigung) wird zunehmend die Dauerbremse genutzt, der Anteil der mechanischen Bremsen sinkt also
- Mit zunehmendem Bremsenergie (höhere Bremsleistung über längeren Zeitraum) wird zunehmend die Dauerbremse genutzt, der Anteil der mechanischen Bremsen sinkt also

Tabelle 5-2 zeigt für die vier Messfahrten jeweils die gesamte Bremsenergie und den Anteil der mechanischen Bremsen aus dem CAN-Signal berechnet und mit dem Modell berechnet. Die Abweichung ist über alle Fahrten unter 2%, je Messfahrt höher. Die Fahrer sowie auch der Bremsregler der Kfz dürften jeweils etwas unterschiedliche Strategien beim Betätigen der Dauerbremsen verfolgt haben. Eine eindeutige Strategie konnte nicht erkannt werden, bei identischen Bremszuständen ergaben sich in der Messung Werte zwischen 0% und 100% mechanischer Bremsanteil.

Tabelle 5-2: Vergleich der berechneten und mit dem Modell simulierten mechanischen Bremsenergie in den vier Messfahrten

	Bremsenergie gesamt	Mech. Bremsenergie		% Anteil mechanisch	
		CAN	Modell	CAN	Modell
Fahrzeug	[kWh]			[%]	
SNF 1	14.6	5.39	6.31	37%	43%
SNF 2, Fahrt 1	32.3	16.17	16.74	50%	52%
SNF 2, Fahrt 2	32.0	15.99	16.13	50%	50%
SNF 3	19.3	14.68	12.44	76%	64%
Mittelwert	24.6	13.1	12.9	53%	53%

Abbildung 5-3 zeigt beispielhaft die mechanischen Bremsleistung aus dem CAN-Signal berechnet und die mit PHEM simulierte, wobei diese aus der gesamten Bremsleistung und dem Anteil an mechanischer Bremsleistung nach Gleichung 5-6 berechnet wurde.

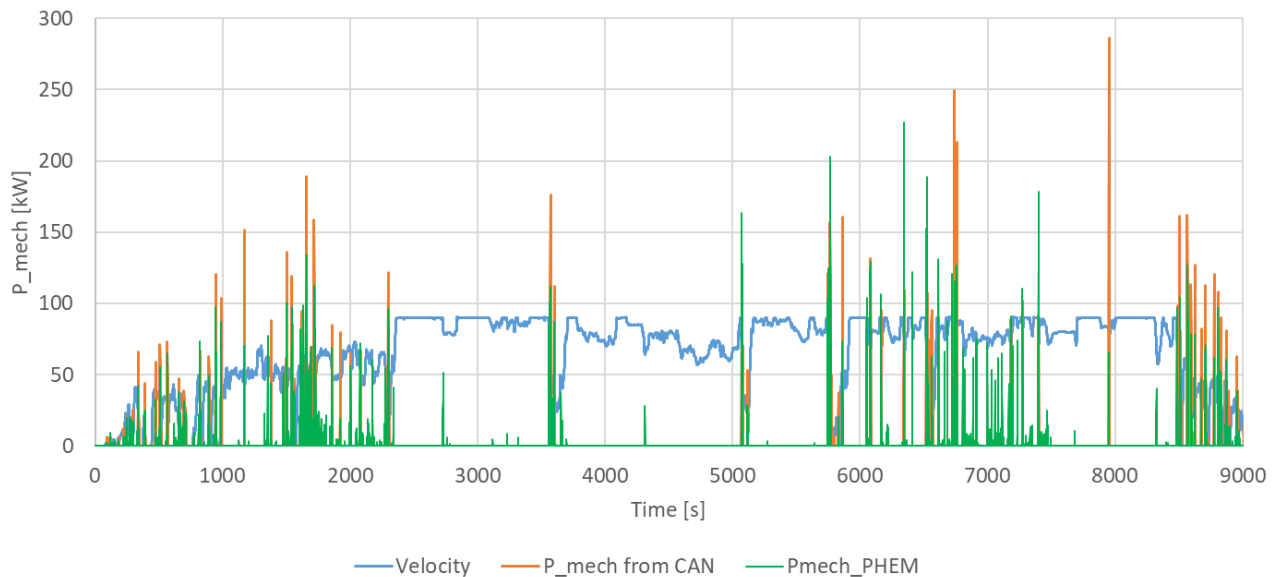


Abbildung 5-3: Vergleich der mechanischen Bremsleistung aus dem CAN-Signal berechnet und mit PHEM simuliert (aus gesamter Bremsleistung und Anteil mechanisch nach Gleichung 5-7)

5.1.2 Berechnung von PM₁₀ und P_{2.5}

Die PM₁₀-Emissionen werden aus den PN-Emissionen anhand einer Dichtefunktion in Abhängigkeit von der Scheibendrehzahl berechnet. Dies spiegelt einen Trend wider, der z. B. in (Niemann, 2021) auf der Grundlage systematischer Tests auf einem Bremsenprüfstand berichtet wurde, nämlich, dass die Partikeldichte [mg/#] mit zunehmender Scheibendrehzahl abnimmt. Abbildung 2 zeigt die im Modell verwendete Anzahlfunktion. Sowohl in (Niemann, 2021) als auch in (Hesse, 2021) werden etwas niedrigere Werte für PN/PM₁₀-Verhältnisse angegeben. Die hier verwendete Funktion wurde so angepasst, dass sie etwa dem Durchschnitt der bisher in der Literaturstudie gefundenen PM₁₀-Bremsabrieb-Emissionen entspricht. Aus der Literaturstudie wurden dafür jeweils nur reale Testzyklen mit typischen EU-Bremsbelag/Bremsscheiben-Kombinationen berücksichtigt.

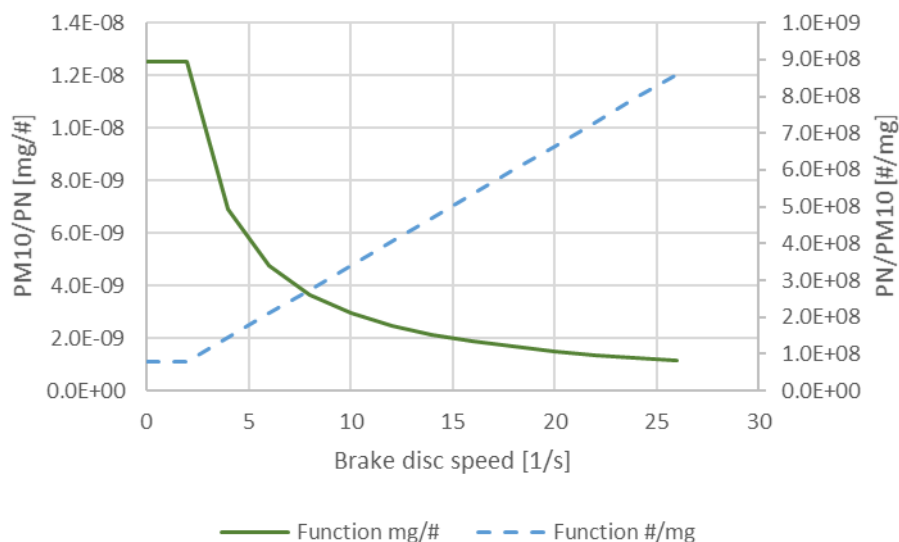


Abbildung 5-4:: PN/PM-Verhältnis zur Berechnung von PM₁₀ aus PN

Tabelle 5-3 fasst die Verhältnisfaktoren für $PM_{2.5}$ und TPM zu PM_{10} zusammen, die jeweils aus der Literaturstudie in Kap. 3.1 stammen. Für SNF würde die Literatur einen etwas geringeren Faktor für $PM_{2.5}/PM_{10}$ ergeben. Da keine physikalische Erklärung dafür gefunden wurde, nehmen wir dasselbe Verhältnis wie für PKW an, da dieses auf einer deutlich breiteren Messbasis beruht. Zum gesamten Abrieb (TPM) über alle Partikelgrößen bezogen auf PM_{10} wurden nur fünf Literaturdaten gefunden. Der Wert ist also sehr unsicher.

Tabelle 5-3: Verhältnisfaktoren zur Bestimmung anderer Partikelkenngößen aus den PM_{10} Modellergebnissen für Bremsabriebemissionen

	PKW	SNF
$PM_{2.5} / PM_{10}$	0,5	0,5
TPM / PM_{10}	5.0	5.0

(1) Für SNF, die mit Retarder ausgestattet sind. Vorläufiger Wert aus einer Messung der TU Graz.

Beispiele für Ergebnisse und ein Vergleich mit Literaturwerten werden später zusammen mit dem Reifenabrieb gezeigt.

5.2 Modell für Reifenabrieb

Ziel bei der Entwicklung des Modells war es, die Haupteinflüsse des Fahrzyklus und der Fahrzeugkonfiguration (Masse, Fahrwiderstände, etc.) auf die Emissionswerte aus Reifenabrieb bewerten zu können. Wie schon für Bremsabrieb, waren die verfügbaren Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Straßenkategorie oder der Durchschnittsgeschwindigkeit dafür nicht ausreichend. In dem Modell von (Hausberger, 2023) war die Radleistung der erklärende Parameter. Daten zum Einfluss von Reifenschlupf sowie Lenkwinkel etc. auf die Abriebpartikel waren nicht verfügbar. Zwischenzeitlich wurden weitere Messergebnisse veröffentlicht, deren Analyse nahelegt, dass die Schlupfleistung in Längs- und Querrichtung den Abrieb deutlich besser beschreibt als die Radleistung. Das Modell wurde dahingehend geändert.

5.2.1 Abhängigkeiten

Publizierte Ergebnisse einer Messserie zu Reifenabrieb am Innentrommelprüfstand des KIT in (Schläfle, 2023), (Schläfle, 2023-2) und (Schläfle, 2024) wurde verwendet, um zu analysieren, welche physikalische Größe den gemessenen Abrieb am besten beschreibt.

Bei diesen Messungen wurde der Innentrommelprüfstand des KIT verwendet, um Abriebe-missionen (PN und PM) zu messen. Dabei wurden unterschiedliche Kräfte in Längs- (x), Querrichtung (y) und Vertikal (Z) aufgebracht. Der Prüfstand ist dabei innen mit typischem Straßenasphalt belegt. Die Partikelemissionen wurden in der vom Prüfstand abgesaugten Luft gemessen. Die Ergebnisse zeigen dementsprechend jeweils die Summe aus Reifen- und Fahrbahnabrieb.

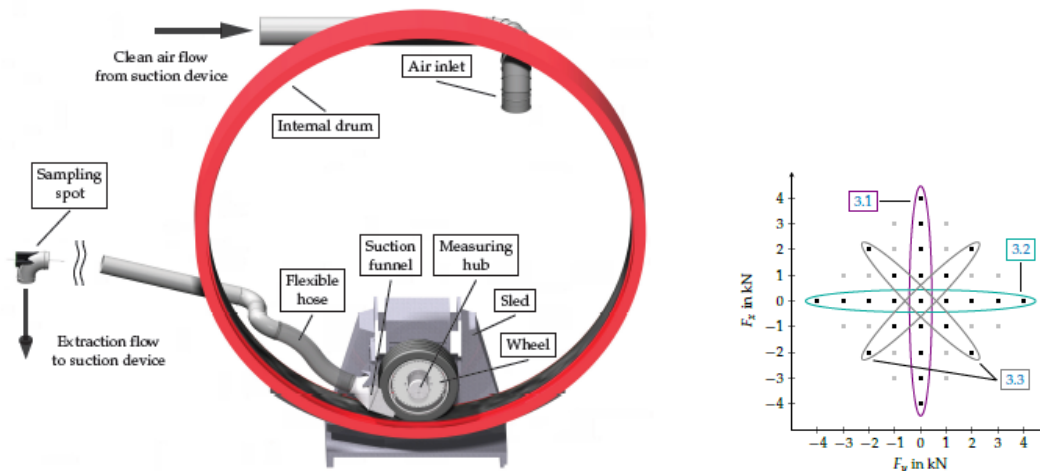


Abbildung 5-5: Schema des Messaufbaus zur Reifen-Abriebmessung am KIT (links) und aufgebrachte Kräfte in Längs- (x) und Querrichtung (y), (Schläfle, 2023)

Die Variation der Kräfte in den drei Koordinatenrichtungen erlaubte eine Analyse, welche Energie bzw. Leistungskomponente den gemessenen Abrieb am besten beschreibt. Dafür wurden Radleistung, Schlupfleistung mit Längs-, Quer- und Vertikalkraft berechnet und mit den gemessenen Abriebemissionen korreliert.

Da der Schlupf bei keinem der Datensätze zum Reifenabrieb gemessen wurde, wurde eine generische Gleichung aus Literaturwerten für trockenen Asphalt abgeleitet. Dafür wurde einfach die Steigung in dem annähernd linearen ansteigenden Ast ermittelt.

Dabei gilt:

$$\text{Schlupf } s_{x(t)} = (\text{Radumfangsgeschwindigkeit} / \text{Fahrzeuggeschwindigkeit} - 1)^{10}$$

$$\text{Schlupf-generisch} = F_x / F_z \cdot 0,0625$$

Die Schlupfleistung wird nach Gleichung 5-8 bzw. Gleichung 5-9 berechnet.

$$PS_{(t)} = F_{x(t)} \cdot s_{x(t)} \cdot v_{x(t)} = P_{x(t)} \cdot s_{x(t)} \quad \text{Gleichung 5-8}$$

$$\text{Generisch: } PS_{(t)} = P_{x(t)} \cdot 0,0625 \cdot \frac{F_{x(t)}}{F_{z(t)}} \quad \text{Gleichung 5-9}$$

Diese generische Gleichung 5-9 wurde zur Berechnung aller Schlupfleistungen genutzt. Solange die gleiche Steigung für die Berechnung der Schlupfleistung für das charakteristische Reifen-Polygon und in der Software PHEM verwendet wird, entsteht kein Fehler im Ergebnis.

Abbildung 5-6 zeigt die am Innentrommelprüfstand des KIT gemessenen Abriebemissionen an einem Sommerreifen einmal aufgetragen über der Radleistung (links) und einmal über der Rad-Schlupfleistung (rechts). Im Bild links ist zu sehen, dass bei gleicher Radleistung kleinere

¹⁰ Der Schlupf in Radialrichtung wird über den Schräglaufwinkel berücksichtigt und ist später beschrieben.

F_z/F_x -Werte, einhergehend mit höherem Schlupf, zu deutlich höheren Abriebemissionen führen als höhere F_z/F_x -Werte¹¹. Eine geringere Vertikalkraft führt zu höherer Relativgeschwindigkeit zwischen Reifen und Fahrbahn und so bei gleicher übertragener Leistung in Längsrichtung zu mehr Abrieb.

Im rechten Bild sind die Abriebemissionen über der Schlupfleistung aufgetragen. Hier ergeben sich bei den verschiedenen F_z/F_x -Werten bei jeweils der gleichen Schlupfleistung auch sehr ähnliche Abriebemissionen.

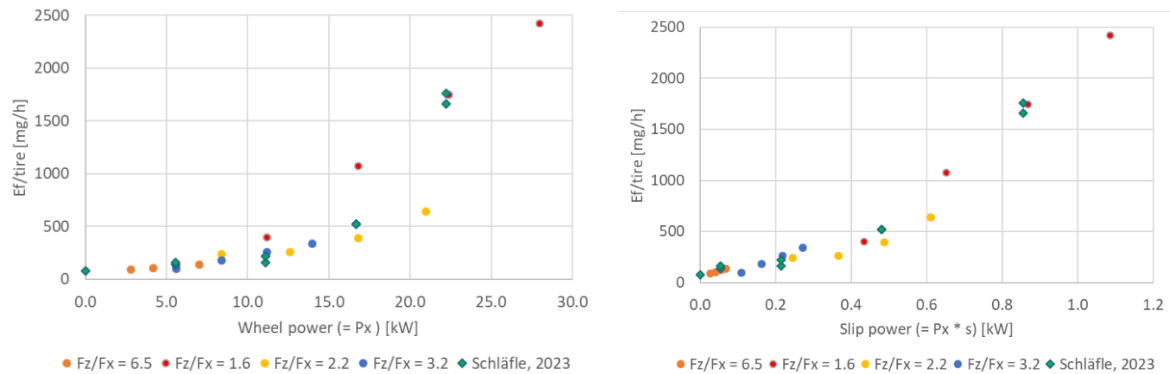
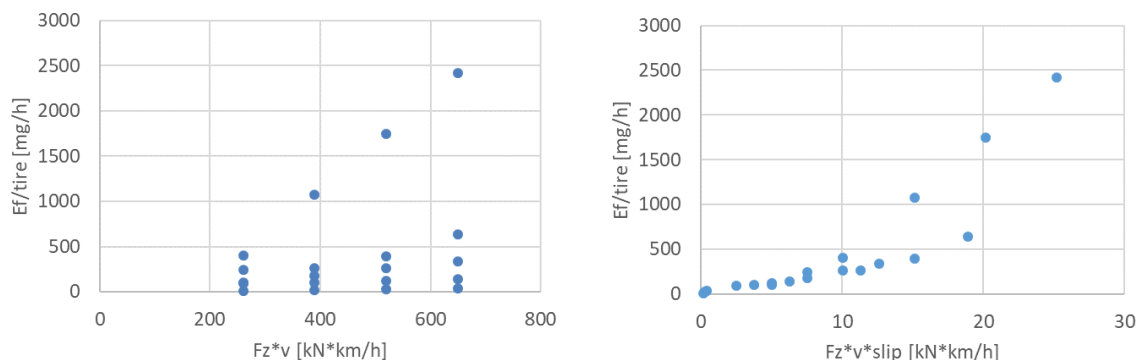


Abbildung 5-6: In (Schläfle, 2023) und (Schläfle, 2024) gemessener Abrieb von Reifen und Trommel bei Aufbringung von Längskräften, einmal über Radleistung (links) und einmal über Rad-Schlupfleistung (rechts) aufgetragen

In der Literatur wird öfters der Ansatz nach Archard und nach Schallamach für die Berechnung des Reifenabriebs zitiert, z.B. (Ngeno, 2015). Nach Archard sollte der Abrieb pro Zeit proportional zur Normalkraft mal Geschwindigkeit, nach Schallamach proportional zur Normalkraft mal Schlupfgeschwindigkeit sein. Der Unterschied zur in Abbildung 5-6 verwendeten Leistung bzw. Schlupfleistung ist, dass nicht die Kraft in Bewegungsrichtung sondern die Normalkraft auf das Rad verwendet wird. Abbildung 5-7 zeigt die Messdaten aus Abbildung 5-6 über diesen Normalkraft-bezogenen Parametern. Es ist zu erkennen, dass beide Größen die gemessenen Abriebemissionen deutlich schlechter beschreiben als die Schlupfleistung unter Verwendung der Längskraft (die Messwerte liegen deutlich nicht auf einer gemeinsamen Kurve).



¹¹ Die Datenpunkte „Schläfle, 2023“ wurden jeweils bei konstanter Kraft F_z von 6,5 kN und variablem F_x gemessen. In Richtung höherer Radleistung wird dort also F_z/F_x kleiner.

Abbildung 5-7: In (Schläfler, 2023) und (Schläfler, 2024) gemessener Abrieb von Reifen und Trommel bei Aufbringung von Längskräften, einmal über „Normalkraft F_z x Geschwindigkeit“ (links) und einmal über „Normalkraft F_z x Schlupfgeschwindigkeit“ (rechts) aufgetragen

Daraus schließen wir, dass die Schlupfleistung die Reifenabriebemissionen besser erklärt als die Radleistung und die Kraft in Längsrichtung relevant ist. Die Normalkraft auf den Reifen ist natürlich für den Schlupf direkt proportional verantwortlich und somit auch direkt in der Schlupfleistung berücksichtigt, allerdings im Nenner. Das bedeutet, dass hohe übertragene Kräfte bzw. Momente bei gleicher Leistung zu höherem Abrieb führen. Die Gleiche übertragene Längskraft führt bei geringerer Normalkraft zu mehr Abrieb. Eine geringere Fahrzeugmasse und die damit geringere Normalkraft führen natürlich auch zu einem geringeren Längskraftbedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände. Insgesamt ist so die Änderung des Abriebs etwa proportional zur Änderung der Fahrzeugmasse, bei sonst gleichen Fahrbedingungen, zumindest, wenn man annimmt, dass der Luftwiderstand bei schwereren Fahrzeugen auch größer wird.

Bei Kurvenfahrten führt die Zentrifugalkraft zu Reifenschlupf. Dieser führt dazu, dass das Rad stärker eingelenkt werden muss, als es dem gewünschten Kurvenradius entspricht. Dieser Schlupf bei Querkraften kann aus der Seitensteifigkeit der Reifen und dem damit verbundenen Schräglaufwinkel berechnet werden. Er wurde in den Versuchen am KIT in (Schläfler, 2023), (Schläfler, 2024) nicht ermittelt und wurde daher hier über generische Beziehungen berechnet, um die Abriebemissionen bei Quer- mit dem bei Längsschlupf vergleichen zu können.

Dafür wurde eine vereinfachte Beziehung von Querkraft und Schräglaufwinkel aus den Daten in (Ngeno, 2015), (Heißing, 2009) und (Leeuwen, 2003) abgeleitet, siehe (Gleichung 5-10) und Abbildung 5-8. Inwieweit der daraus bestimmte Koeffizient den Durchschnitt heutiger Reifen gut trifft ist offen, die gefundenen Literaturstellen zeigten ähnliche Abhängigkeiten zwischen Seitenkraft, Aufstandskraft und Schräglaufwinkel. Zur Absicherung wäre es bei eventuellen, zukünftigen Messungen am Reifenprüfstand wünschenswert, wenn neben den Kräften auch der eingestellte Winkel erfasst würde¹².

$$\text{Schräglaufwinkel } \alpha_{(t)} = \frac{F_{y(t)}}{F_{z(t)}} \cdot 3.65 \quad \text{Gleichung 5-10}$$

$$\text{Querschlupf } s_{y(t)} = \sin(\alpha_{(t)}) \quad \text{Gleichung 5-11}$$

$$\text{Zentrifugalkraft } F_y = \frac{m_{veh.} \cdot v_{(t)}^2}{r_{(t)}} \quad \text{Gleichung 5-12}$$

$$\text{Quer – Schlupfleistung } P_y = F_y \cdot s_y \cdot v$$

- Mit
- $\alpha_{(t)}$ Schräglaufwinkel in Zeitschritt t
 - $F_{y(t)}$ Zentrifugalkraft in Zeitschritt t in [N]
 - $F_{z(t)}$ Radaufstandskraft in Zeitschritt t in [N]
 - $s_{y(t)}$ Querschlupf in Zeitschritt t in [-]
 - $v_{(t)}$ Geschwindigkeit in Zeitschritt t in [m/s]

¹² Bei gleichem Belag sollte der Zusammenhang von F_y , F_z und Schräglaufwinkel gleich wie auf der Straße sein, da der Reifen mit denselben Kraftverhältnissen beaufschlagt ist. Am Prüfstand können die Kräfte und Winkel wesentlich einfacher erfasst werden als auf der Straße.

$r(t)$ Kurvenradius in Zeitschritt t in [m]

$P_{y(t)}$ Schlupfleistung in Querrichtung in Zeitschritt t in [W]

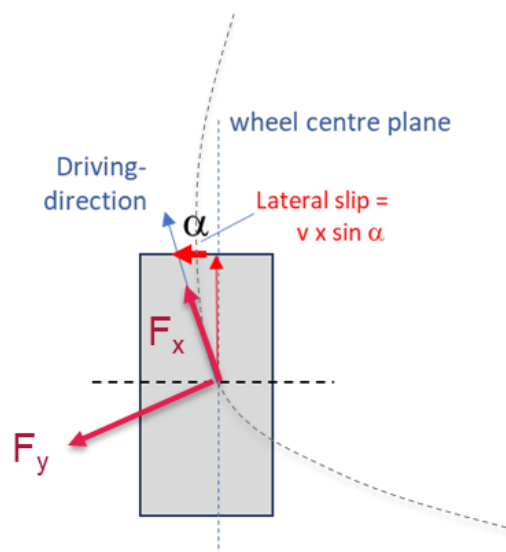


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung von Fahrtrichtung, Reifenmittenebene und Schräglaufwinkel α bei einer Kurvenfahrt¹³

Damit konnten zu den Abriebemissionen, gemessen bei unterschiedlichen Kräften in x-, y- und z-Richtung aus (Schläfle, 2023) und (Schläfle, 2024) die Schlupfleistungen auch in y-Richtung berechnet werden. Abbildung 5-9 zeigt die Messergebnisse des KIT bei Aufbringung von Längskräften (ohne Querkraften) und von Querkraften (ohne Längskräfte), aufgetragen über der hier berechneten Schlupfleistung wiederum für den Sommerreifen. Es ergeben sich als Folge des Querschlupfes demnach deutlich höhere Abriebemissionen als durch den Längsschlupf. Eine Sensitivitätsanalyse mittels Variation der Konstanten in Gleichung 5-11 im Bereich plausibler Werte zeigt, dass der Abrieb in y-Richtung bei gleicher Schlupfleistung in allen Fällen signifikant höher als in x-Richtung ist. (Schläfle, 2023) bestätigt dementsprechend einen deutlich höheren Einfluss der Querkraft als der Längskraft, untersuchte aber keinen Schlupfeinfluss. Ob dieser Effekt bei allen Reifenmarken und Typen gleich auftritt ist noch unklar.

Ursachen für diesen Effekt wurden in der Literatur nicht gefunden. Nach unserem Verständnis könnte die Ursache die in Querrichtung bei Kurvenfahrt stark ungleichmäßige Kraftverteilung auf der Reifenaufstandsfläche (Latsch) sein. In Richtung Kurvenaußenseite dürften im Latsch deutlich höhere Kräfte auftreten als auf der Innenseite während bei Geradeausfahrt die übertragenen Kräfte über der Reifenbreite eher gleichverteilt sind. Bei überproportionalem Anstieg des Abriebs mit der Schlupfleistung je Fläche entsteht damit bei ungleich verteilten Kräften ein höherer Abrieb.

¹³ In der Fahrzeugdynamik wird häufig die x-Koordinate senkrecht zur Radachse definiert und y-Koordinate in Richtung Radachse. Hier ist die Fahrzeuglängsachse als x-Koordinate festgelegt, da die GPS-Signale, die Basis für die meisten Geschwindigkeitszyklen sind, die Trajektorie in diese Richtung angeben. Ohne Kenntnis des Lenkwinkels, erscheint eine Umrechnung in die „üblichen“ Koordinaten nicht sinnvoll.

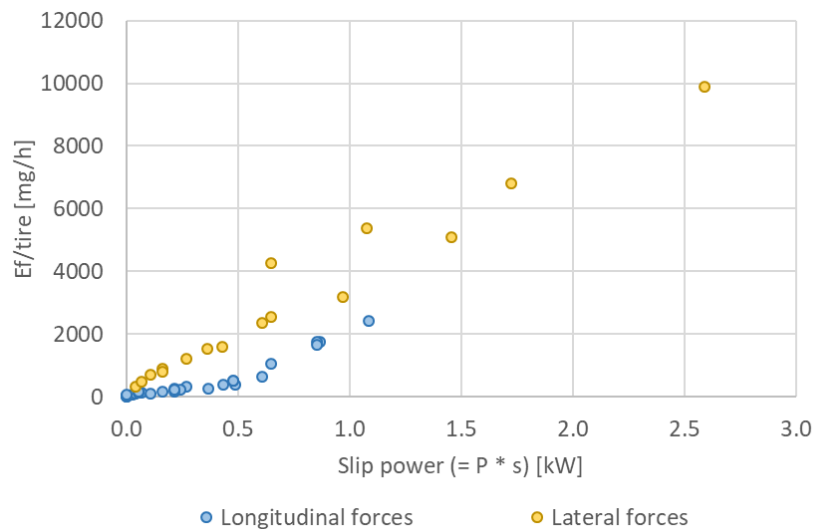


Abbildung 5-9: In (Schläfler, 2023) und (Schläfler, 2024) gemessener Abrieb von Reifen und Trommel bei Aufbringung von Längs- oder Querkraften

5.2.2 Das charakteristische Reifenabrieb Emissions-Polygon

Wir gehen also davon aus, dass der wichtigste Einflussfaktor für die Masse an Reifenabrieb [mg] die Schlupfenergie [kWh] zwischen Reifen auf Fahrbahn ist und daher die Emissionsfaktoren in [mg/h] von der Schlupfleistung [kW] abhängen, siehe Gleichung 5-13. Dabei wird die Schlupfleistung in Fahrtrichtung (x) und Querrichtung (y) getrennt berücksichtigt, da in Querrichtung (y) höhere Abriebemissionen je kW Leistung anzunehmen sind.

$$E_{t-x} = C_{(Pst-x)} \cdot \frac{1}{3600} \quad \text{Gleichung 5-13}$$

$$E_{t-y} = C_{(Pst-y)} \cdot \frac{1}{3600} \quad \text{Gleichung 5-14}$$

$$E_t = E_{t-x} + E_{t-y}$$

mit: PS_t Schlupfleistung am Reifen in x- bzw y-Richtung [kW]
 E_t Reifenabrieb PM_{10} [mg/s] bzw. PN [#s]
 $C_{(pt)}$ Charakteristisches Polygon aus Messdaten, mit dem PM_{10} [mg/h] über der der Schlupfleistung PS_t am Reifen abgebildet werden (getrennt nach x- und y-Richtung)

Das Hauptproblem bei der Parametrisierung einer repräsentativen Kennlinie $C_{(pt)}$ ist die geringe Menge an nutzbaren Messdaten. Messdaten zu Reifenabrieb sollten idealerweise folgende Größen enthalten:

- PM_{10} , $PM_{2.5}$ und PN_{23} sowie PN_{10}
- Leistung oder Kraft am Rad in x und in y-Richtung (alternativ Fahrzeugmasse, Fahrwiderstände und Kurvenradien im Fall von Straßenmessungen)
- Geschwindigkeit sowie Schlupf in x- und y-Richtung und/oder Schräglaufwinkel

Bei nicht konstanten Bedingungen wären die Messdaten zumindest in 1 Hz Auflösung wünschenswert, bei Messung von Konstantpunkten sind die Mittelwerte je Testfall ausreichend.

Annähernd komplette Messdaten sind nur aus den Rollentests im Rahmen dieses Projektes und aus den schon zuvor analysierten Messungen am KIT aus (Schläfle, 2023) und (Schläfle, 2024) verfügbar. In diesen Daten musste nur der Schlupf nach Gleichung 5-9 und Gleichung 5-11 aus Kap. 5.2.1 geschätzt werden. Bei den Messdaten am Innentrommelprüfstand des KIT musste auch der Anteil an Abrieb des Asphaltbelags geschätzt werden. Analysen für die Anteile für PM₁₀, PM_{2.5} und PN sind in (Schläfle, 2023) nicht durchgeführt. Wir haben daher entsprechend der Mittelwerte aus der Literaturstudie für PM₁₀ einen Reifenanteil von 45% und für PN₁₀ von 90% angenommen.

Zur besseren Absicherung der Daten, wurden auch Emissionsfaktoren aus der Literatur mit unvollständigen Datensätzen in schlupfleistungsabhängige Emissionsdaten übersetzt. Die Methode zur Berechnung der Radleistung zu verschiedenen Literaturstellen für Emissionsfaktoren zu Reifenabrieb wurde schon in (Hausberger, 2023) beschrieben. Die Schlupfleistungen dazu wurden jeweils mit den zuvor beschriebenen generischen Abhängigkeiten berechnet.

Insgesamt ergibt sich ein breites Spektrum an gemessenen Abriebemissionen über der Schlupfleistung. Von den gemessenen Reifen zeigte ein Winterreifen am KIT Prüfstand die höchsten PM₁₀ Emissionen, die Anteile von Asphaltabrieb sind dabei aber unsicher. Der LKW-Reifen gemessen am Rollenprüfstand der TU Graz zeigte bei hohen Schlupfleistungen die niedersten Werte, was aber an der rauen Stahlrollenoberfläche liegen könnte, welche den Abrieb von Partikeln größer PM₁₀ begünstigen könnte.

Für die charakteristischen Reifenabrieb-Polygone für die Simulation der PM₁₀ Emissionen bei Längs- und Querschlupf mit PHEM für HBEFA 5.1 wurden die Messdaten für Abrieb bei Kräften in x-Richtung nach Schlupfleistungsklassen gemittelt, der Winterreifen wurde dabei nur mit 15% berücksichtigt. Der Abrieb in y-Richtung ist in den Daten nach (Schläfle, 2023) und (Schläfle, 2024) je kW Schlupfleistung etwa 4 mal höher als bei Schlupf in x-Richtung. Damit würde die Kurvigkeit der Strecken am Beispiel der Standard RDE-Runde der TU Graz etwa 75% der Abriebemissionen verursachen (siehe auch Kap. 5.3). Da für dieses Verhältnis nur Messungen an einem Reifenmodell verfügbar sind, wurde das Reifenabriebs-Polygon in y-Richtung mit zweimal dem Wert in x-Richtung für den HBEFA 5.1 Datensatz angenommen. Damit sind die Kurven immer noch für über 50% des PM₁₀ Abriebs auf unserer RDE Strecke verantwortlich. Für ein kommendes Update sollte dieses Verhältnis mit Messungen an unterschiedlichen Reifentypen gestützt werden. Mit diesen Einstellungen, ergeben sich Abriebemissionen (PM₁₀ und TPM) im Bereich der Mittelwerte aus der Literatur.

Die Polygone werden für HBEFA 5.1 für alle Kfz-Kategorien gleichermaßen genutzt. Die Messdaten zeigten keine signifikant unterschiedlichen Ergebnisse für LKW und 2-Rad-Reifen. Es wurde bisher allerdings auch nur je ein Reifen von einem LKW und von einem Motorrad vermessen.

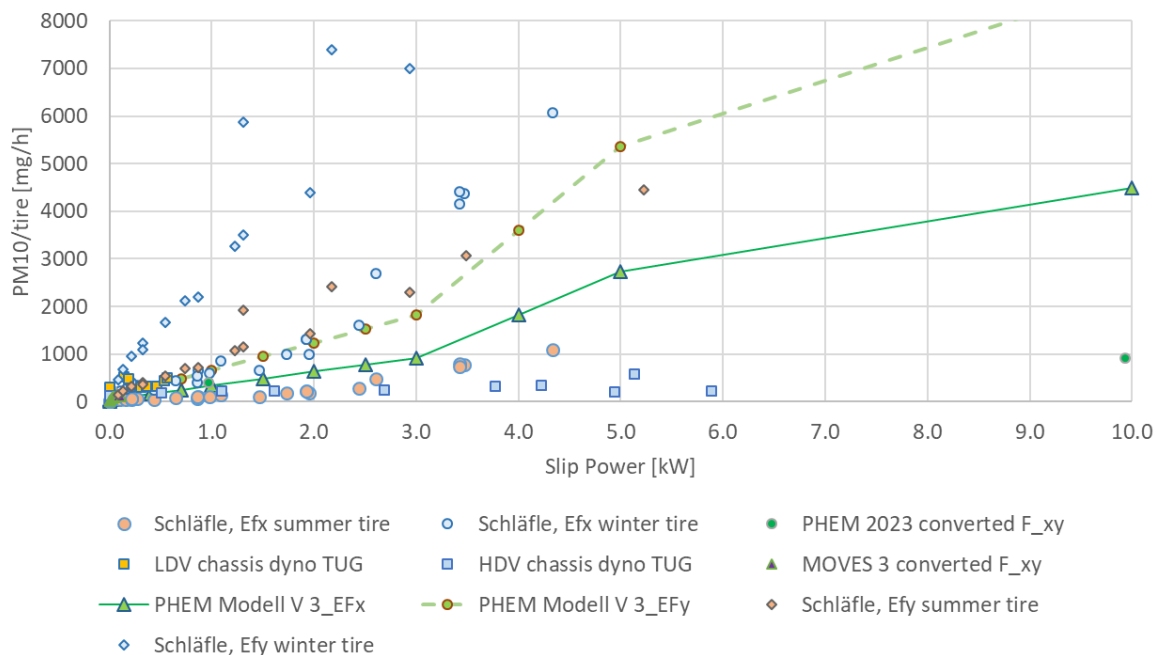


Abbildung 5-10: Charakteristische Reifenabrieb-Polygone für die PM10 Emissionen bei Längs- und Querschlupf für die Simulation in PHEM sowie verfügbare Mess- und Literaturdaten

Bei den Partikelanzahlemissionen zeigen die Messdaten noch weitere Streuung als bei PM10. Aus allen Messungen, bei denen PN und PM10 gemessen wurde, wurde ergeben sich im Mittel $1,3E+10$ Partikel je mg PM10.

Tabelle 5-4: Verfügbare Messdaten zum PN23/PM10 Verhältnis von Reifenabrieb

	[#PN/mg]	# Reifen	Gewicht
Mittelwert aus Literaturdaten:	$1.23E+10$	3	3
(Schläfle, 2024) an einem Sommerreifen	$3.58E+07$	1	1
TUG LNF	$8.77E+10$	1	$0.5^{(1)}$
TUG LKW	$4.73E+09$	1	$0.5^{(1)}$
TUG BEV PKW	$\sim 2.00E+02$	1	1
TUG PHEV PKW	$\sim 2.00E+02$	1	1
TUG Motorrad Hinterreifen	$4.27E+10$	1	$0.2^{(1)}$
Mittel gewichtet	$1.25E+10$		

(1)..Messdaten an anderen als C1 Reifen (PKW) wurden hier geringer gewichtet (weniger Flottenanteile, andere Rollendurchmesser und Rollenoberfläche bei Messungen und andere Reifentypen bei LKW und Motorrädern je Achse)

Mit diesem durchschnittlichen Faktor wurden die PN23 Abriebpolygone aus den PM10 Polygonen in Abbildung 5-10 berechnet. Abbildung 5-11 zeigt die so berechneten Polygone. Die teilweise deutlich niedrigeren Messdaten könnten auf unterschiedliche Reifeneigenschaften und/oder auf die auf Rollenprüfständen typischerweise zu hohen Reifenoberflächentemperaturen und die dann weiche und klebrige Oberfläche zurückzuführen sein.

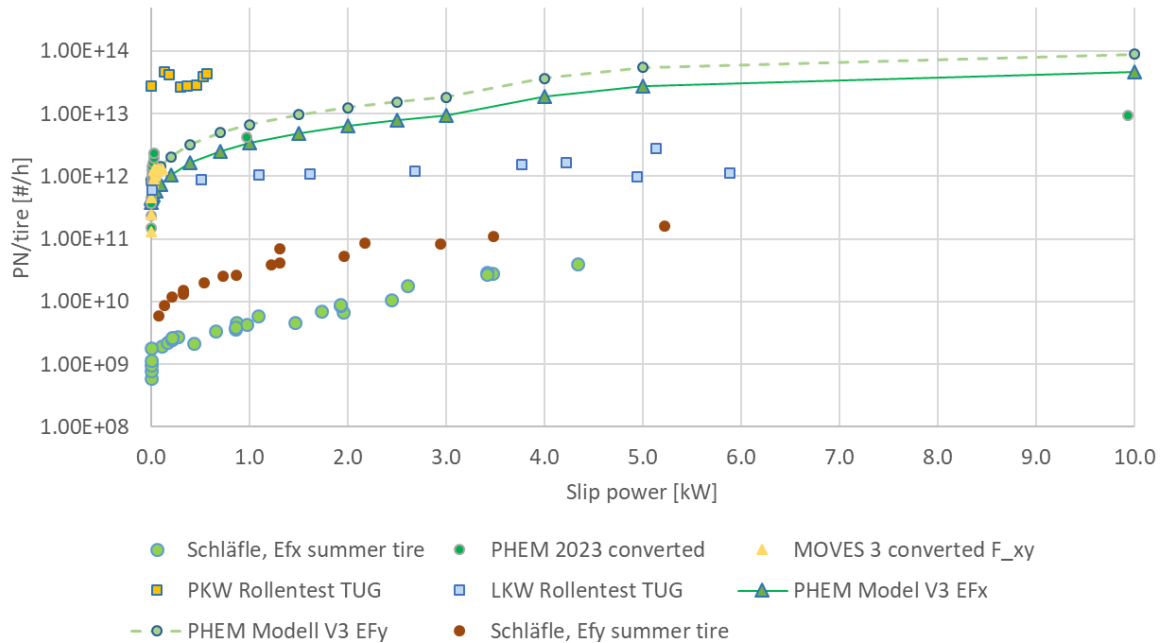


Abbildung 5-11: Charakteristische Reifenabrieb-Polygone für die PN23 Emissionen bei Längs- und Querschleif für die Simulation in PHEM sowie verfügbare Mess- und Literaturdaten

In der Simulationsroutine von PHEM werden die Schleifleistungen aus den Gleichungen der Längs- und Querdynamik mit den generischen Gleichungen zum Schleif als Funktion von F_x/F_z bzw. F_y/F_z (Gleichung 5-9 und Gleichung 5-11) berechnet.

Da die Messdaten zeigen, dass Bremsen (negative Leistung) die gleiche Auswirkung auf den Reifenverschleiß hat wie positive Kraftübertragung. Daher wird der Absolutwert der Schleifleistung in 1 Hz Auflösung berechnet. Dabei wird nach angetriebenen und nicht angetriebenen Riefen und beim Bremsen nach Vorderachse und sonstigen Achsen unterschieden, wobei 2/3 der Bremsleistung der Vorderachse zugeordnet werden. Generell werden vereinfacht zwei Räder auf der angetriebenen Achse angenommen. Bei Nutzfahrzeugen wird die Anzahl nicht angetriebener Räder je nach Achsanzahl vorgegeben.

$$P_t = Abs (P_{air} + P_{grad} + P_{acc} + P_{roll}) \quad \text{Gleichung 5-15}$$

$$P_{S_x} = P_t \cdot s_x = P_t \cdot 0.0625 \cdot \frac{F_{x(t)}}{F_{z(t)}} \quad \text{Gleichung 5-16}$$

$$P_{S_y} = F_y \cdot v \cdot s_y \cdot 0.001 = \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot v \cdot \sin \left(\frac{F_{y(t)}}{F_{z(t)}} \cdot 3.65 \right) \cdot 0.001 \quad \text{Gleichung 5-17}$$

$$\text{Wenn } P_t > 0: P_{S_{x-an}} = P_{S_x} \cdot 0.5 \quad P_{S_{x-so}} = 0 \quad \text{Gleichung 5-18}$$

$$\text{Wenn } P_t < 0: P_{S_{x-an}} = P_{S_x} \cdot \frac{2}{3 \cdot 2} \quad P_{S_{x-so}} = P_{S_x} \cdot \frac{1}{3 \cdot (\#Reifen-2)} \quad \text{Gleichung 5-19}$$

$$P_{S_{y-r}} = \frac{P_{S_y}}{\#Reifen} \quad \text{Gleichung 5-20}$$

mit: P_t Gesamte übertragene Leistung aller Reifen [kW]
 P_{air} Leistung zur Überwindung des Luftwiderstandes [kW]
 P_{grad} Leistung zur Überwindung des Steigungswiderstandes [kW]

P_{acc}	Leistung zur Beschleunigung (positive und negative) [kW]
P_{roll}	Leistung zur Überwindung des Rollwiderstandes [kW]
Ps_x	Mittlere Schlupfleistung in x-Richtung aller Reifen [kW]
Ps_y	Mittlere Schlupfleistung in y-Richtung aller Reifen [kW]
s_x, s_y	Schlupf in x- bzw. y-Richtung [-]
v	Geschwindigkeit [m/s]
R	Kurvenradius [m]
Ps_{x-an}	Schlupfleistung an einem angetriebenen Reifen in x-Richtung
Ps_{x-so}	Schlupfleistung an einem sonstigen Reifen in x-Richtung
Ps_{y-r}	Schlupfleistung in y-Richtung an einem Reifen [kW]

Für jedes Ps_x und Ps_y wird der zugehörige Abrieb in 1 Hz aus dem jeweiligen charakteristischen Reifenabrieb-Polygon interpoliert und danach die Summe gebildet.

Die Fahrzyklen als Eingabedaten für die Simulation der Abriebemissionen enthalten damit neben der Geschwindigkeit und Höhe bzw. der Fahrbahnsteigung auch die Kurvenradien in 1Hz. Eine passende Zuordnung von Radien zur Geschwindigkeit ist dabei wichtig, da ja die Querkraft proportional zum momentanen Verhältnis $v_{(t)}^2/R_{(t)}$ ist. Für Fahrzyklen, bei denen keine Kurvenradien enthalten sind, wurde aus vorhandenen Messdaten eine generische Funktion entwickelt, welche die durchschnittlichen Kurvenradien bei Fahrten als Funktion der Geschwindigkeit wiedergibt (Kap. 5.2.3).

Die Verhältnisse von $PM_{2.5}$ und TPN zu PM_{10} werden aus der Literatur bzw. den eigenen Prüfstandmessungen abgeleitet (siehe Kap. 3.2.2). Wir haben in der Mittelwertbildung für Tabelle 5-5 alle Messwerte gleichermaßen berücksichtigt, da wir aus der Literaturstudie nicht beurteilen können, ob einzelne Literaturstellen besondere Unsicherheiten oder systematische Über- oder Unterschätzungen von einzelnen Größenklassen aufweisen. In (Schläfle, 2023) wurden wie oben beschrieben die Abriebemissionen von Reifen und von dem Asphaltbelag der Trommel am Innentrommelprüfstand des KIT gemessen. Durch Sieben und Wiegen wurden Masseanteile und Dichte von PM_{20} , PM_{40} und TPM bestimmt. Für PM_{20} ergaben sich dabei 11% der Gesamtmasse mit einer Aufteilung in 18% Reifen und 82% Asphaltabrieb¹⁴. PM_{10} konnte durch Sieben nicht isoliert werden, so dass zu den Anteilen von und an PM_{10} keine Aussage getroffen wird.

Die Literaturwerte zum Verhältnis $PM_{2.5}/PM_{10}$ geben für schwere Nutzfahrzeuge im Mittel 70% an. Allerdings handelt es sich dabei jeweils um Literaturstudien ohne nachvollziehbaren Verweis auf Messdaten an schweren Nutzfahrzeugen. Bis weitere Messdaten vorliegen, nehmen wir daher auch für SNF für $PM_{2.5}/PM_{10}$ ein Verhältnis von 50% an.

Grundsätzlich zeigen die Messdaten, dass sowohl Reifenmarke und Type als auch das Messverfahren starken Einfluss auf die PM und PN Abriebemissionen haben. Die geringe Anzahl an Messwerten macht daher auch das Verhältnis $PM_{2.5}$ zu PM_{10} noch unsicherer als die Emissionsdaten für PM_{10} und PN in den charakteristischen Reifenabrieb-Polygonen.

¹⁴ Die Anteile Reifen- und Straßenabrieb wurden dabei aus der Dichte des gesamten Abriebs und der von Reifen (ca. 1.21 g/cm³) und Asphalt (ca. 2.54 g/cm³) berechnet.

Bei allen Verhältnisfaktoren könnten Abhängigkeiten von Moment, Schlupf und Temperatur und somit von der Verkehrssituation bestehen, die mangels Mess- und Literaturdaten derzeit aber nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 5-5: Verhältnisfaktoren zur Bestimmung anderer Partikelkenngößen aus den PM₁₀ Modellergebnissen für Reifenabriebemissionen

	All veh.	HDV
PM _{2.5} / PM ₁₀	0,50	0,50 ⁽¹⁾
TPM / PM ₁₀	18	18

(1)...Der Mittelwert aus für SNF Reifenabrieb gefundenen Literaturdaten in (Monks, 2019), (Jiang, 2022) und (EMEP, 2019) ergibt für SNF ein Verhältnis PM_{2.5}/PM₁₀ = 0,71. In beiden Fällen war uns keine Rückverfolgung auf eventuell zugrundeliegende Messwerte möglich, daher verwenden wir den durch mehr Messdaten abgesicherten Wert von PKW und LNF.

5.2.3 Generische Kurvenradien

Um den Einfluss der Kurvenradien auf den Abrieb zu testen, wurden für die Standard-RDE Route der TU Graz neben dem Höhenprofil auch die Kurvenradien ermittelt. Die Bestimmung der Radien und die genaue Zuweisung zur momentanen Geschwindigkeit erweist sich allerdings als keine triviale Aufgabe. Falsche Radien bzw. fehlerhafte Zuordnungen zur Geschwindigkeit können zu extremen Reifen-Abriebswerten in der Simulation führen, da ja die Schlupfleistung in Querrichtung proportional zum momentanen Verhältnis $v_{(t)}^2/R_{(t)}$ ist. Hohe Geschwindigkeiten bei engen Radien ergeben daher sehr hohe Abriebwerte.

Die Radien wurden mit zwei Optionen berechnet:

- Aus den GPS-Koordinaten werden je Sekunde drei Punkte bestimmt, für die aktuelle Sekunde wird der Mittelpunkt und Radius des Kreises berechnet, indem für jeden der drei Punkte derselbe Radius als Abstand zum gemeinsamen (zu berechnenden) Kreismittelpunkt festgelegt wird. Die Lösung des Systems aus den drei Gleichungen ergibt x- und y-Punkt des Kreismittelpunktes und damit den Radius. Um die Ungenauigkeit der Lage der einzelnen Punkte zu reduzieren, wurden für die Punkte jeweils 3-Sekunden Mittelwerte vor, um und nach der aktuellen Koordinate gebildet. Um kritische Fehler aus ungenauen GPS-Koordinaten zu Filtern, wurde aus Bau-Richtlinien für Fahrbahnradien eine Funktion für die minimal zulässigen Radien nach Geschwindigkeit gebildet und alle kleineren berechneten Radien auf diesen Minimalwert gesetzt (Abbildung 5-12). Der kleinste Wert ist jeweils der Wendekreis (R=5m bei PKW bzw. R=14m bei LKW).

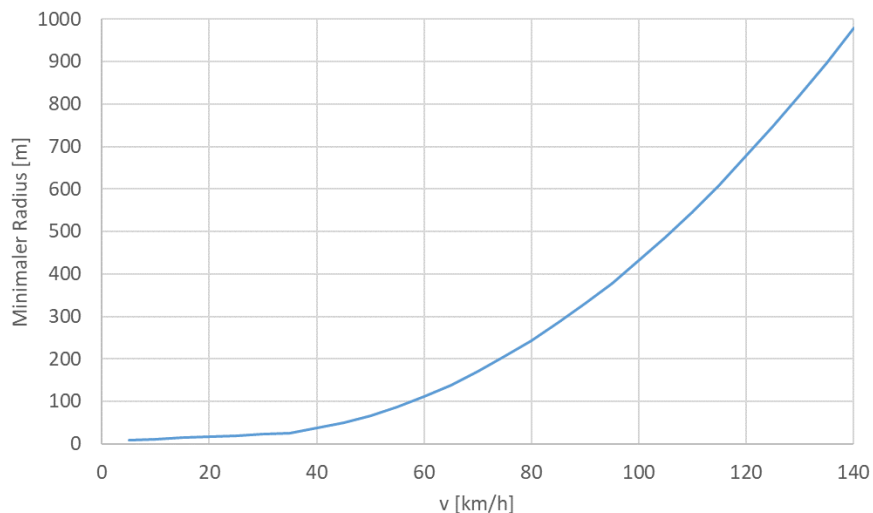


Abbildung 5-12: Funktion für den minimalen Kurvenradius zur Filterung der aus GPS-Signalen berechneten Radien

Da das GPS-Signal auch die Fahrzeuggeschwindigkeit und die aktuelle Seehöhe liefert, ist die korrekte zeitliche Zuordnung durch das Verfahren gesichert. Das Höhenprofil wird im Simulationsmodell PHEM vor weiteren Rechenschritten noch geglättet.

- b) Die GPS Signale wurden ins GIS-System übertragen und die Radien ausgemessen und der gefahrenen Strecke nach x- und y-Koordinaten zugeordnet. Über die Strecke wurden dann Geschwindigkeit und Höhenprofil mit den Radien zusammengeführt.

Abbildung 5-13 zeigt die PKW-RDE Runde in der Straßenkarte. Start und Ende sind in der Stadt Graz, über Bundesstraßen wird dann nach Sinabelkirchen gefahren und über die Autobahn retour nach Graz.

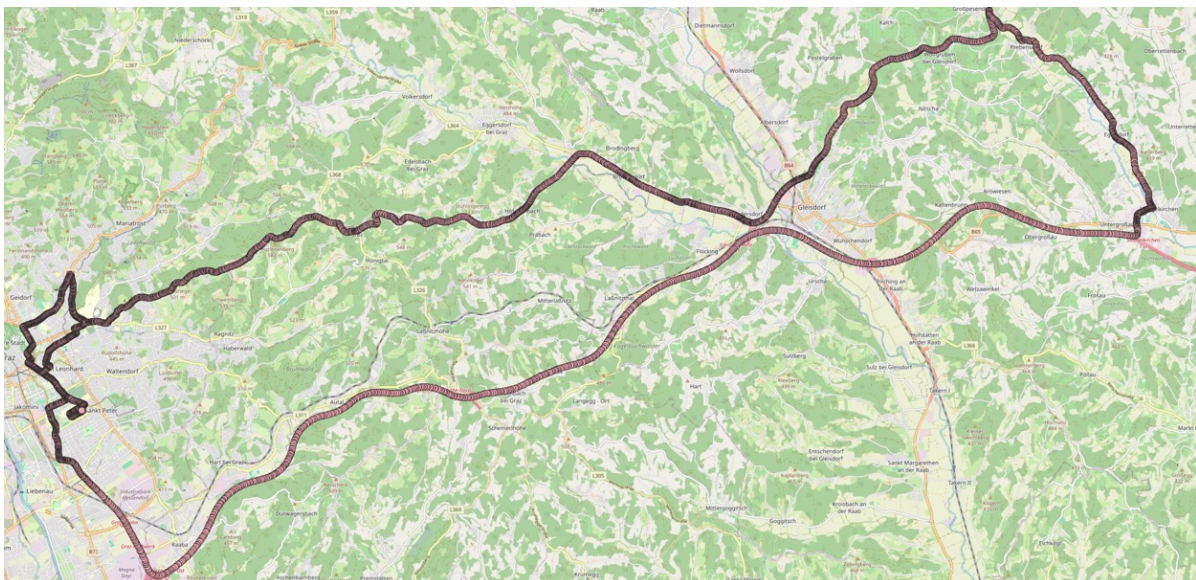


Abbildung 5-13: Streckenverlauf der für PKW verwendeten RDE Route mit Höhenangaben.

Beide Methoden ergeben zwar örtlich unterschiedliche Radien, die gesuchte Funktion für $1/R$ über der aktuellen Geschwindigkeit ist aber mit beiden Datensätzen nahezu ident. Die mittleren Ergebnisse sind im Modell PHEM als generische Gleichungen für PKW, LNF bzw. für SNF hinterlegt, wie nachfolgend beschrieben.

PKW und LNF

Gleichung 5-21:

Bei $v < 100$ km/h $\frac{1}{R} = 6.32 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 - 1.35 \cdot 10^{-4} \cdot v + 7.35 \cdot 10^{-3}$

Bei $v > 100$ km/h: $\frac{1}{R} = 6.32 \cdot 10^{-7} \cdot 100^2 - 1.35 \cdot 10^{-4} \cdot 100 + 7.35 \cdot 10^{-3}$

SNF

Gleichung 5-22 (ergibt in Vergleich zu PKW 20% größeren Radius bei gleichem v):

Bei $v < 100$ km/h $\frac{1}{R} = 5.12 \cdot 10^{-7} \cdot v^2 - 1.125 \cdot 10^{-4} \cdot v + 6.125 \cdot 10^{-3}$

Bei $v > 100$ km/h: $\frac{1}{R} = 5.12 \cdot 10^{-7} \cdot 100^2 - 1.125 \cdot 10^{-4} \cdot 100 + 6.125 \cdot 10^{-3}$

Mit

vGeschwindigkeit in [km/h]

Abbildung 5-14 stellt die Gleichung für PKW grafisch dar. Die Funktion beschreibt die mittleren Radien nach sekundlich gefahrener Geschwindigkeit für die ausgewerteten PKW und LKW Routen. Die Übertragbarkeit auf andere Routen und die Repräsentativität für die HBEFA Verkehrssituationen konnte im Rahmen dieses Projektes nicht geprüft werden. Mangels besserer Daten werden diese Funktionen aber für alle Verkehrssituationen in HBEFA 5.1 verwendet. Die für PKW gefundene Funktion wird auch für L-Kategorie Fahrzeuge verwendet. Aus dem Gefühl für die gefahrenen Strecken sollten die Funktionen einigermaßen durchschnittliche Kurvigkeiten abbilden.

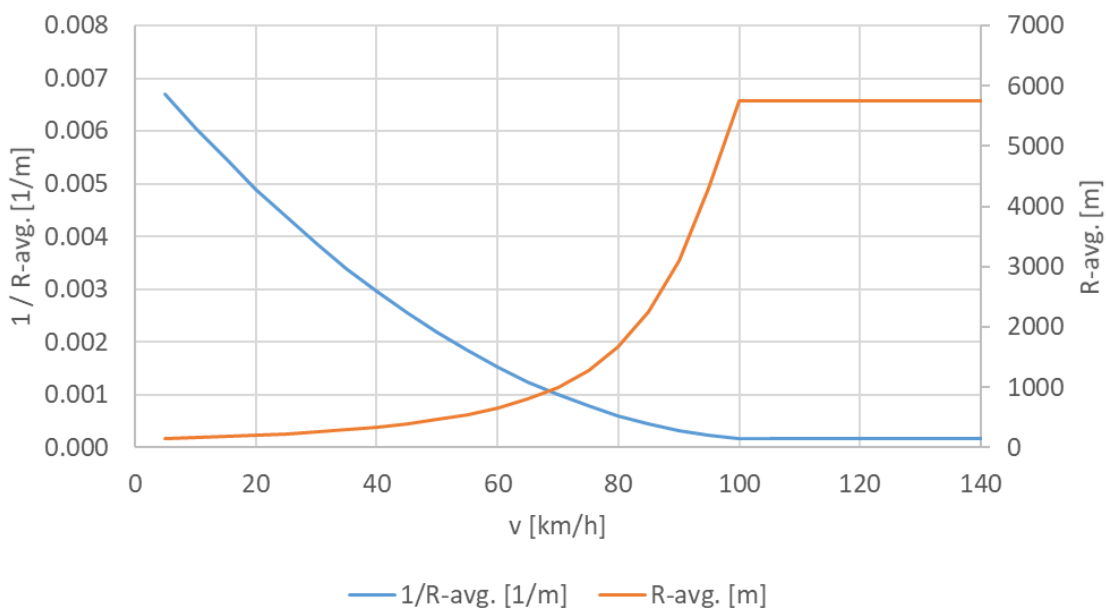


Abbildung 5-14: Generische Funktion für den durchschnittlichen Radius bzw. 1/R für PKW und LNF (für SNF ergibt sich bei gleicher Geschwindigkeit ein um 20% größerer Radius)

Der Benutzer kann entweder eine gerade Strecke wählen (keine Radien oder sehr große Radien im Zyklus-Eingabefile), gemessene Radien, wenn diese im Zyklus-Eingabefile angegeben sind oder die generische Radiusfunktion, wenn diese Option ausgewählt ist und im Zyklus kein Radius angegeben ist.

5.3 Modell für Straßenabrieb

Es ist naheliegend, dass Straßenabrieb den selben grundsätzlichen physikalischen Effekten folgt wie der Reifenabrieb. Dichte und Bindungskräfte von Asphalt sind natürlich anders als von Reifen, so dass die Absolutwerte durchaus unterschiedlich zum Reifenabrieb sein können. Die in Kap. 5.2.1 gezeigten Messdaten vom Innentrommelprüfstand des KIT nach (Schläfle, 2023) und (Schläfle, 2024) beinhalten ja Reifen- und Asphaltabrieb und die Partikelemissionen je Zeit korrelieren sehr gut mit der Schlupfleistung zwischen Rad und Fahrbahn. Wir verwenden daher den selben Ansatz für Straßenabrieb wie für Reifenabrieb. Unsicher sind dabei die Verhältnissfaktoren von Straßen- zu Reifenabriebpartikeln für TPM, PM10, PM2.5 und PN23.

Das Verhältnis von Gesamtpartikelmasse zu NEP aus Straßenabrieb zu Reifenabrieb lag in einer Analyse in (Beji, 2021) bei ca. 1,4 mit starker Abhängigkeit vom Straßenabschnitt. Die Abhängigkeit kann auf großen Einfluss der Straßenbeschaffenheit und/oder der Fahrzustände hinweisen. In (Mellios, 2022) werden für COPERT v5.6 für PKW-Reifenabrieb 6,4 mg/km. für Straßenabrieb 7,5 mg/km angegeben (Faktor 1,2). In (Beddows, 2021) werden die gleichen Emissionswerte für Straßenabrieb allerdings etwas höhere Werte für Reifenabrieb verwendet.

In (Schläfle, 2022) wurden in einem Reifen-Innentrommelprüfstand mit verschiedenen Asphaltbelägen die Abriebemissionen gemessen und gravimetrisch und chemisch analysiert. Das Verhältnis von Straßen- zu Reifenabrieb war bei TPM in Versuchen mit und ohne Reifenumfangskraft im Mittel etwa zwischen 0,8 bis 0,85 mit starkem Einfluss der Fahrbahnrauigkeit.

Für schwere Nutzfahrzeuge finden sich Verhältnissfaktoren zwischen 0,9 (Jiang, 2022) und 2,3 (Beddows, 2021), deren Quellen aber nicht im Detail beschrieben sind.

In (Düring, 2022) wurde das NORTRIP Modell (Non-Exhaust road traffic induced particle emission modelling) basierend auf Abriebversuchen im Labor modifiziert und damit Emissionsfaktoren für den Straßenabrieb berechnet. Für Standardbeläge werden für PKW und LNF PM10 Emissionsfaktoren zwischen 21 mg/Kfz-km (Innerorts Tempo 50) und 51 mg/Kfz-km (Autobahn ohne Tempolimit) angegeben. Für Schwerverkehr reichen die PM10 Emissionsfaktoren aus Straßenabrieb von 88 mg/Kfz-km bis 117 mg/Kfz-km. Mit spezieller Oberfläche aus Einkorn-Gemisch und Polymer-modifiziertem Bitumen wurden etwa 60% geringere Straßenabriebpartikel berechnet. Im Vergleich zu den typischen Emissionsfaktoren für PM10 aus Reifenabrieb (siehe Kap. 3.2.2 und Kap. 6) ergeben die Werte nach (Düring, 2022) für PKW allerdings etwa den Faktor 5 bis 6 zwischen PM10 aus Straßenabrieb und dem aus Reifenabrieb, für LKW etwa den Faktor 4.

(Harrison, 2021) listet in einer Literaturrecherche zu Non-Exhaust Partikeln ein Verhältnis PM2.5 zu PM10 aus Straßenabrieb von 0,54 auf. PM10 aus Straßenabrieb wird in der Größenordnung von wenigen mg/Kfz-km zitiert.

In (Panko, 2019) wurden straßennahe Partikelproben aus London, Tokyo und Los Angeles mittels Tracer für den Anteil des Reifenabriebs untersucht. Demnach bestehen die gesammelten Partikel tendenziell aus Reifenabrieb mit mineralischen Einträgen aus Straßenabrieb (Abbildung 5-15). Die Summe aus Straßen- und Reifenabriebpartikeln an den gesammelten PM2.5 Proben war dabei zwischen 0,1% und 0,7%, bei PM10 war der Anteil zwischen 0,45% und 2,5%. Eine Differenzierung zwischen Reifen- und Straßenabriebpartikeln erfolgte nicht.

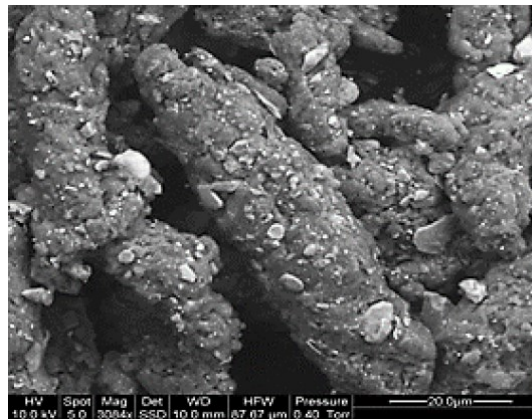


Abbildung 5-15: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (REM) von Reifen- und Straßenabriebpartikeln (TRWP) mit charakteristischer Morphologie von Laufflächengummi und Mineraleinschlüssen vom Straßenabrieb aus (Panko, 2019)

In (Quass, 2008) wurden Luv/Lee Messungen an einem Autobahnquerschnitt in Deutschland durchgeführt. Als Summe für die Nicht-Abgasemissionen wurden damit für PKW 16 mg/Kfz-km und für LKW 68 mg/Kfz-km ermittelt. Anhand einer chemischen Analyse wurden für die Summe aus Straßenabrieb und Aufwirbelung 5 mg/Kfz-km ermittelt, für Reifenabrieb 2 mg/Kfz-km

Aus diesen unsicheren Datengrundlagen, ergibt sich für PKW im Mittel ein Faktor 1,1 von PM10 aus Straßenabrieb zu Reifenabrieb, wenn die Daten aus (Düring, 2022) nicht berücksichtigt werden, andernfalls ein mittlerer Faktor von 2,3. Für SNF ergibt sich aus zwei Literaturstellen ein Faktor von 0,9 bis 2,2 (Beddows, 2021), Jiang, 2022). Wir verwenden daher vorläufig einen Faktor von 1,5 von Straßenabrieb zu Reifenabrieb für alle Kfz-Kategorien.

Daten zu TPM, PM2.5 und PN23 konnte für Straßenabriebpartikel nur in einer Literaturstelle gefunden werden (Simons, 2013). Diese Literatur legt nahe, dass aus Straßenabrieb etwa 50% des Gesamtabriebes PM10 ist und davon wieder etwas unter ca. 50% PM2.5.

Je nach Straßenoberfläche können diese Verhältnisse vermutlich stark von den hier verwendeten Werten abweichen.

Tabelle 5-6: Verhältnisfaktoren zur Bestimmung anderer Partikelkenngößen aus den PM10 Modellergebnissen für Reifenabriebemissionen

	PKW	SNF
PM10 Straßenabrieb / Reifenabrieb	1,5	1,5
PM10/TPM Straßenabrieb	0.50	0.50
PM2.5 / PM 10 Straßenabrieb	0.40	0.40
PN Straßenabrieb / PN Reifenabrieb	0.1	0.1

5.4 Modell für Wiederaufwirbelung

Das Modell für Wiederaufwirbelung wurde hier einfach gehalten, da es sehr von den lokalen Straßenverhältnissen abhängt und ein EU-weiter Durchschnitt damit mit vertretbarem Aufwand kaum bestimmen lässt. Wir haben aus der Literaturstudie die wesentlichsten Einflüsse aus (Denby, 2013) mit einem Ansatz von (Piscitello, 2021) kombiniert und die Parameter so

kalibriert, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeiten getroffen werden, die in (Amato, 2017) in Luv/Lee Messkampagnen an verschiedenen Straßen ermittelt wurden, siehe Abbildung 5-16.

Damit ergab sich ein Einfluss von der Straßenbeladung mit Staub, von der turbulenten Energie aus Luftwiderstand und dem Quadrat der Geschwindigkeit und der Reifenschlupfleistung, da wir annehmen, dass feinsten Staub auch mechanisch beim Reifenkontakt aus den Poren der Straßenoberfläche geschleudert wird. Die daraus abgeleiteten Gleichungen sind nachfolgend dargestellt.

$$E_{rs} = k_{pl} \cdot (k_t \cdot \frac{A_{veh} \cdot v^2}{2} + k_s \cdot P_s)$$

- Mit
- k_{pl}Konstante, die die Staubbeladung der Straße definiert [mg/h] = 3
 - k_tKonstante, die Anteil turbulenter Energie definiert [s²/m⁴] = 1.1
 - k_sKonstante, die mechanischen Anteil definiert [1/W] = 3.1E+06
 - A_{veh}Querschnittsfläche Fahrzeug [m²]
 - vFahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
 - P_sSchlupfleistung zwischen Reifen und Fahrbahn [W]
 - E_{rs}Emissionsfaktor Wiederaufwirbelung [mg/h]

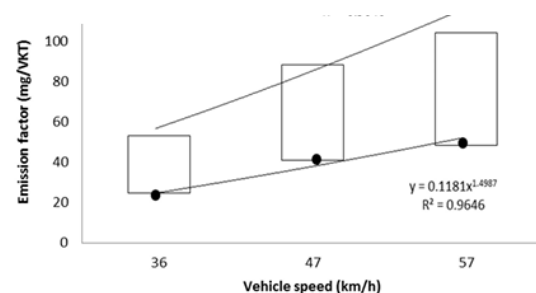
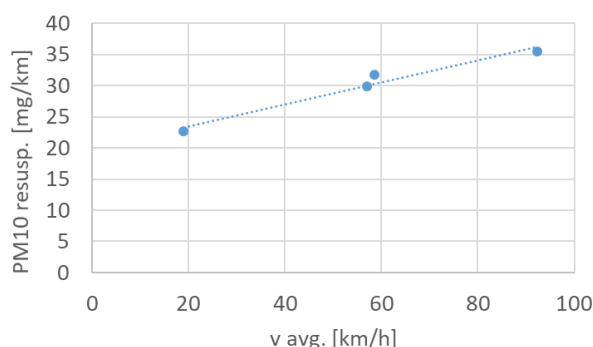


Abbildung 5-16: Linkes Bild:: Mit dem Modell berechnete Wiederaufwirbelungsemissionen eines PKW Otto Euro 6 in Abhängigkeit von der Zyklusgeschwindigkeit für die TU Graz RDE Route innerorts, Ausserorts und Autobahn sowie insgesamt; **rechtes Bild:** Geschwindigkeitsabhängigkeit nach (Amato, 2017)

Die o.a. Parameter für die Masse- und Anzahlemissionen aus Wiederaufgewirbelten Partikeln sind in Tabelle 5-7 zusammengefasst.

Tabelle 5-7: Parameter für die Berechnung der Wiederaufwirbelungsemissionen

	für PM10	für PN
A_{veh}	2.2	2.2
k_{pl}	3.0	1.90E+08
k_t	1.1	1.10E+00
k_s	3.10E+06	3.10E+06
PM2.5/PM10	35%	-

Beispiele für die Damit berechneten Wiederaufwirbelungsemissionen sind in Kap. 6 beschrieben.

6 Beispiel Modellergebnisse

Die in Kap. 5 beschriebenen Methoden und Eingabedaten wurden in der Software und im Datensatz des Kfz-Emissionsmodells PHEM integriert. Damit können neben den Abgasemissionen und dem Energieverbrauch jetzt auch Brems- und Reifenabriebemissionen berechnet werden.

Zur Plausibilisierung und Darstellung der Modellergebnisse wurden RDE Testfahrten mit den Fahrzeugdaten des HBEFA simuliert. Dabei wurde je ein Zyklus für PKW (Abbildung 6-1) und für SNF im gemischten verkehr (Abbildung 6-2) und ein Buszyklus (Abbildung 6-3) verwendet.

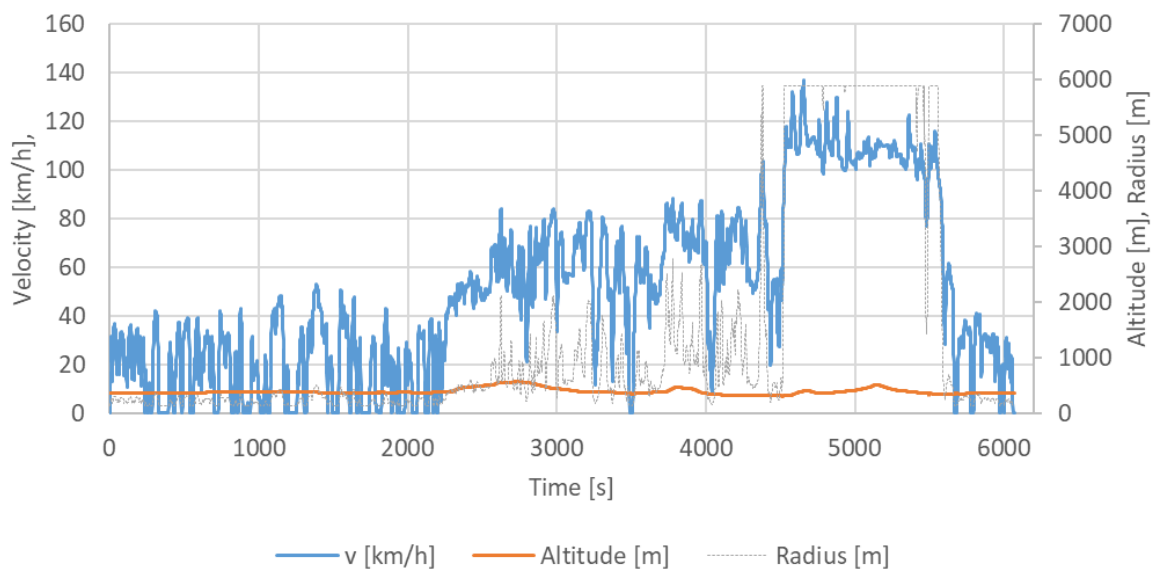


Abbildung 6-1: RDE Fahrt für PKW verwendet in den Beispielen für Ergebnisse

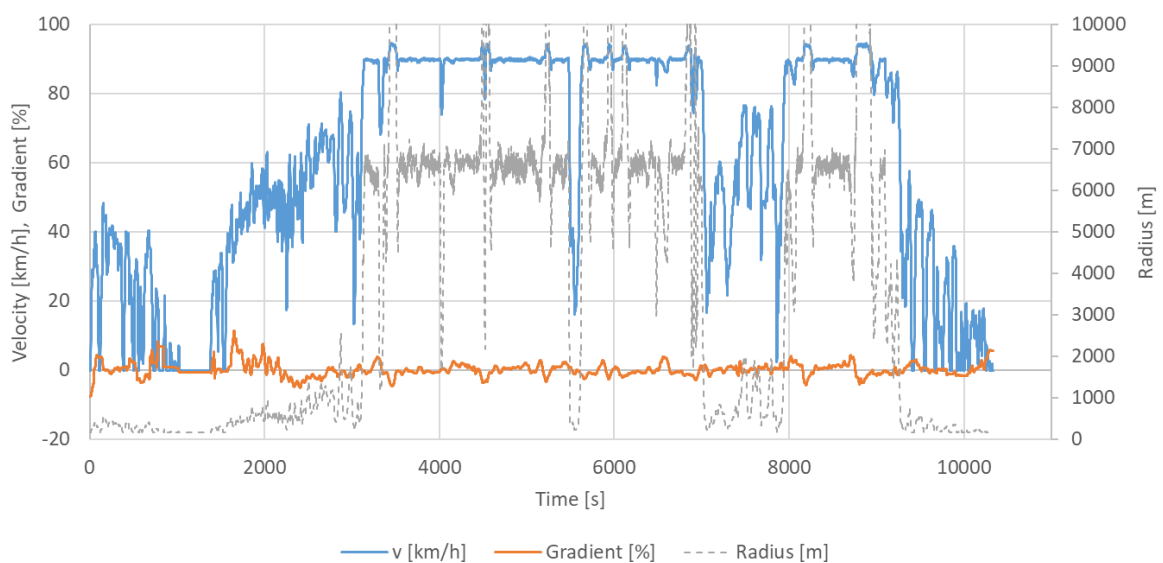


Abbildung 6-2: RDE Fahrt für SNF verwendet in den Beispielen für Ergebnisse

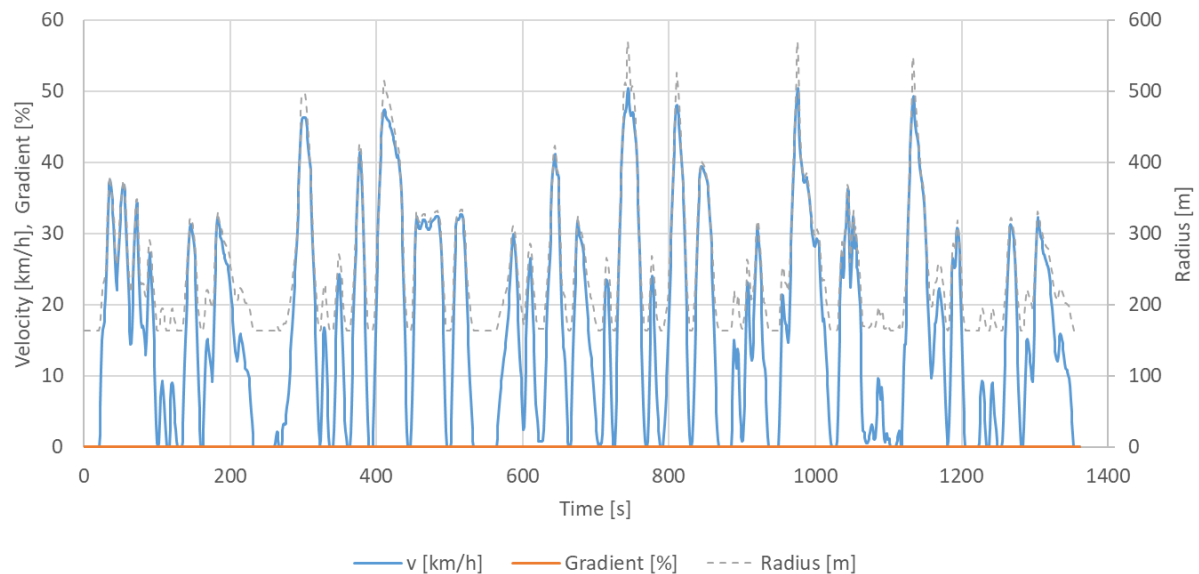


Abbildung 6-3: Grazer Stadtbuss Fahrt für Busse und Verteiler LKW verwendet in den Beispielen für Ergebnisse

6.1 PKW Bremsabrieb

Tabelle 6-1 zeigt die Ergebnisse zum Bremsabrieb berechnet mit PHEM im Vergleich zu den Literaturdaten. Es wurde jeweils ein Otto-PKW, ein Diesel PKW und ein BEV im RDE-Zyklus und im WLTP-Brake-Cycle simuliert. Zu beachten ist, dass in PHEM die realen Bremsleistungen unter Berücksichtigung der Fahrwiderstände im WLTP verwendet werden während im WLTP-Messverfahren die Fahrwiderstände nur mit einem pauschalen Faktor von der aus der Fahrzeug Masse und dem Geschwindigkeitsverlauf berechneten Verzögerungsleistung berücksichtigt werden. Die Simulationsergebnisse liegen jeweils in der Nähe der Mittelwerte der Literaturdaten, in denen hier nur konventionelle PKW dargestellt sind. Lediglich die PN Emissionswerte sind in der Simulation für den WLTP-Brake-Cycle merklich höher, über alle Testzyklen aber merklich niedriger als die Literaturwerte, welche aber stark streuen (Kap. 3.1.2). Da die Literaturdaten ebensolche Unsicherheiten bezüglich des Mittelwertes aufweisen wie die Basisdaten für die charakteristischen Polygone zum Bremsabrieb in der PHEM-Simulation, wurde auf eine Kalibrierung der Polygone verzichtet.

Tabelle 6-1: Vergleich der simulierten Bremsabriebemissionen von ECE Bremsbelägen mit Ergebnissen aus der Literaturstudie

	Test Masse [kg]	TPM [mg/km]	PM 10 [mg/km]	PM2.5 [mg/km]	PN [# /km]
RDE PHEM Otto	1436	80.4	16.1	8.0	2.3E+10
RDE PHEM Diesel	1945	94.9	19.0	9.5	2.8E+10
RDE PHEM BEV	1860	11.6	2.3	1.2	2.6E+09
WLTP PHEM Otto	1436	85.4	17.1	8.5	2.2E+10
WLTP PHEM Diesel	1945	101.8	20.4	10.2	2.7E+10
WLTP PHEM BEV	1860	12.8	2.6	1.3	2.8E+09
Literatur konv. PKW					
Literatur Minimum	1436	11.2	1.4	0.6	2.1E+08

	Test Masse [kg]	TPM [mg/km]	PM 10 [mg/km]	PM2.5 [mg/km]	PN [# /km]
Literatur Mittelwert	1945	51	16.7	7.3	9.3E+10
Literatur Maximum	1860	385	49.6	24	1.7E+11
Literatur konv. PKW					
Lit. Min. WLTP		77.8	4.0	3.5	4.0E+09
Lit.MW. WLTP		87.9	18.8	11.2	1.3E+10
Lit. Max. WLTP		98.0	49.6	24.0	3.4E+10

6.2 PKW Reifenabrieb

Tabelle 6-2 zeigt die für die PKW-RDE Runde der TU Graz berechneten Reifenabriebemissionen für einen durchschnittlichen PKW-Otto Euro 6ab (Fahrzeugdaten nach HBEFA). Die Simulation mit Kurvenradien führt etwa zur dreifachen Abriebemission wie die ohne Radien. Mit 6,0 mg PM10/km liegt das Ergebnis für den 1/3-Mix aus Innerorts, Ausserorts und Autobahnergebnis etwa beim Mittelwerte der Emissionsfaktoren aus der Literatur. Für das mit 1925 kg inklusive Beladung deutlich schwereren Euro 6ab Diesel PKW ergeben sich 6,9 mg/km für das mit 1860 kg etwas gleich schwere BEV 6,84 mg/km. TPM und PM2.5 wurden mit den Verhältnissfaktoren aus Tabelle 5-5 aus dem PM10 Ergebnis berechnet, PN23 aus dem charakteristischen Polygon für PN.

Tabelle 6-2: Ergebnisse des Reifenabriebmodells für den generischen PKW Otto Euro 6ab mit 1237 kg inkl. Beladung für die gefahrene RDE Route mit Radius-Funktion und ohne Kurvenradien im Vergleich zu mittleren Literaturdaten

	TPM [mg/km]	PM 10 [mg/km]	PM2.5 [mg/km]	PN [# /km]
PHEM, 1/3 Mix Radius-Funktion	108	6.0	3.0	6.1E+10
PHEM, Keine Kurven	41	2.3	1.1	2.3E+10
PHEM Stadt, Radius-Funktion	134	7.5	3.7	7.6E+10
PHEM Stadt, keine Kurven	70	3.9	1.9	4.0E+10
PHEM Road Radius-Funktion	114	6.3	3.2	6.4E+10
PHEM Road, Keine Kurven	33	1.8	0.9	1.8E+10
PHEM Autobahn, Radius-Funktion	76	4.2	2.1	4.3E+10
PHEM Autobahn, keine Kurven	21	1.2	0.6	1.2E+10
Literatur Minimum	5.7	1.5	0.2	9.1E+09
Literatur Maximum	183.3	8.7	6.1	1.1E+11
Literatur Mittelwert	96.4	6.1	3.7	6.0E+10
Aus Reifenlebensdauer	120	6.7	3.3	6.0E+10
PHEM Euro 6ab Diesel PKW 1/3 Mix Radius-Funktion	124	6.9	3.5	7.0E+10
PHEM BEV PKW 1/3 Mix Radius-Funktion	123	6.8	3.4	7.0E+10

Der hier berechnete starke Einfluss von Kurven auf die Abriebemissionen von PKW wurde auch in (Charbuillot, 2023) durch On-Board-Messungen mit Absaugung der Partikel hinter dem

Reifen gezeigt. Die Partikelanzahl war dabei in engen Kurven um mehr als eine Größenordnung höher als bei relativ geraden Strecken.

6.2.1 Einflüsse durch generische Radiusfunktion auf Reifenabrieb

Die generische Radius-Funktion führt bei der Anwendung allerdings dann zu Artefakten, wenn sich die Geschwindigkeit auf einer fixen Strecke z.B. wegen Änderung der Verkehrsmengen oder Tempolimits ändert. Die generische Radius-Funktion ordnet niedrigeren Geschwindigkeiten ja automatisch engere Kurvenradien zu.

Da die Fahrzyklen je Verkehrssituation jeweils aus einem Pool an gemessenen Zyklen gebildet wurden und nicht für die gleichen Strecken, ist eine Zuordnung von Radien zu den HBEFA Verkehrssituationen nicht eindeutig möglich. Z.B. wären für die Verkehrssituation „Innerorts HVS“ für Verkehrsstärke LOS 1 bis LOS 5 für die Anwendung auf jeweils dieselbe Strecke auch dieselben Radien zu hinterlegen. Da die Zyklen aber von verschiedenen Strecken stammen, ist das nicht einfach möglich. Bei der Anwendung für das HBEFA kann die generische Radiusfunktion bei folgenden Situationen zu einem fehlerhaften relativen Reifenabrieb führen:

- Gleiche Strecke bei unterschiedlichen LOS. In diesem Fall wären die wegen der geringeren Geschwindigkeit engeren Radien bei höherer Verkehrsdichte ein Artefakt. Vergleicht man verschiedene Strecken, wo die Kapazität wegen z.B. geringerer Kreuzungsabstände, mehr Abbieger (enge Radien) etc. unterschiedlich ist, wäre das Ergebnis mit der generischen Radiusfunktion vermutlich passend.
- Gleiche Straßenkategorie bei unterschiedlichen Tempolimits. Falls ein niedriges Tempolimit wegen einer kurvigen Strecke verhängt ist, wäre die generische Radius-Funktion wiederum passend.

Da in HBEFA 5.1 erstmals Reifenabrieb auch als Funktion der Kurvenradien berechnet wird, wurde beschlossen, die einfache Radiusfunktion über alle Verkehrssituationen anzuwenden. Eine gut vergleichbare Radius-Zuordnung wäre bei Bedarf für HBEFA 5.2 zu entwickeln, für die erste Anwendung in HBEFA 5.1 war keine umfangreiche Arbeit zu den Radien vorgesehen. Bei Bedarf können lokale Situationen mit der Software PHEM jederzeit individuell simuliert werden¹⁵.

Um den potenziellen Fehler bei den o.a. zwei Fällen abzuschätzen, wurde die PKW-RDE-Runde, aus der die generische Kurvenfunktion abgeleitet wurde mit zwei Varianten berechnet:

- a) Mit den Ist-Radien wurden verschiedene Geschwindigkeiten simuliert (von -70% bis +20% gegenüber der Messfahrt, welche bezüglich Verkehrsdichte zwischen „Free-Flow“ und „Heavy“ einzustufen ist. Dieses Ergebnis ist das korrekte, wenn Änderungen des LOS auf gleicher Strecke betrachtet werden sollen
- b) Die Strecke und Geschwindigkeitsverläufe aus a). jedoch jeweils mit der generischen Radius-Funktion. Diese Variante ergibt engere Radien bei sinkender Geschwindigkeit.

Abbildung 6-4 zeigt die Ergebnisse für Variante a) für EURO 6ab PKW im Mix aus Otto- und Dieselantrieb und die Abweichung der Ergebnisse der Berechnungsmethode b) zur Methode

¹⁵ Dies gilt auch für spezielle Steigungen, Geschwindigkeiten, Fahrzeugbeladungen etc. Kontakt: hausberger@ivt.tugraz.at bzw. <https://www.itna.tugraz.at/forschung/bereiche/em/>

a). Zu erkennen ist, dass mit Methode a) der Reifenabrieb je Stunde mit steigender Geschwindigkeit auf dieser Strecke stetig steigt (blaue Linie), die Emissionen je km in Richtung niedrigerer Geschwindigkeiten aber wieder etwas zunehmen. Ursache ist der quadratische Einfluss der Geschwindigkeit auf die Fliehkräfte (Querdynamik) und den Luftwiderstand (Längsdynamik). Mit der generischen Kurvenfunktion nimmt der Reifenabrieb je km mit sinkender Geschwindigkeit wegen der enger werdenden Radien dagegen stetig zu. Bei einer Halbierung der Geschwindigkeit ergibt die Rechenoption mit generischer Radiusfunktion 33% höheren Reifenabrieb als die Option mit konstanten Radien, danach sinkt die Abweichung wieder ab.

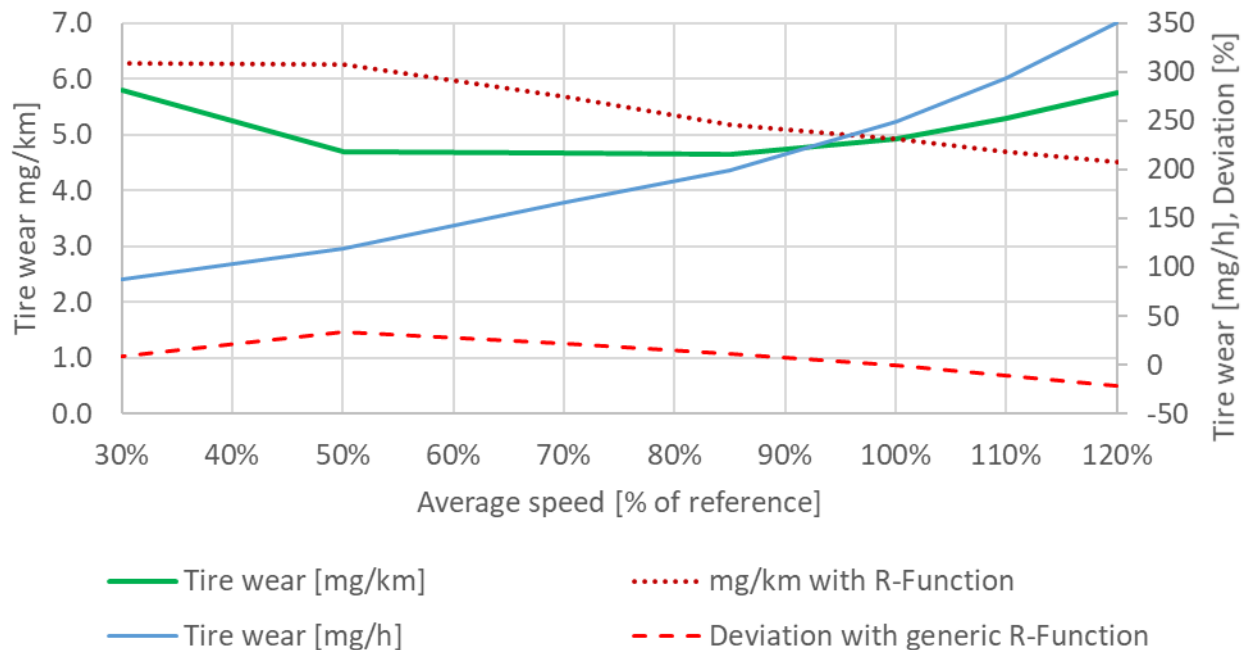


Abbildung 6-4: Mit PHEM berechnete Reifenabriebemissionen bei Variation der Zyklusgeschwindigkeit mit gemessenen Radien im RDE Zyklus und Abweichung mit der Radiusfunktion (Artefakt Ergebnis)

6.3 PKW Summe aller Non-Exhaust Emissionen

Abbildung 6-5 fasst die Summe der für die Euro 6 PKW im RDE Zyklus simulierten Non-Exhaust Emissionen zusammen. An den PM₁₀ Emissionen haben demnach die Wiederaufwirbelung (ca. 50%) und Bremsabrieb (ca. 27%) die höchsten NEP Anteile, bei PN₂₃ ergeben sich (unerwartet) die höchsten Anteile für Reifenabrieb (65%) gefolgt von Bremsenabrieb (27%). Das HBEFA 4.2 gibt für Non-Exhaust PM von PKW im Mittel 30mg/km an. Das entspricht etwa dem NEP Wert mit PHEM berechnet ohne Wiederaufwirbelung.

Für PM_{2.5} ergibt PHEM für den RDE Zyklus ohne Wiederaufwirbelung 15.4 mg/km als Mittel für Otto- und Diesel PKW. HBEFA 4.2 gibt für PM_{2.5} im Mittel 12 mg/km an. PN für Non-Exhaust werden im HBEFA nicht ausgegeben.

Insgesamt liegen die Größenordnungen der mit den neuen Methoden berechneten NEP also gut im Bereich der Literaturstellen. Der wesentliche Vorteil der neuen Methoden ist, dass sie beliebige Fahrzyklus/Fahrzeugkombinationen simulieren können und mit neuen Messdaten einfach erweitert werden können.

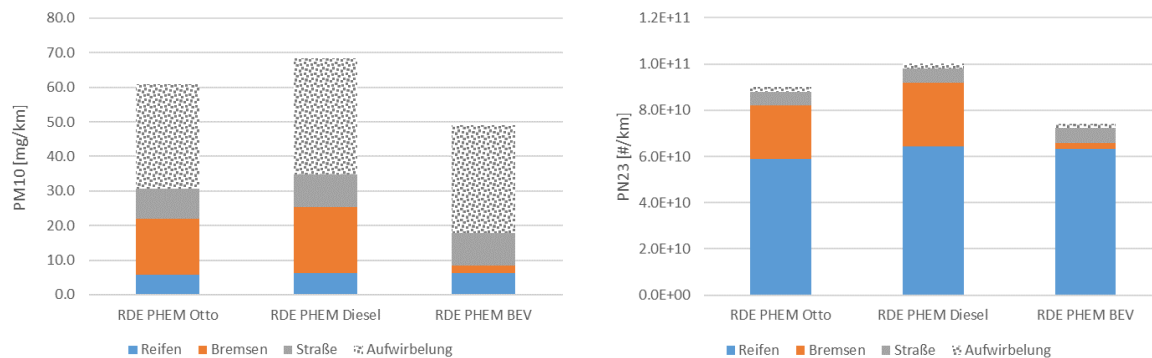


Abbildung 6-5: Gesamte NEP Emissionen von Euro 6 PKW im RDE Zyklus berechnet mit PHEM (PM10 linkes Bild, PN23 rechtes Bild)

6.4 LKW Summe aller Non-Exhaust Emissionen

Abbildung 6-6 zeigt die beispielhaft simulierten Ergebnisse für ausgesuchte schwere Nutzfahrzeuge. Die Fahrzeugdaten wurden wie in HBEFA für durchschnittliche Beladung gewählt. Dazu sind auch die Mittelwerte aus der Literaturstudie abgebildet. Für schwere Nutzfahrzeuge sind die Literaturangaben allerdings meist ohne nähere Erklärung der Quelle und des Fahrzeugzustandes angegeben, so dass wir trotz hoher Unsicherheiten eher den hier mit PHEM simulierten Werten vertrauen als der Literatur.

Im HBEFA 4.2 sind die NEP nur als Summe angegeben. Insgesamt sind das im Mittel 310 mg/km PM10 für Stadtbusse und 160 mg/km PM10 für HGVs. Diese Summenwerte passen relativ gut zu den hier für die ausgesuchten Zyklen berechneten Werte.

Im Vergleich zu den Abgasemissionen, die bei EURO VI D etwa bei 2 bis 5 mg/km PM10 liegen, sind die NEP Emissionen jedenfalls auch bei SNF dominant.

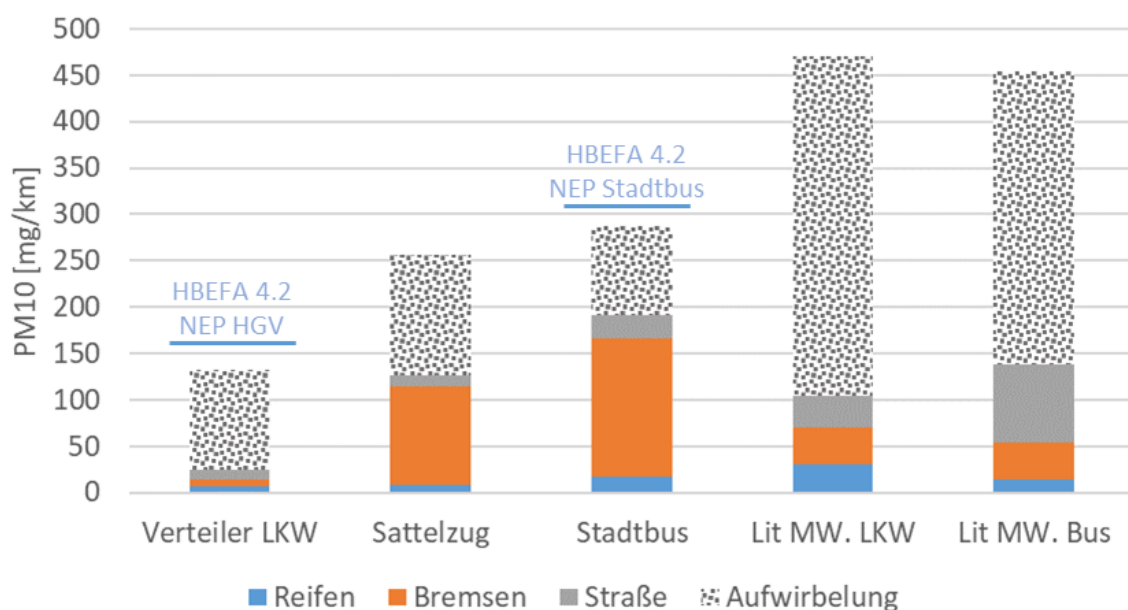


Abbildung 6-6: Gesamte NEP PM10 Emissionen von Euro 6 Schweren Nutzfahrzeugen im gemischten Zyklus (LKW & Sattelzug) und im Buszyklus (Stadtbus) berechnet mit PHEM im Vergleich zu mittleren Literaturangaben (Lit.)

Im Vergleich zur Literatur liegen die Werte für Straßenabrieb und Aufwirbelung deutlich niedriger (Tabelle 6-3). Eventuell ist das eine Ursache von älteren Literaturdaten mit Anteiligem Streusplit in Winterdienst und Reifen mit Spikes in nordischen Ländern. Die Modellparameter für Straßenabrieb und Aufwirbelung in PHEM wurden ja mit Literaturdaten für PKW kalibriert und sind für schwere Nutzfahrzeuge unverändert übernommen. Aus derzeitiger Sicht besteht kein Anlass anzunehmen, dass bei schweren Nutzfahrzeugen völlig andere Zusammenhänge von Straßenabrieb und Wiederaufwirbelung zu Reifen-Schlupfleistung und turbulenter Energie bestehen als bei PKW. Eine Erklärung wäre eventuell die größere Fahrzeugbreite und damit verbunden ein häufigerer Reifenkontakt mit Ablagerungen am Straßenrand. Dieser Effekt könnte durch den Parameter, der die Straßenbeladung mit Staub beschreibt für das Nutzfahrzeugmodell angepasst werden. Dafür wäre allerdings eine umfangreichere Recherche zu NEP von schweren Nutzfahrzeugen notwendig um nicht einen unsicheren Wert durch einen ähnlich unsicheren anderen Wert zu ersetzen.

Da die Summenwerte gut mit den bisherigen HBEFA Daten übereinstimmen, werden vorerst keine weiteren Kalibrierungen am PHEM Datensatz für SNF vorgenommen. Ein Fortschreiben der Datensammlung um die Flottenmittelwerte besser abzusichern wird wegen der hohen Anteile der NEP an PM10 empfohlen.

Tabelle 6-3: Ergebnisse für NEP von schweren Nutzfahrzeuge aus der Simulation mit PHEM im Vergleich zu Mittelwerten, Minima und Maxima aus der Literaturstudie

PM10	Gesamt Masse [t]	Zyklus	Reifen	Bremsen	Straße	Auf-wirbelung	Summe
Verteiler LKW	8.578	ISC	7	8	10	107	132
Sattelzug	30.59	ISC	8	107	12	130	257
% an Summe MW.			4%	30%	6%	61%	100%

PM10	Gesamt Masse [t]	Zyklus	Reifen	Bremsen	Straße	Auf-wirbelung	Summe
Verteiler LKW	8.578	Stadtbus	16	123	24	93	255
Stadtbus	10.77	Stadtbus	17	150	25	96	287
% an Summe MW.			6%	50%	9%	35%	100%

Literaturdaten

Minimum LKW			17	7	200	225
Mittelw. LKW			31	39	400	470
Maximum LKW			47	130	1268	1446
Minimum Busse			13	25	394	431
Mittelw. Busse			15	40	400	455
Maximum Busse			17	68	1268	1353

Zu PN23 Emissionen von SNF wurden keine Literaturdaten gefunden. Die Ergebnisse aus der Simulation sind in Abbildung 6-7 dargestellt. Bei PN23 sind Reifen- und Bremsenabrieb gegenüber Straßenabrieb deutlich dominant. Die Unsicherheit zu PN23 im Straßenabrieb und Wiederaufwirbelung ist allerdings sehr hoch. Im Vergleich zu Abgas PN23, die bei EURO VI SNF etwa bei $1E+11$ liegen, sind die NEP auch bereits eine sehr relevante Emissionsquelle.

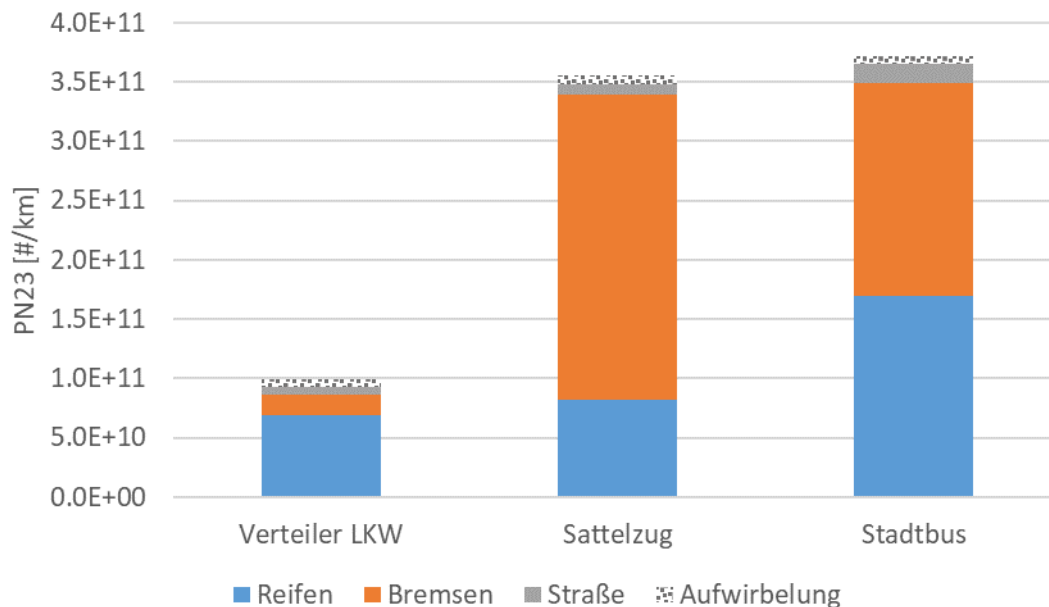


Abbildung 6-7: Gesamte NEP PN 23 Emissionen von Euro 6 Schweren Nutzfahrzeugen im gemischten Zyklus (LKW & Sattelzug) und im Buszyklus (Stadtbuss) berechnet mit PHEM (PM10 linkes Bild, PN23 rechtes Bild)

7 Zusammenfassung und Empfehlungen

In dem Bericht wird ein neues Modell für die Berechnung von Non-Exhaust PM- und PN-Emissionsfaktoren (NEP) vorgestellt, das für alle Kfz-Kategorien, Antriebsarten, Größenklassen und Verkehrssituationen angewendet werden kann. Da es auf physikalischen Zusammenhängen beruht und aus heutiger Sicht die wesentlichsten Abhängigkeiten berücksichtigt, sind die Ergebnisse zwischen Kfz-Kategorien, Beladungen etc. über alle Verkehrssituationen auch vergleichbar und stimmig.

Die NEP werden aus den von Reifen bzw. Bremsen übertragenen Schlupfleistungen mittels charakteristischer Polygone berechnet. Die Polygone können in Zukunft einfach mit weiteren Messdaten erweitert und bei Vorliegen entsprechender Daten auch nach Häufigkeitsverteilungen von Bremsbelägen/Scheiben bzw. Reifentypen in der Flotte gewichtet werden.

Derzeit stammen die charakteristischen Polygone aus Messdaten von wenigen Bremsbelägen am Bremsenprüfstand bzw. aus sehr inhomogenen Messdaten bei Reifenabrieb.

Durch die hier durchgeführten Messungen an PKW-, LKW- und Motorradreifen zum Abriebverhalten konnte die Messdatenbasis wesentlich erweitert werden. Da die Abriebemissionen der LKW- und Motorradreifen, eingetragen in die charakteristischen Polygone für das Simulationsmodell im Bereich der Streuung der PKW-Reifenabriebemissionen liegen, werden die gemittelten Reifenpolygone für alle Kfz-Kategorien verwendet. Wegen der großen Streuung der Messdaten an C1 Reifen (PKW und LNF) erscheint es nicht sinnvoll, LKW und Motorräder mit Messdaten an jeweils nur einem Reifenmodell separat zu bedaten.

Aktuelle Messergebnisse zu Reifen- und Asphaltabrieb am KIT erlaubten eine fundiertere Analyse der Mechanismen der Reifenabriebemissionen. Daraus resultierte ein neues Reifenabriebmodell, dass die Schlupfleistung als wesentliche erklärende Größe verwendet.

Das Modell erfordert zur Bedatung neben der Erfassung der Abriebemissionen auch die Messung der Kräfte am Reifen in x-, y- und z-Richtung sowie die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Reifenumfang und Straße bzw. Rollenprüfstand (Schlupf). Letzterer Wert wurde in den bislang gesammelten Daten nicht systematisch erfasst und sollte in kommenden Messkampagnen berücksichtigt werden.

Die Modellergebnisse liegen für PKW im Mittel im Bereich der Literaturdaten, bei SNF bestehen deutliche Abweichungen. Allerdings wurden keine fundierten und für die EU-Flotte repräsentativen Daten zu NEP von SNF in der Literaturstudie gefunden.

Bei schweren Nutzfahrzeugen wird der Bedarf an mechanischer Bremsleistung wesentlich durch die Bremsleistung der Retarder- und Motorstaubremsen vermindert. Mit dieser Studie konnte erstmals ein Modell entwickelt werden, das die Anteile mechanischer Bremsen und der Dauerbremsen basierend auf Messdaten abbildet. Wegen des großen Einflusses der Dauerbremsen wären hier noch weitere Messungen empfehlenswert. Diese können bei Abgas-RDE-Tests an SNF relativ kostengünstig mit erfasst werden, wenn bei dem getesteten LKW über die OBD-Schnittstelle Zugang zu den entsprechenden Daten möglich ist.

Wegen der Aktivitäten zur Entwicklung genormter Testverfahren und auch von Emissionsgrenzwerten für Reifen- und Bremsabriebemissionen in der EU, nehmen die Messaktivitäten und auch die Menge und Qualität der Daten und Publikationen zu den Non-Exhaust Partikeln EU-weit deutlich zu. Analog zu den Datensammlungen an Abgasemissionen sollten auch die damit entstehenden Messdaten zu Bremsen- und Reifenabrieb systematisch erfasst werden, um die flottendurchschnittlichen Emissionswerte besser abzubilden. Die bisher gemessenen PM₁₀ und PN Abriebemissionen streuen ähnlich wie die Abgasemissionen, so dass auch bei NEP eine ausreichende Stichprobe gemessen werden muss, um den Flottendurchschnitt abzusichern.

Die in Euro 7 geplante Testmethode für Reifenabrieb nach UNR 117 misst nur den gesamten Verschleiß und wird daher keine Daten zu PM₁₀, PM_{2.5} und PN Abriebemissionen liefern. Um die Emissionsniveaus luftgetragener Partikel aus Reifenabrieb in Zukunft besser quantifizieren zu können, wäre auch ein Standard-Messverfahren wünschenswert, dass zusätzlich zu der Methode für den gesamten Abrieb nach UNR 117, auch PM₁₀, PM_{2.5} und PN für definierte Fahrzustände repräsentativ erfassen kann. Die bisher vorliegenden Messdaten suggerieren, dass der Anteil von Reifen an PN und PM₁₀ nicht zu vernachlässigen ist, wobei einige Reifenmodelle nahezu keine Feinpartikel erzeugen, andere dagegen signifikante Mengen. Inwieweit dieses Verhalten auf der Straße gleich wie am Prüfstand auftritt ist derzeit noch offen. Insgesamt ist die Datenlage zu den Abriebpartikelemissionen von Reifen und auch Straßen und insbesondere zu deren Differenzierung nach Größenklassen unsicher. Zur Erarbeitung detaillierter Emissionsmodelle wären Prüfstandmessungen geeignet, da dabei Lastprofile etc. genau definiert sind. Allerdings ist bislang kein Prüfstandaufbau bekannt, der die luftgetragenen Abriebemissionen abgesichert repräsentativ für die realen Straßenzustände nachbilden kann. Insbesondere könnte die Rollenerfläche und deren Temperatur gegenüber den Straßenzuständen und auch zwischen verschiedenen Prüfständen sehr unterschiedlichen Abrieb verursachen. Bei Straßenmessungen kann nur sehr aufwändig zwischen Reifen- und Bremsenabrieb, Straßenabrieb, Abgas und anderen Partikeln auf der Straßenerfläche unterschieden werden. Bei On-Board-Probenahmen ist zudem generell unsicher, welcher Anteil der Abriebemissionen abgesaugt wird und welcher Anteil aus der Hintergrundbelastung stammt. Hier ist also noch einiger Forschungsbedarf gegeben. Eine Abstimmung nationaler Projekte im Rahmen der HBEFA Gruppe wäre dabei sicher sinnvoll.

Die hier beschriebenen Methoden zur Simulation der NEP sind im Softwaretool PHEM integriert und erlauben eine effiziente Berechnung der Partikelemissionen aus Bremsen-, Reifen- und Straßenabrieb sowie aus Wiederaufwirbelung. Der modulare Aufbau des Modells erlaubt eine einfache Integrationen weiterer Messdaten. Damit wurde eine zukunfts-fitte Möglichkeit geschaffen, die Non-Exhaust-Partikel des Straßenverkehrs mit relativ geringem Aufwand viel besser als bisher zu erfassen und repräsentative Emissionsfaktoren zu erzeugen.

Um die hohen Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für nicht-Abgaspartikel einzugrenzen, könnte die hier entwickelte Simulationsmethode verwendet werden, um die Verkehrsemissionen für Straßen mit schon verfügbaren Immissionsmessdaten mit Quellenzuordnung zu simulieren und mittels Ausbreitungsrechnung mit den gemessenen Immissionskonzentrationen zu vergleichen. Ein solcher Vergleich für mehrere Messstellen, sollte mögliche signifikante Abweichungen und eventuelle Ursachen erkennen lassen. Eine solche Analyse ist im Rahmen eines laufenden FVV-Projektes für zwei Luftgütestationen bereits vorgesehen.

8 Literaturverzeichnis

- Amato F., et.al.: Characterization of Road Dust Emissions in Milan: Impact of Vehicle Fleet Speed; *Aerosol and Air Quality Research*, 17: 2438–2449, 2017
- Baensch-Baltruschat, Kocher B., et.al.: Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment; *Science of the Total Environment* 733 (2020) 137823
- Beddows D.C.S., Roy H.: PM10 and PM2.5 emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles; *Atmospheric Environment* 244 (2021) 117886
- Beji A., Deboudt K., et.al.: Determinants of rear-of-wheel and tire-road wear particle emissions by light-duty vehicles using on-road and test track experiments; *Atmospheric Pollution Research* 12 (2021) 231–244
- Beji A., K. Deboudt b, S. Khardi a, B. Muresan a,*, L. Lumi`ere a: Determinants of rear-of-wheel and tire-road wear particle emissions by light-duty vehicles using on-road and test track experiments; *Atmospheric Pollution Research* 12 (2021) 231–244
- Bejia A., K. Deboudtb, S. Khardia, B. Muresana, P. Flamentb, M. Fourmentinb, L. Lumi`erea: Non-exhaust particle emissions under various driving conditions: Implications for sustainable mobility; *Transportation Research Part D* 81 (2020) 102290
- Bittermann A.: *Entwicklung einer neuartigen Methode zur Optimierung des Emissionsverhaltens von Diesel PKW im Rahmen der EU-RDE-Gesetzgebung*; Dissertation an der Technischen Universität Graz; 2019
- Buschmeier J., Oelze B.: Influence of tire size and vehicle load on abrasion rate and mileage of passenger car tires; *VDI Reports No* 2398; 2022
- Denby B.R. et. Al.: NORTRIP emission model concept and process; *Atmospheric Environment* 77 (2013) 283-300
- ECE, 2023: United Nations Economic and Social Council: Proposal for Supplement 02 to the 04 series of amendments to UN Regulation No. 117; Submitted by the Task Force on Tyres Abrasion; 23. November 2023
- Emission Analytics: newsletter, Following the tyre tracks...; Where do tyre emissions go?; <https://www.emissionsanalytics.com/news/>; visited 19.10.2022
- EPA: *Brake and Tire Wear Emissions from Onroad Vehicles in MOVES3*; EPA-420-R-20-014; USA, 2020
- Garg, B.D., Cadle, S.H., Mulawa, P.A., et.al: Brake wear particulate matter emissions. *Environ. Sci. Technol.* 34 (21), 4463–4469; 2000
- Grigoratos, T.; Martini, G. *Workshop on Brake Emissions—Towards a Regulation on Brake Wear Emissions. In Proceedings of the 82nd UNECE GRPE Session, Virtual Meeting, Brussels, Belgium, 13 January 2021*
- Harrison R.: Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles; *FAT-Schriftenreihe* 344; 2021
- Hausberger S., Landl L.: Simulation von Non-Exhaust Partikelemissionen; im Auftrag des BAFU Schweiz; TU Graz, 2023
- Heißing B., Ersoy M., Gies S.: *Fahrwerkhandbuch, Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*, 3. Auflage, ATZ, 2009
- Hesse, D.; Hamatschek, C.; Augsburg, K.; Weigelt, T.; Prahst, A.; Gramstat, S. *Testing of Alternative Disc Brakes and Friction Materials Regarding BrakeWear Particle Emissions and Temperature Behavior. Atmosphere* 2021, 12, 436. <https://doi.org/10.3390/atmos12040436>; 2021

- Hölting P.: *Quantification and characterization of tire and road wear particles in traffic related sediments*; Dissertation an der Universität Leipzig, 2022
- Hüglin Christoph, Grange Stuart K.: *Chemical characterisation and source identification of PM10 and PM2.5 in Switzerland*; EMPA 2021
- Jiang R., Liu Y., et.al.: *Exhaust and non-exhaust airborne particles from diesel and electric buses in Xi'an: A comparative analysis*; Elsevier; Chemosphere 306 (2022) 135523
- Koupal J., DenBleyker A., et.al.: *Brake wear in particulate matter emission modelling; Final Report for California Dept. of Transportation*; 2021
- Leeuwen, H., "Principes van Mechanische Componenten deel1: Tribologie – Filmsmering," Notes of lecture 4A430 TU Eindhoven, Juli 2003, pp. 2.6-2.11
- Ligterink N., et.al.: uCARE, You Can Always Reduce Emissions because you care; Horizon 2020 project, GA 815002; <https://www.project-ucare.eu/project-results/deliverables/>; 24.10.2022
- Liu Y., Wu S., et.al.: *Brake wear induced PM10 emissions during the world harmonised light-duty vehicle test procedure-brake cycle*; Journal of Cleaner Production 361 (2022) 132278
- Matzer C., Weller K., Dippold M., Lipp S., Röck M., Rexeis M., Hausberger S.: *Update of emission factors for HBEFA Version 4.1; Final report, I-05/19/CM EM-I-16/26/679 from 09.09.2019, TU Graz*
- Mellios G.: *Guidebook updates; Chapters 1 . 3 .b.i iv / Road Transport COPERT v5.6*; European Environment Agency; TFEIP Meeting; 2022
- Monks et.al., AIR QUALITY EXPERT GROUP; *Non-Exhaust Emissions from Road Traffic*; 2019
- Ngeno R., Mahdi M.: *Analysis of tyre wear using the expanded brush tyre model*; KTH
- Niemann H.: *Experimentelle Einflussgrößenanalyse der Partikelemission von Pkw-Scheibenbremsen*; Dissertation TU Darmstadt, 2021
- OECD: *Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport - An Ignored Environmental Policy Challenge*; OECD, 2020
- Panko J.M., et.al.: *Evaluation of Tire Wear Contribution to PM2.5 in Urban Environments*; Atmosphere MDPI; 2019
- Park Jongsun et.al.: *Analysis of wear induced particle emissions from brake pads during the world-wide harmonized light vehicles test procedure (WLTP)*; ELSEVIER; Wear 466-467 (2021) 203539
- Piscitello A., *Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures* et.al.: Science of the Total Environment 766 (2021)
- Proposal for a new UN GTR on Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles; Submitted to the Informal Working Group on non-exhaust for Particulate Measurement Programme on 17.06.2022*
- Quass U., et.al.: *Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM10-Emissionen von Straßen*; Bast Report No. 165, 2008
- Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2015.
- Sanders, P.G., Dalka, T.M., et.al.: *Brake dynamometer measurement of airborne brake wear debris*. In: SAE 2002 World Congress, Detroit, Michigan, 2002
- Sang-Hee Woo, Yongrae Kim, Sunyoun Lee, Young Choi, Seokhwan Lee: *Characteristics of brake wear particle (BWP) emissions under various test driving cycles*; Elsevier; Wear 480-481 (2021) 203936
- Schallamach, A., Turner, D.M., "The wear of slipping wheels," Wear, Vol. 3, Issue 1, January 1960, pp. 1-25
- Schläfle S., Gauterin F., et.al.: *Construction of a test bench for measuring tire-road particulate emissions on real-road surfaces*; VDI-Reports No. 2398; 2022

- Schläfle, S.; Unrau, H.-J.; Gauterin, F. (2023-2): Influence of Load Condition, Tire Type, and Ambient Temperature on the Emission of Tire–Road Particulate Matter. *Atmosphere* 2023, 14, 1095. <https://doi.org/10.3390/atmos14071095>
- Schläfle, S.; Unrau, H.-J.; Gauterin, F. Influence of Longitudinal and Lateral Forces on the Emission of Tire–Road Particulate Matter and Its Size Distribution. *Atmosphere* 2023, 14, 1780. <https://doi.org/10.3390/atmos14121780>
- Schläfle, S.; Zhang, M.; Unrau, H.-J.; Gauterin, F. Influence of Vertical Load, Inflation Pressure, and Driving Speed on the Emission of Tire–Road Particulate Matter and Its Size Distribution. *Atmosphere* 2024, 15, 502. <https://doi.org/10.3390/atmos15040502>
- Schmerwitz F., Wietking S. et.al.: *Characterization of Tire Road Wear Particles in the Field and at Laboratory Scale; 12th International Munich Chassis Symposium p729-743, 2021; Springer Verlag 2022*
- Schmidt W., Johannsen K.: *Abriebe von Fahrbahnoberflächen; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Heft V 352; ISBN 978-3-95606628-3; Bergisch Gladbach, Januar 2022*
- Steiner M.: *Schlussbericht Mikroplastik: Eintrag von Reifenabrieb in Oberflächengewässer; Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU); 2021*
- Tonegawa Y. et.al.: *Development of Tire-Wear Particle Emission Measurements for Passenger Vehicles; Emission Control Science and Technology (2021)*
- UN, 2024: *United Nations: Addendum 24: UN Global Technical Regulation No. 24; Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles; 5. August 2024*
- Wakeling D., Murrels T., et.al.: *Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory; FAT-Schriftenreihe 318; 2019*
- Woo S-H., Jang H., et.al. (2022): Effect of treadwear grade on the generation of tire PM emissions in laboratory and real-world driving conditions; *Science of the Total Environment* 838 (2022) 156548
- Yan H., Zhang L., et.al.: *Investigation of the external conditions and material compositions affecting the formation mechanism and size distribution of tire wear particles; Atmospheric Environment* 244 (2021) 118018
- Zhengyu M., et.al.: *Determining factors and parameterization of brake wear particle emission; ELSEVIER; Journal of Hazardous Materials* 434 (2022) 128856
- Zum Hagen: *On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions; Atmospheric Environment* 217 (2019) 116943

9 Annex II: Übersicht der Messmatrizen der einzelnen Testfahrzeuge

Tabelle 9-1: Messprotokoll SNF (interne Fahrzeugnummer: 127)

Messidentifikations-nummer	Fahrzyklus	Partikelmassen-messung	Absaugmassenstrom [kg/h]	Anmerkung
2878	WHVC 1-Phase	JA	900	Messung für PN ₄ fehlgeschlagen
2879	Kalibrierzyklus	NEIN	Var.	Konstante Geschwindigkeit (50km/h) und Zugkraft (2000N)
2880	Kalibrierzyklus	NEIN	Var.	Modifikation des Absaugtrichters Konstante Geschwindigkeit (50km/h) und Zugkraft (2000N)
2881	Kalibrierzyklus	NEIN	Var.	Beschleunigungen von 0 km/h auf 80 km/h
2882	WHVC 2-Phasen	JA	400	Phase 1 ohne und Phase 2 mit Gebläse
2883	HBEFA Stop a. Go	JA	400	Zyklus inklusiv Leerlaufphase
2885	Geschwindigkeitsdreieck	NEIN	400	Temperatureinflussanalyse durch fünfmi- nutiges Halten der Geschwindigkeiten (30- 60-80-60-30 km/h)
2886	WHVC 2-Phasen	JA	400	Phase 1 ohne und Phase 2 mit Gebläse
2887	HBEFA Stop a. Go	JA	400	Zyklus inklusiv Leerlaufphase
2888	WAIT-Zyklus	NEIN	Var.	Beschleunigungen von 0 km/h auf 80 km/h
2889	Messmatrix	NEIN	400	Kühlen (4 min), Ref. U. AP (2 min)
2890	Messmatrix	NEIN	400	Kühlen (4 min), Ref. U. AP (2 min)
2891	RDE-Zyklus	JA	400	Brennerautobahn
2892	Messmatrix	NEIN	650	Kühlen (4 min), Ref. U. AP (2 min)

Tabelle 9-2: Messprotokoll LNF (interne Fahrzeugnummer 206)

Messidentifikations-nummer	Fahrzyklus	Partikelmassen-messung	Absaugmassenstrom [kg/h]	Anmerkung
8905	WLTC-Exhaust	JA	900	Partikelfilter gerissen
8906	ERMES-V8	JA	700	Kalibrierung der Messkonfiguration
8907	WLTC-Exhaust	JA	700	Kalibrierung der Messkonfiguration
8908	ERMES-V8	JA	350	Kalibrierung der Messkonfiguration
8909	ERMES-V8	NEIN	100	Kalibrierung der Messkonfiguration
8910	ERMES-V8	NEIN	-	Direkte Messung der Partikelanzahl über eine Düse
8911	ERMES-V8	NEIN	-	Wechseln der Fahrzeugbereifung auf Sommerreifen (alle darauffolgende Messung mit Sommerreifen) Direkte Messung der Partikelanzahl über eine Düse
8915	WLTC-Exhaust	NEIN	-	Direkte Messung der Partikelanzahl über eine Düse Ohne Fahrtwind
8916	WLTC-Exhaust	JA	700	Messung mit komplettiertem Messsystem ohne Fahrtwind
8917	WAIT-Zyklus	JA	700	Beschleunigen von 0 km/h auf 100 km/h ohne Fahrtwind
8918	WLTC-Exhaust	JA	700	Kaltstart ohne Fahrtwind
8919	WLTC-Exhaust	JA	350	Ohne Fahrtwind
8920	WAIT-Zyklus	JA	700	Diverse Konstantpunkte

Tabelle 9-3: Messprotokoll PKW-1 (interne Fahrzeugnummer 389)

Messidentifikations-nummer	Fahrzyklus	Partikelmassen-messung	Absaugmassenstrom [kg/h]	Anmerkung
8965	Kalibrierzyklus	NEIN	Var.	Beschleunigen von 0 km/h auf 100 km/h mit und ohne Fahrtwind Absaugmassenstrom nicht aufgezeichnet
8966	WLTC-Exhaust	NEIN	700	Ohne Fahrtwind, letzte Autobahnphase mit Fahrtwind Keine Partikelmessbar => Gegenmaßnahmen durch Modifizieren des Absaugtrichters
8967	Kalibrierzyklus	NEIN	600	Beschleunigen mit modifiziertem Trichter und Änderung des Reifendrucks von 2.2 auf 3 bar. Keine Partikelmessbar => Gegenmaßnahmen durch Ändern der Bereifung auf Sommerreifen
8968	Kalibrierzyklus	NEIN	600	Diverse Beschleunigungsphasen Verdünnungsmessfehler
8969	Kalibrierzyklus	NEIN	600	Diverse Beschleunigungsphasen mit variabler Radaufstandskraft
8970	WLTC-Exhaust	NEIN	600	
8971	Messmatrix	JA	600	Letzter Arbeitspunkt mit Fahrtwind Messung exkl. AP1, AP4, AP6 und AP9
8972	WLTC-Exhaust	JA	600	

Tabelle 9-4: Messprotokoll PKW-2 (interne Fahrzeugnummer 404)

Messidentifikations-nummer	Fahrzyklus	Partikelmassen-messung	Absaugmassenstrom [kg/h]	Anmerkung
8973	Kalibrierzyklus	NEIN	Var.	Beschleunigen ohne Fahrtwind Absaugmassenstrom nicht aufgezeichnet
8974	Kalibrierzyklus	NEIN	Var.	Beschleunigen ohne Fahrtwind Absaugmassenstrom nicht aufgezeichnet
8975	WLTC-Exhaust	JA	200	Zyklus ohne Bremsen und ohne Fahrtwind Messung für PN ₂₃ fehlgeschlagen
8976	WLTC-Exhaust	JA	200	Erste 200 Sekunden mit Fahrtwind
8977	ERMES V9	JA	200	Ohne Fahrtwind
8978	Messmatrix	JA	200	Inkl. AP1 mit Fahrtwind
8979	Kalibrierzyklus	JA	400	Zugkraftpyramide Partikelkonzentration nicht aufgezeichnet
8980	Kalibrierzyklus	NEIN	200	Diverse Beschleunigungen Partikelkonzentration nicht aufgezeichnet

Tabelle 9-5: Messprotokoll Motorrad

Messprotokoll				
	Nr.	Datum	Zyklus	Bemerkung
Tag1	1	02.04.2024	RWC	mit Bremsen
	2	02.04.2024	Konstantpunkte	Beschleunigen von 0-130km/h, 1 Minute halten und ausrollen lassen. "Air Flow Rate" verändert.
Tag2	3	04.04.2024	RWC	ohne Bremsen
	4	04.04.2024	RWC	Teil 1, ohne Bremsen
	5	04.04.2024	RWC	Teil 2, ohne Bremsen
	6	04.04.2024	WMTC	ohne Bremsen
	7	04.04.2024	RWC	mit Bremsen
Tag3	8	05.04.2024	RWC-hard	hard, mit Bremsen, mit Reifentemperatur
	9	05.04.2024	Konstantpunkte	mit Reifentemperatur
	10	05.04.2024	Temperaturkurve	mit Reifentemperatur
	11	05.04.2024	Temperaturkurve	mit Reifentemperatur