Empa
Materials Science and Technology

Charakterisierung der Emissionen von Bremspartikeln eines Elektrofahrzeugs und Vergleich mit den Emissionen eines Verbrennungsmotorfahrzeugs

8600 Dübendorf, 26.4.2023

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

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

Auftragnehmer: Empa, Abt. 504, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf
Autor/Autorin: P. Dimopoulos Eggenschwiler, D. Schreiber
Begleitung BAFU: P. Bonsack, G. D'Urbano
Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Abschlussbericht zum Projekt:

Charakterisierung der Bremsabriebpartikel eines Elektrofahrzeugs und Vergleich mit einem Verbrennungsmotorfahrzeug

110013810 / 8T20/19.0106.PJ/0007
A200.0001 Globalkredit / Forschung
19.0106.PJ / 347575FE3

26. April 2023

P. Dimopoulos Eggenschwiler, D. Schreiber

Automotive Powertrain Technologies Laboratory 504

Inhalt

1. Zusammenfassung 5
1. Résumé 8
1. Sommario 11
2 Experimenteller Aufbau und Evaluierung 14
2.1 Messaufbau 14
2.2 Evaluation des Messaufbaus und der Messmethode 17
2.3 Abschätzung der Partikel-Transporteffizienz der Transferleitung 19
2.4 Fahrzyklus 20
2.5 Testfahrzeuge 21
3. Ergebnisse und Diskussion 23
3.1 Analyse der Bremsvorgänge des Batterie-Elektrischen Fahrzeugs (BEV) 23
3.2 PN-Emissionen in den WLTC-Zyklen 26
3.2.1 PN-Emissionen (>23nm) in WLTC-Zyklen (ohne Extra High Teilzyklus) 26
3.2.2 Analyse der Bremspartikelemissionen des VM-Fahrzeugs 31
3.2.3 Analyse der Bremspartikelemissionen des BEV-Fahrzeugs 32
3.3 PN-Bremsemissionsfaktoren 35
3.4 PM-Emissionen in den WLTC-Zyklen 38
3.4.1 PM-Emissionen von 3 Serien mit jeweils 5 wiederholten WLTC-Zyklen (ohne Extra High Teilzyklus) 38
3.4.2 PM-Emissionen vollständiger WLTC-Zyklen (mit Extra High Teil) 40
3.5 PM Bremsemissionsfaktoren 41
3.6 Zusammenfassender Vergleich der Bremspartikelemissionen der drei bisher gemessen Fahrzeuge am Rollenprüfstand 44
4. Literaturhinweise 47

1. Zusammenfassung

Im Rahmen eines ersten Projektes wurde im Jahr 2020 die Bremspartikelemissionen eines Hybridfahrzeugs in möglichst realen Fahrzuständen quantifiziert. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden die Bremspartikelemissionen eines rein elektrisch betriebenen, Batterie-Elektrischen-Fahrzeugs (BEV-Fahrzeug) und eines vergleichbaren, verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugs (VM-Fahrzeug) detailliert gemessen und ausgewertet. Die zwei Personenwagen wurden für den Rollenprüfstand ähnlich ausgerüstet und vermessen. Dafür wurde die rechte, vordere Scheibenbremse vollständig eingekapselt und kontrolliert belüftet. In diesem Luftstrom wurden die Bremspartikel in Anzahl (PN) und Masse (PM) während einer grösseren Anzahl von Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle WLTC (Emissionsmess-)Zyklen vermessen.

Das VM-Fahrzeug hatte zwei Scheibenbremsen vorne und zwei hinten. Das BEV-Fahrzeug hatte auch zwei Scheibenbremsen vorne, dafür waren an der Hinterachse parallel zum elektrischen Antrieb, der auch mittels Rekuperation eine Bremsfunktion übernimmt, geschlossene Trommelbremsen verbaut. Mögliche Emissionen dieser Trommelbremsen wurden nicht gemessen.

Es sei hier klar zum Ausdruck gebracht, dass die vorgestellten Ergebnisse charakteristisch für die zwei Fahrzeuge mit den vorhandenen, getesteten, serienmässigen Bremsanlagen sind. Die Ergebnisse sind nicht ohne weiteres auf andere Fahrzeuge, nicht mal auf andere Bremsanlagen gleicher Fahrzeuge übertragbar. Interessanterweise sind, wie im letzten Abschnitt der Ergebnisse gezeigt, die Bremspartikelemissionen des VM-Fahrzeuges sehr ähnlich zu den Emissionen des im vergangenen Projekt (2020) vermessenen Hybridfahrzeugs. Dafür sind die Bremspartikelemissionen des BEV-Fahrzeuges um einiges höher, obwohl ein Teil der Bremsenergie nicht mechanisch, sondern elektrisch (über Rekuperation) erfolgt.

In einer separaten Untersuchung wurde zuerst das Bremsverhalten des BEV-Fahrzeuges im WLTC-Zyklus untersucht. Es ergab sich, und dies mit sehr guter Wiederholbarkeit, dass 50% der nötigen Bremsenergie elektrisch, also über Rekuperation erfolgt. Die restlichen 50% entfallen auf die mechanischen Bremsen und zwar 30% auf die Vorderräder und 20% auf die Hinterräder.

Als erstes konnte die gute Reproduzierbarkeit der Bremskräfte über eine Reihe von WLTC-Zyklen nachgewiesen werden. Beim BEV-Fahrzeug wurden eher geringere Bremskräfte gemessen als beim VM-FAHRZEUG, ausser während Abbremsen bis zum Stillstand. Grundsätzlich zeigte sich bei den emittierten Bremspartikeln folgendes Muster:

- Bremsvorgänge, die zu Bremspartikeln führen, sind beim BEV-Fahrzeug seltener als beim VM-Fahrzeug, weil das BEV-Fahrzeug häufig die elektrische Rekuperation zum Bremsen nutzt,
- Bremspartikelspitzen, wann immer beim BEV-Fahrzeug die mechanischen Bremsen zum Einsatz kommen, sind um ein Vielfaches höher als beim VM-Fahrzeug.

Die Bremspartikelemissionen des VM-Fahrzeuges nahmen mit jeder Zykluswiederholung ab. Erst ab dem 5. Zyklus zeigte sich eine Stabilisierung. Dies ist der in der Literatur und unter Fachkreisen bezeichnete "bedding" Effekt. Die Bremspartikelemissionen des BEV-Fahrzeug hatten ein grundsätzlich anderes Verhalten. Mit jeder Zykluswiederholung haben die Bremspartikelemissionen zugenommen und zeigten erst nach der 5. Wiederholung eine Stabilisierung.

Die stark unterschiedliche Charakteristik der Bremspartikelemissionen der beiden Fahrzeuge, VM und BEV, ist höchstwahrscheinlich auf unterschiedliche Materialwahl bei den Bremsbelägen zurückzuführen. Die Gründe dafür sind nicht bekannt.

Die verschiedenen Fahrmodi, die beim BEV-Fahrzeug wählbar waren, hatten einen kleinen Einfluss auf die Bremspartikelemissionen, interessanterweise resultierte der Eco-Fahrmodus zu den höchsten Bremspartikelemissionen, während die Modi Komfort und Sport zu tieferen Bremspartikelemissionen führten. Batterieladezustände (State of Charge, SoC) von 100% und 68% am Zyklusanfang haben keinen signifikanten Einfluss auf die Bremspartikelemissionen PN der gesamten Zyklen gehabt. Dafür waren die Bremspartikelemissionen PM deutlich niedriger, wenn der Zyklus mit einem SoC von 68% gestartet wurde.
Die emittierte Anzahl von Bremspartikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser grösser als 23nm machte ungefähr 80% der emittierten Anzahl von Bremspartikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser grösser als 10nm aus. Dieses Verhältnis war stabil und hat sich über mehrere Messungen bestätigt. Demnach wurden die Emissionen von ultrafeinen Bremspartikeln, auch bei relativ tiefen Temperaturen der Bremsscheiben und -beläge, nachgewiesen

Die an der rechten, vorderen Scheibenbremse gemessenen mittleren PN-Emissionsfaktoren waren 5.14E+10 #/km für das VM-Fahrzeug und 1.5E+11 #/km für das BEV-Fahrzeug (im Komfort Modus und mit 100% SoC am Zyklusstart). Um die entsprechenden Emissionsfaktoren für das gesamte Fahrzeug abzuschätzen, sind diese Werte für das VM- Fahrzeug zu verdreifachen (wegen der zweiten linken Scheibenbremse vorne und den zwei Scheibenbremsen hinten, die aber stets niedrigere Bremskräfte aufbringen) und für das BEV- Fahrzeug zu verdoppeln (wegen der zweiten, linken Scheibenbremse

vorne und den Trommelbremsen hinten, die in dieser Arbeit als bremspartikelemissionsfrei angenommen werden). Somit liegen die gesamten Brems-PN-Emissionsfaktoren bei 1.54E+11 #/km für das VM-Fahrzeug und 3.0E+11 #/km für das BEV.

Die aus den Messungen an der rechten, vorderen Scheibenbremse erhaltenen mittleren PM-Emissionsfaktoren waren 2.72 mg/km für PM<12 µm und 1.14 mg/km für PM<2.5 µm für das VM-Fahrzeug. Diese Werte sind quasi zu verdreifachen um die gesamten PM Emissionen des VM-Fahrzeuges zu bekommen (siehe Diskussion im vorherigen Absatz) und somit ist beim VM-Fahrzeug mit mittleren Fahrzeugemissionen von 8.1 mg/km für PM<12 µm und 3.42 mg/km für PM<2.5 µm zu rechnen. Die an der rechten, vorderen Scheibenbremse des BEV-Fahrzeuges, (im Modus Komfort und bei 100% SoC am Zyklusstart) gemessenen PM Emissionen lagen bei 2.92 mg/km für PM<12 µm und 1.54 mg/km für PM<2.5 µm. Wie bei den PN, waren die PM Emissionen für den Eco Modus höher und für die Modi Komfort und Sport tiefer. Interessanterweise betrugen die PM-Bremspartikelemissionen, sollte man den Zyklus bei 68% Batterieladezustand starten, 35% weniger für PM<12 µm und sogar 60% weniger für PM<2.5 µm.
Um die PM Emissionen des gesamten Fahrzeuges abzuschätzen, sind diese Werte (für das BEV) gemäss der Diskussion im vorherigen Absatz zu verdoppeln: 5.84 mg/km für PM<12 µm und 3.08 mg/km für PM<2.5 µm.

1. Résumé

Dans le cadre d'un premier projet, les émissions de particules de freinage d'un véhicule hybride ont été quantifiées en 2020 dans des conditions de conduite aussi réelles que possible. Dans le cadre du présent projet, les émissions de particules de freinage d'un véhicule électrique à batterie (BEV) et d'un véhicule comparable à moteur à combustion interne (VM) ont été mesurées et évaluées en détail. Les deux voitures de tourisme ont été équipées et mesurées de manière similaire pour le banc d'essai à rouleaux. Pour ce faire, le frein à disque avant droit a été entièrement encapsulé et ventilé de manière contrôlée. Dans ce flux d'air, les particules de frein ont été mesurées en nombre (PN) et en masse (PM) pendant un grand nombre de cycles de test WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) (mesure des émissions).

Le véhicule VM avait deux freins à disque à l'avant et deux à l'arrière. Le véhicule BEV avait également deux freins à disque à l'avant, mais des freins à tambour fermés étaient montés sur l'essieu arrière, parallèlement à l'entraînement électrique qui assure également une fonction de freinage par récupération. Les émissions éventuelles de ces freins à tambour n'ont pas été mesurées.

Il convient de préciser ici que les résultats présentés sont caractéristiques des deux véhicules équipés des systèmes de freinage de série testés. Les résultats ne sont pas transposables sans autre à d'autres véhicules, ni même à d'autres systèmes de freinage de véhicules identiques. Il est intéressant de noter, comme le montre la dernière section des résultats, que les émissions de particules de freinage du véhicule VM sont très similaires à celles du véhicule hybride mesuré lors du projet précédent (2020). En revanche, les émissions de particules de freinage du véhicule BEV sont nettement plus élevées, bien qu'une partie de l'énergie de freinage ne soit pas mécanique, mais électrique (par récupération).

Dans une étude séparée, le comportement de freinage du véhicule BEV a d'abord été examiné dans le cycle WLTC. Il s'est avéré, et ce avec une très bonne répétabilité, que 50% de l'énergie de freinage nécessaire est électrique, c'est-à-dire qu'elle est récupérée. Les 50% restants sont assurés par les freins mécaniques, à savoir 30% pour les roues avant et 20% pour les roues arrière.

La première chose qui a été démontrée est la bonne reproductibilité des forces de freinage sur une série de cycles WLTC. Les forces de freinage mesurées sur la BEV étaient plutôt inférieures à celles mesurées sur la VM, sauf pendant le freinage jusqu'à l'arrêt. En principe, le modèle suivant a été observé pour les particules de freinage émises :

- Les processus de freinage qui entraînent des particules de freinage sont plus rares sur la BEV que sur le véhicule VM, car la BEV utilise souvent la récupération électrique pour freiner,

- Les pics de particules de freinage, lorsque les freins mécaniques sont utilisés sur la BEV, sont plusieurs fois plus élevés que sur le véhicule VM.

Les émissions de particules de freinage du véhicule VM ont diminué à chaque répétition de cycle. Ce n'est qu'à partir du 5e cycle qu'une stabilisation est apparue. C'est ce que l'on appelle dans la littérature et dans les milieux spécialisés l'effet "bedding". Les émissions de particules de freinage de la BEV ont eu un comportement fondamentalement différent. Les émissions de particules de freinage ont augmenté à chaque répétition du cycle et ne se sont stabilisées qu'après la 5e répétition.

Les caractéristiques très différentes des émissions de particules de freinage des deux véhicules, VM et BEV, sont très probablement dues à un choix différent de matériaux pour les garnitures de frein. Les raisons de cette différence ne sont pas connues.

Les différents modes de conduite disponibles sur la BEV ont eu une petite influence sur les émissions de particules de freinage ; il est intéressant de constater que le mode de conduite Eco a conduit aux émissions de particules de freinage les plus élevées, alors que les modes Confort et Sport ont conduit à des émissions de particules de freinage plus faibles. Les états de charge de la batterie (State of Charge, SoC) de 100% et 68% au début du cycle n'ont pas eu d'influence significative sur les émissions de particules de frein pendant l'ensemble des cycles. En revanche, les émissions de particules de freinage PM étaient nettement plus faibles lorsque le cycle était démarré avec un SoC de 68%.
Le nombre de particules de freinage émises avec un diamètre aérodynamique supérieur à 23 nm représentait environ 80% du nombre de particules de freinage émises avec un diamètre aérodynamique supérieur à 10 nm. Cette proportion était stable et s'est confirmée sur plusieurs mesures. Les émissions de particules de frein ultrafines ont donc été démontrées, même à des températures relativement basses des disques et plaquettes de freins.

Les facteurs d'émission PN moyens mesurés sur le frein à disque avant droit étaient de 5.14E+10 #/km pour le véhicule VM et de 1.5E+11 #/km pour la BEV (en mode confort et avec 100% de SoC au début du cycle). Afin d'estimer les facteurs d'émission correspondants pour l'ensemble du véhicule, ces valeurs doivent être triplées pour le VM (en raison du deuxième frein à disque gauche à l'avant et des deux freins à disque à l'arrière, qui appliquent cependant toujours des forces de freinage plus faibles) et doublées pour le BEV (en raison du deuxième frein à disque gauche à l'avant et des freins à tambour à l'arrière, qui sont considérés dans ce travail comme ne générant pas d'émissions liées au freinage). Ainsi, les facteurs d'émission PN de freinage totaux sont de 1.54E+11 #/km pour la VM et de 3.0E+11 #/km pour la BEV.

Les facteurs d'émission moyens de PM obtenus à partir des mesures effectuées sur le frein à disque avant droit étaient de 2.72 mg/km pour les PM<12 µm et de 1.14 mg/km pour les PM<2.5 µm pour le véhicule VM. Ces valeurs doivent être quasiment triplées pour obtenir les émissions totales de PM du véhicule VM (voir discussion dans le paragraphe précédent) et il faut donc s'attendre à des émissions moyennes du véhicule VM de 8.1 mg/km pour les PM<12 µm et de 3.42 mg/km pour les PM<2.5 µm. Les émissions de PM mesurées au niveau du frein à disque avant droit du véhicule BEV, (en mode Confort et à 100% SoC au début du cycle) étaient de 2.92 mg/km pour les PM<12 µm et de 1.54 mg/km pour les PM<2.5 µm. Comme pour les PN, les émissions de PM étaient plus élevées pour le mode Eco et plus faibles pour les modes Confort et Sport. Il est intéressant de noter que si l'on démarrait le cycle à 68% de charge de la batterie, les émissions de PM liées au freinage étaient inférieures de 35% pour les PM<12 µm et même de 60% pour les PM<2.5 µm.

Pour estimer les émissions de PM de l'ensemble du véhicule, il faut doubler ces valeurs (pour la BEV) selon la discussion du paragraphe précédent : 5.84 mg/km pour PM<12 µm et 3.08 mg/km pour PM<2.5 µm.

1. Sommario

Nell'ambito di un primo progetto del 2020, sono state quantificate le emissioni di particelle in frenata di un veicolo ibrido nelle condizioni di guida più realistiche possibili. Nell'ambito del presente progetto, sono state misurate e valutate in dettaglio le emissioni di particelle in frenata di un veicolo elettrico a batteria puramente elettrico (BEV) e di un veicolo comparabile con motore a combustione (VM). Le due autovetture sono state equipaggiate e misurate in modo simile al banco dinamometrico. A questo scopo, il freno a disco anteriore destro è stato completamente incapsulato e ventilato in modo controllato. In questo flusso d'aria, le particelle dei freni sono state misurate in numero (PN) e massa (PM) durante un maggior numero di cicli di prova WLTC (misurazione delle emissioni) del Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle.

Il veicolo VM aveva due freni a disco anteriori e due posteriori. Anche il veicolo BEV aveva due freni a disco all'anteriore, ma sull'asse posteriore erano installati freni a tamburo chiusi in parallelo con l'azionamento elettrico, che svolge anche una funzione di frenata mediante recupero. Le possibili emissioni di questi freni a tamburo non sono state misurate.

Va detto chiaramente che i risultati presentati sono caratteristici dei due veicoli con i sistemi frenanti standard esistenti e testati. I risultati non sono facilmente trasferibili ad altri veicoli, nemmeno ad altri sistemi frenanti degli stessi veicoli. È interessante notare che, come mostrato nell'ultima sezione dei risultati, le emissioni di particelle in frenata del veicolo VM sono molto simili alle emissioni del veicolo ibrido misurate nel progetto precedente (2020). D'altro canto, le emissioni di particelle di frenata del veicolo BEV sono molto più elevate, sebbene parte dell'energia di frenata non sia generata meccanicamente, ma elettricamente (tramite recupero).

In uno studio separato, è stato esaminato prima il comportamento in frenata del veicolo BEV nel ciclo WLTC. È stato rilevato, con un'ottima ripetibilità, che il 50% dell'energia di frenata necessaria avviene elettricamente, cioè tramite il recupero. Il restante 50% è rappresentato dai freni meccanici, ovvero il 30% per le ruote anteriori e il 20% per le ruote posteriori.

Innanzitutto, è stato possibile dimostrare la buona riproducibilità delle forze di frenata su una serie di cicli WLTC. Per il BEV, le forze di frenata tendevano a essere inferiori rispetto alla VM, tranne durante la frenata da fermo. In sostanza, le particelle dei freni emesse hanno mostrato il seguente andamento:
- I processi di frenata che generano particelle di frenata sono meno frequenti nel BEV rispetto al veicolo VM, perché il BEV utilizza spesso il recupero elettrico per la frenata,

- I picchi di particelle di frenata quando vengono utilizzati i freni meccanici del BEV sono molto più elevati rispetto al veicolo VM.

Le emissioni di particelle di frenata del veicolo VM sono diminuite ad ogni ripetizione del ciclo. Solo a partire dal 5° ciclo si è verificata una stabilizzazione. Questo è l'effetto "bedding" descritto in letteratura e dagli esperti. Le emissioni di particelle al freno del BEV hanno avuto un comportamento fondamentalmente diverso. Ad ogni ripetizione del ciclo, le emissioni di particelle al freno aumentavano e si stabilizzavano solo dopo la quinta ripetizione.

Le caratteristiche molto diverse delle emissioni di particelle dei freni dei due veicoli, VM e BEV, sono probabilmente dovute alla scelta di materiali diversi per le pastiglie dei freni. Le ragioni non sono note.

Le diverse modalità di guida selezionabili per il BEV hanno avuto una piccola influenza sulle emissioni di particelle dei freni; è interessante notare che la modalità di guida Eco ha prodotto le emissioni di particelle dei freni più elevate, mentre le modalità Comfort e Sport hanno prodotto emissioni di particelle dei freni più basse. Lo stato di carica (SoC) del 100% e del 68% all'inizio del ciclo non ha avuto un'influenza significativa sulle emissioni di particelle in frenata PN degli interi cicli. D'altra parte, le emissioni di particelle dei freni PM erano significativamente più basse quando il ciclo veniva avviato con un SoC del 68%.
Il numero emesso di particelle dei freni con un diametro aerodinamico superiore a 23 nm rappresentava circa l'80% del numero emesso di particelle dei freni con un diametro aerodinamico superiore a 10 nm. Questo rapporto è rimasto stabile ed è stato confermato da diverse misurazioni. Di conseguenza, sono state rilevate emissioni di particelle frenanti ultrafini, anche a temperature relativamente basse dei dischi e delle pastiglie dei freni.

I fattori di emissione PN medi misurati sul freno a disco anteriore destro sono stati 5.14E+10 #/km per il veicolo VM e 1.5E+11 #/km per il BEV (in modalità comfort e con SoC al 100% all'inizio del ciclo). Per stimare i corrispondenti fattori di emissione per l'intero veicolo, questi valori devono essere triplicati per la VM (a causa del secondo freno a disco sinistro nella parte anteriore e dei due freni a disco nella parte posteriore, che tuttavia applicano sempre forze frenanti inferiori) e raddoppiati per il BEV (a causa del secondo freno a disco sinistro nella parte anteriore e dei freni a tamburo nella parte posteriore, che in questo lavoro si ipotizza siano privi di emissioni per il risparmio dei freni). Pertanto, i fattori di emissione totali freno-PN sono 1.54E+11 #/km per la VM e 3.0E+11 #/km per il BEV.

I fattori medi di emissione di PM ottenuti dalle misurazioni sul freno a disco anteriore destro erano 2.72 mg/km per PM<12 µm e 1.14 mg/km per PM<2.5 µm per il veicolo VM. Questi valori devono essere praticamente triplicati per ottenere le emissioni totali di PM del veicolo VM (si veda la discussione nel paragrafo precedente) e quindi si possono prevedere emissioni medie di 8,1 mg/km per PM<12 µm e 3.42 mg/km per PM<2.5 µm per il veicolo VM. Le emissioni di PM misurate sul freno a disco anteriore destro del veicolo BEV (in modalità Comfort e con SoC al 100% all'inizio del ciclo) sono state di 2.92 mg/km per PM<12 µm e 1.54 mg/km per PM<2.5 µm. Come per il PN, le emissioni di PM erano più elevate in modalità Eco e più basse in modalità Comfort e Sport. È interessante notare che, se il ciclo è stato avviato con una carica della batteria del 68%, le emissioni di PM in frenata sono risultate inferiori del 35% per PM<12 µm e addirittura del 60% per PM<2.5 µm.
Per stimare le emissioni di PM dell'intero veicolo, questi valori (per il BEV) dovrebbero essere raddoppiati in base alla discussione del paragrafo precedente: 5.84 mg/km per PM<12 µm e 3.08 mg/km per PM<2.5 µm.

2 Experimenteller Aufbau und Evaluierung

2.1 Messaufbau

Die Messeinrichtung wurde in Anlehnung an das PMP[1]-Protokoll zur Quantifizierung von Verbrennungspartikeln konzipiert (Schema in Abb. 2.1.1). Für die Versorgung mit ausreichender Spülluft wurde ein gemieteter Kompressor mit Trocknung eingesetzt. Details der Messeinrichtung sind in Abb. 2.1.2 und 2.1.3 ersichtlich.

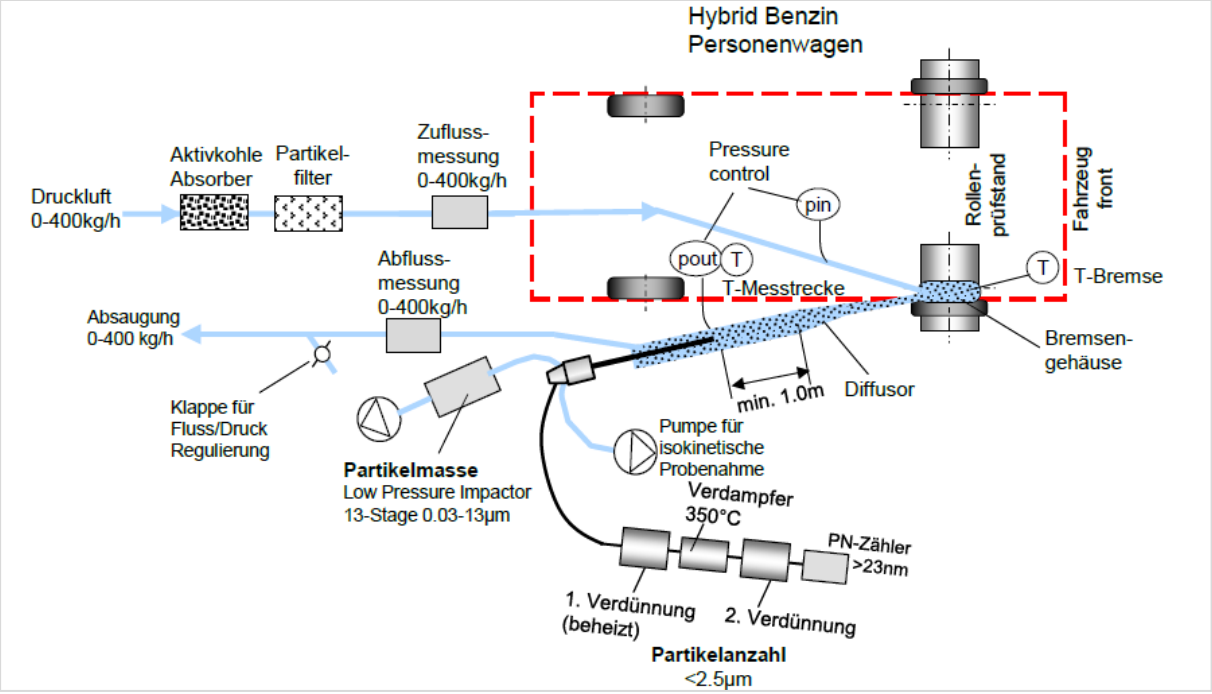


Abbildung 2.1.1: Darstellung des Messaufbaus, ähnlich für beide Fahrzeuge.

[1] Im Rahmen des Weltforums zur Harmonisierung technischer Vorschriften für Strassenfahrzeuge (WP.29) innerhalb der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) beschäftigt sich die Arbeitsgruppe Particle Measurement Programme (PMP) seit 2014 mit der Untersuchung von Partikelemissionen aus nichtmotorischen Quellen (Bremsen, Reifenabrieb). Seit 1998 wurden von PMP Partikelemissionen aus Verbrennungsmotoren untersucht, welche schlussendlich zur Partikel-Anzahlmessung führten sowie zu dem Erfordernis eines Partikelfilters für Dieselfahrzeuge sowie für bestimmte Fahrzeuge mit Benzinmotor.

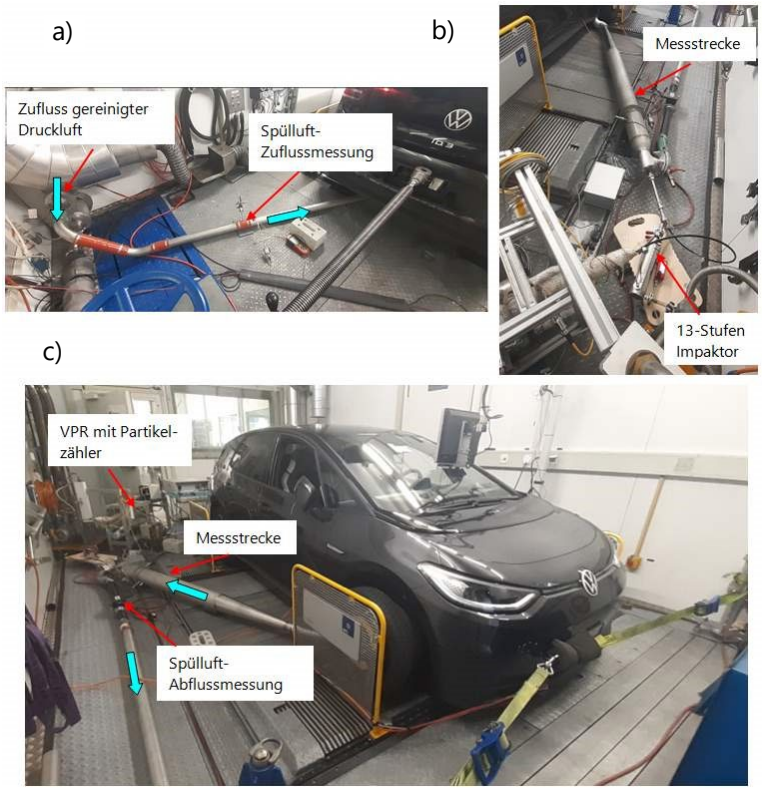
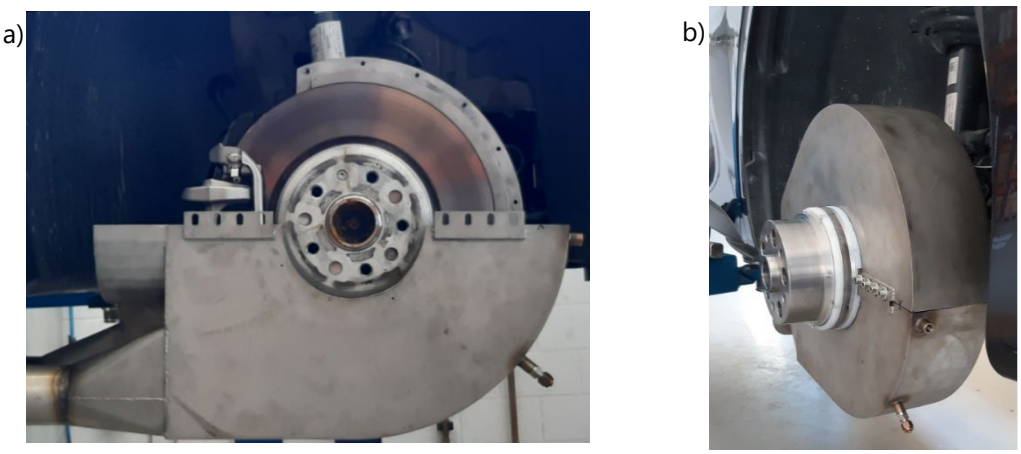
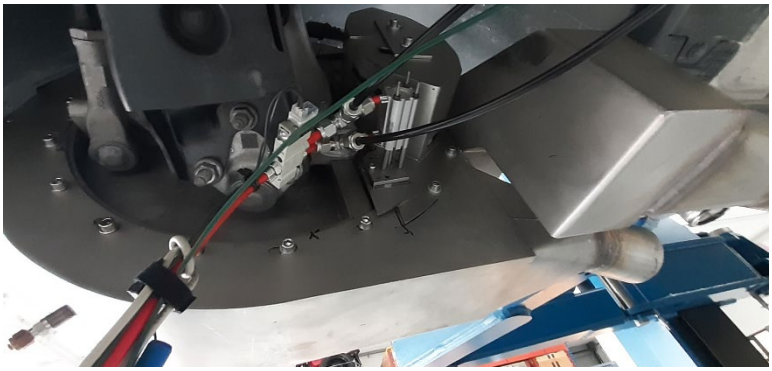


Abbildung 2.1.2: BEV-Fahrzeug, a) Zufuhr gereinigter Luft mit Zuflussmessung zum Bremsengehäuse. b) Messstrecke und 13-Stufen Impaktor. c) Messstrecke mit Partikelprobenahme und Spülluft-Abfluss-messung.

In Abb. 2.1.3 ist die Bremseneinhausung mit Gleitringdichtung und der Temperaturmessung der Bremsscheibe sichtbar. Die Partikel benahme wurde am rechten Vorderrad installiert. Um genügend Platz für die Bremseneinhausung schaffen zu können, wurde ein entsprechend gefertigter Extender zur Achsverlängerung und das schmalere Reserverad montiert. Damit die Laufeigenschaften des linken Vorderrades ähnlich dem rechten sind, wurde an der Achse auch ein Extender und ein Reserverad montiert. Die im Abschnitt 3 besprochenen und analysierten Bremspartikelemissionen sind Messwerte des rechten Vorderrades.



c) 

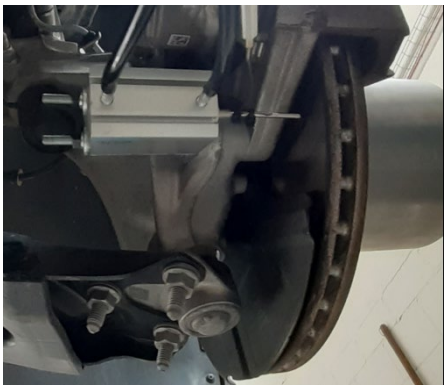
d) 

Abbildung 2.1.3: BEV-Fahrzeug a) Geöffnetes Bremsgehäuse mit Sicht auf die Bremsscheibe. b) Gehäuse mit Gleitringdichtung zur Reduktion von Spülluftverlusten am Ringspalt zwischen Gehäuse und Achsverlängerung. c) Mit Druckluft einfahrbares Thermoelement montiert am Bremsgehäuse (T-Bremsscheibe rechts). d) Mit Druckluft einfahrbares Thermoelement der linken, offenen Scheibenbremse (T-Bremsscheibe links).

Der wesentliche Unterschied in der Bremsenkonfiguration der beiden Fahrzeuge war die Position des Bremssattels. Der Bremssattel im VM-Fahrzeug war vorne am Rad montiert, wie in Abb. 2.1.4a) dargestellt, im BEV-Fahrzeug war der Bremssattel auf der Hinterseite des (vorderen) Rades, wie in Abb. 2.1.4b) dargestellt, montiert.

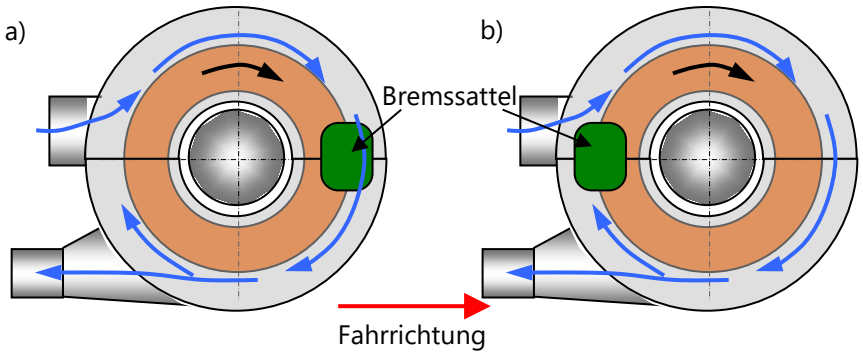


Abbildung 2.1.4: Eingehauste Scheibenbremse (braun) mit Spülluftfluss (blau). a) Anordnung des Bremssattels in Fahrtrichtung, VM-Fahrzeug, b) Anordnung des Bremssattels am BEV-Fahrzeug.

Zur Bestimmung der Massen-Grössenverteilung der emittierten Bremspartikel wurde ein 13-Stufen Dekati Low Pressure Impaktor (DLPI) verwendet. Der DLPI dient zur Messung der gravimetrischen Massen-Grössenverteilung von Partikeln zwischen 30 nm und 10 µm. Diese basiert auf dem äquivalenten

aerodynamischen Durchmesser (Di) der Partikel. Das führt zu einem Partikelspektrum von 12 Grössenklassen zwischen 45 nm und 8.6 µm (Tab. 1), unter der Annahme, dass die Partikel kugelförmig sind, bezogen auf eine Dichte von 1 g/cm^3. In Tabelle 1 sind die 50% Cut-Off Durchmesser (D 50%) des Impaktors aufgelistet. Der zusammengebaute Impaktor ist in Abb. 2.1.5a) abgebildet. Als Partikelträger wurden Polycarbonatfolien für die Messung der Massen-Grössenverteilungen benutzt. Für die letzte Stufe des Impaktors (Stufe 0), wurde ein Back-up Filter eingesetzt (teflonbeschichteter Glasfaserfilter, TX 40), welcher Partikel<30 nm sammelt. Ein beladener Foliensatz ist in Abb. 2.1.5b) ersichtlich. Um elektrostatische Einflüsse bei der Wägung durch eventuell geladene Folien zu verhindern, wurden die Folien vor dem Wägen mit einem elektrischen Hochspannungs-Ionisator elektrisch neutralisiert. Es zeigte sich, dass eine elektrostatische Neutralisierung vor der Folienwägung zwingend für korrekte Werte ist.

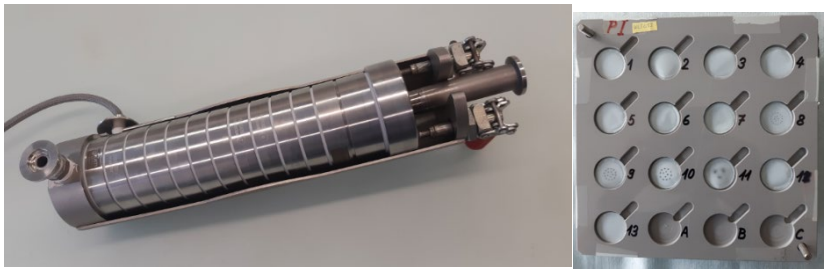


Abbildung 2.1.5: a) Zusammengebauter 13-Stufen Impaktor, b) belegter Foliensatz.

Tabelle 1: Partikelgrössenklassen bei Kalibrierbedingung des verwendeten Impaktors (DLPI)

Elpi, cut-off Diameter per stage		
Stage	D 50% [µm]	Di [µm]
1	0.032	0.046
2	0.065	0.085
3	0.112	0.141
4	0.178	0.220
5	0.272	0.336
6	0.415	0.528
7	0.671	0.837
8	1.043	1.327
9	1.688	2.086
10	2.577	3.278
11	4.17	5.407
12	7.01	8.636
13	10.64	

2.2 Evaluation des Messaufbaus und der Messmethode

Um zeitaufgelöst den Background zu prüfen, wurde während der Zyklusdauer mit dem bei der Messung eingestellten Spülluftfluss, bei nicht drehenden Rädern und somit ohne Bremsvorgänge, die Par-

tikelkonzentration gemessen. In Tabelle 2 sind die Werte der Backgroundmessung nach dem Neuaufbau und der Backgroundmessung Ende aller Messungen als Mittelwert der ersten und zweiten Hälfte über die Fahrzykluslänge und der Wert über die komplette Dauer dargestellt. Die Konzentration blieb bei beiden Messungen über die ganze Messdauer stabil und sehr tief (Abbildung 2.2.1). Die erste Messung ergab für Partikel >23nm weit unter 0.1 1/cm^3. Die Messungen am Ende aller Messungen ergab für Partikel >23nm 0.17 1/cm^3 und für Partikel >10nm 0.22 1/cm^3.
Selbstverständlich wurden alle diese Messungen als Vorbereitung bei beiden Fahrzeugen durchgeführt. Die folgende Tabelle 2 und Abb. 2.2.1, 2.3.1 und 2.3.2 sind Resultate der Vorbereitungen der Messungen beim BEV-Fahrzeug. Sehr ähnliche Ergebnisse gab es auch mit dem VM-Fahrzeug.

	BG 1	BG 49
	> 23nm	> 23nm
	1/cm3	1/cm3
Mittel 1/2		
WLTC	0.01	0.18
s	0.01	0.11
Mittel 2/2		
WLTC	0.01	0.16
s	0.01	0.08
Mittel		
Total	0.01	0.17
s	0.01	0.12

Tabelle 2: Gemessene Partikelkonzentrationen (Mittelwerte) im Background (BG), mit Spülluftstrom (keine Bremsvorgänge).

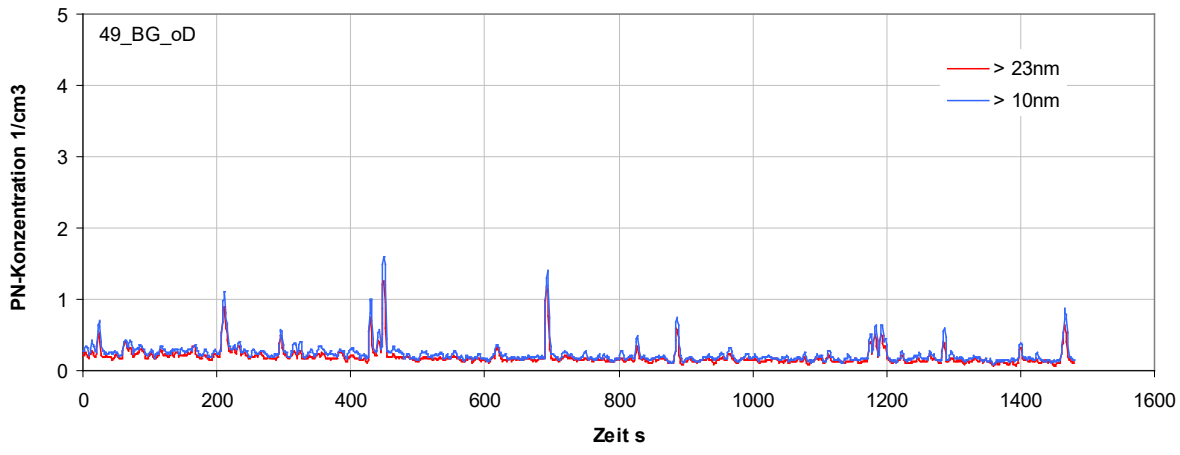


Abbildung 2.2.1: Zeitaufgelöste PN-Backgroundmessung BG49.

Auf eine Verifikation des gewählten Spülluftflusses von 225 kg/h wurde verzichtet, da die eingesetzte Scheibenbremse vom gleichen Typ wie die beim bereits getesteten Hybridfahrzeug ist. Dies wurde durch Vergleich der Bremsscheibentemperaturen der rechten eingehausten Bremse mit der linken nicht eingehausten Bremse (siehe Abschnitt 2.8) durch die praktisch gleichen Temperaturen bestätigt.

2.3 Abschätzung der Partikel-Transporteffizienz der Transferleitung

Die Abschätzung berücksichtigt Diffusions-, Trägheits- und gravimetrische Verluste der kompletten Verrohrung vom Auslass des Bremsgehäuses bis zum 13-stufigen DLPI. Die Diffusionsverluste wurden nach Holman (1972) [1] und Friedlander (1977) [2], die Trägheitsverluste nach Piu et al. (1987) [3] und die gravimetrischen Verluste nach Fuchs (1964) [4] und Thomas (1958) [5] berechnet. Neben dem hauptsächlichen Transportluftfluss von 220 kg/h wurden Wirkungsgrade für Partikel mit einer Dichte von 1 kg/dm^3 bei 170 und 270 kg/h Fluss abgeschätzt, die aber keinen relevanten Unterschied zeigten (Abb. 2.3.1). Bei Abschätzungen mit 200 kg/h Fluss und einer Partikeldichte von 0.7 und 2 kg/dm^3 zeigten die leichteren Partikel ab ca. 2 µm etwas bessere Wirkungsgrade und die schwereren Partikel ab ca. 5 µm markant schlechtere Wirkungsgrade (Transporteffizienz< 90%) (Abb. 2.3.2).

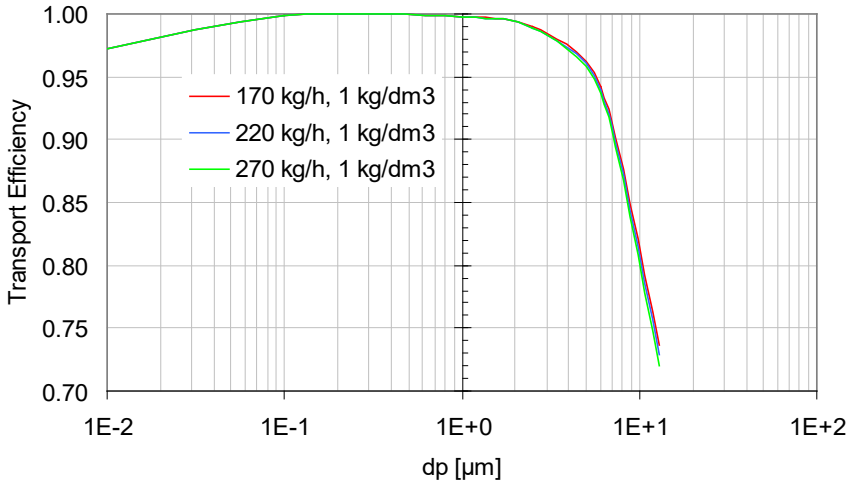


Abb. 2.3.1: Transport-Effizienz in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers bei einer Dichte von 1 kg/dm^3 für 170, 220 und 270 kg/h Fluss

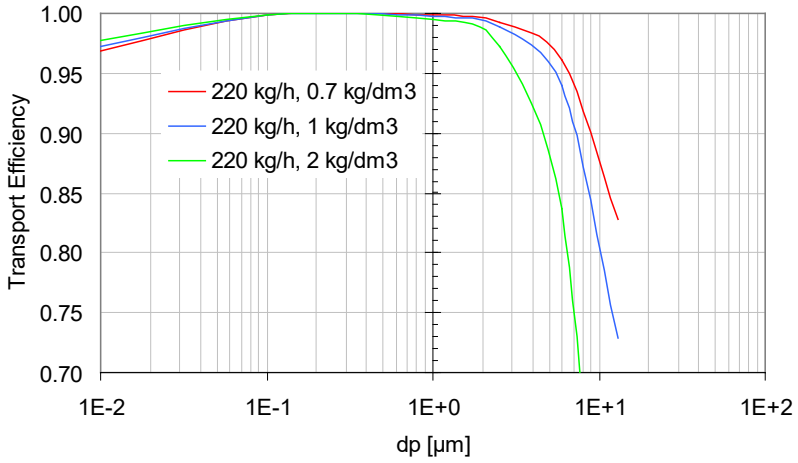


Abb. 2.3.2: Transport-Effizienz in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers bei 220 kg/h Fluss und Dichten von 0.7, 1.0 und 2.0 kg/dm^3.

Basierend auf diesen Abschätzungen kann klar davon ausgegangen werden, dass die Transporteffizienz der Partikel von 10nm bis 20µm bei über 95% liegt.

2.4 Fahrzyklus

Für die Messungen wurde der für Personenwagen aktuelle Emissions-Zertifizierungszyklus WLTC [6] verwendet. Dieser Zyklus beinhaltet 4 Teile mit unterschiedlichen Fahrprofilen (Abb. 2.4.1). Wie unter 3.1 erwähnt, wurde wegen der benötigten speziellen Radfixierung der Hochgeschwindigkeitsteil "extra high" mit hohen Geschwindigkeiten separat untersucht.

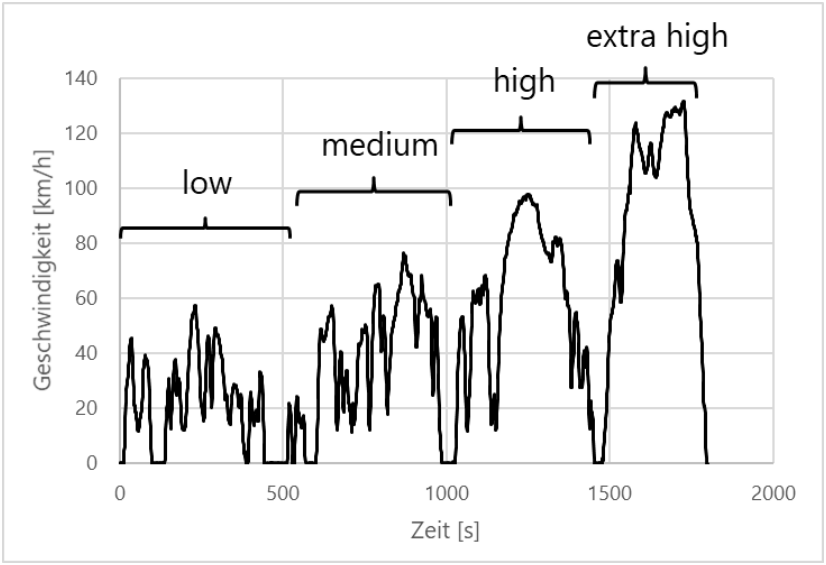


Abbildung 2.4.1: Fahrprofil des WLTC-Zyklus mit Teilzyklen.

2.5 Testfahrzeuge

Hersteller:	VW	Audi
Modell:	ID 3 pro	A3 gtron
Motorisierung:	Elektromotor 150kW	Verbrennungsmotor 81kW
	Batterie: 58 kWh	
Inverkehrssetzung:	2021	2015
Km-Stand:	12’877 km	90'718 km
Leergewicht	1815 kg	1820 kg
Fahrmodi:	Komfort, Eco, Sport	
Bremsen Vorderachse	Scheiben	Scheiben
Bremsen Hinterachse	Trommeln	Scheiben

Beide Fahrzeuge waren mit serienmässigen Bremsanlagen ausgerüstet, bei denen für die vorliegenden Untersuchungen, ausser der Einhausung der einen Vorderradbremse, keine Änderungen vorgenommen wurden.

Bei beiden Fahrzeugen wurde während den Untersuchungen die Temperatur der beiden vorderen Bremsscheiben gemessen. Dadurch sollte überprüft werden ob die Einkapselung und kontrollierte Belüftung der rechten Scheibenbremse zu signifikant anderen Temperaturen führt.

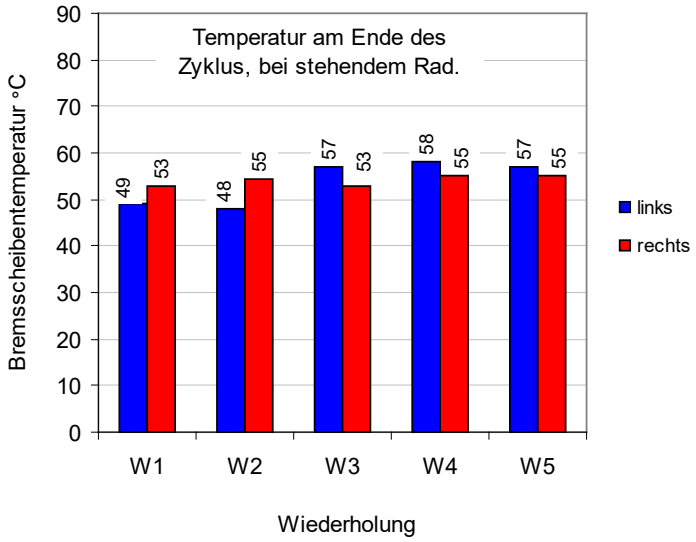


Abbildung 2.4.1: Temperaturen der linken und der rechten (eingekapselten und kontrolliert belüfteten) Scheibenbremse am Zyklusende (VM-Fahrzeug).

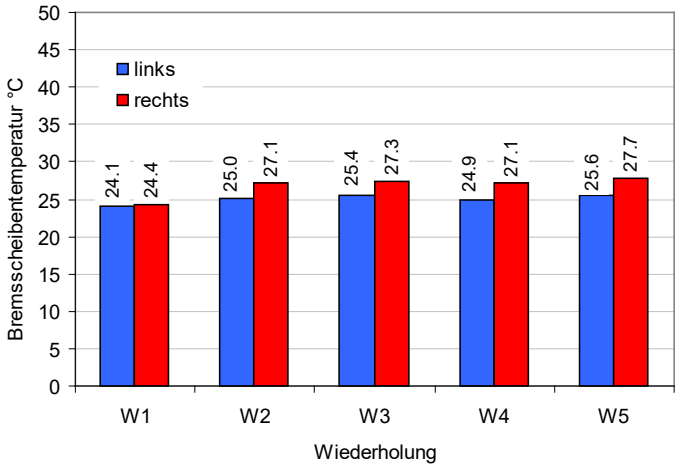


Abbildung 2.4.2: Temperaturen der linken und der rechten (eingekapselten und kontrolliert belüfteten) Scheibenbremse am Zyklusende (BEV-Fahrzeug).

Bei beiden Fahrzeugen sieht man, dass die Differenz der Temperaturen zwischen der linken und rechten Scheibe vernachlässigbar klein ist. Zudem sieht man, dass alle Temperaturen relativ tief sind. In der Literatur geht man davon aus, dass Scheibentemperaturen über 130°C zu erheblicher Verstärkung der Bremspartikelemissionen führen, [7]. Nach Abb. 2.4.1 und 2.4.2 sind die vorliegenden Versuche bei deutlich tieferen Temperaturen durchgeführt worden. Interessanterweise sind die Temperaturen der vorderen Scheiben des BEV-Fahrzeug deutlich tiefer als diejenigen des VM-Fahrzeugs. Dies ist eine Folge davon, dass beim BEV weniger mechanisch gebremst wird (ein erheblicher Teil der Bremsenergie wird durch Rekuperation in elektrische Energie umgewandelt).

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Analyse der Bremsvorgänge des Batterie-Elektrischen Fahrzeugs (BEV)

In Abb. 3.1.1 sind zeitaufgelöst die kumulativen Bremsenergien ab Zyklusstart an die beiden mechanischen Vorderradbremsen (blau) und die beiden mechanischen Hinterradbremsen (rot), wie vom Prüfstand gemessen, aufgetragen. Weiterhin ist die elektrische Rekuperationsbremsenergie (grün) dargestellt. Der Ladezustand der Batterie (State of Charge, SoC) am Zyklusstart war 100%.
100% SoC am Zyklusstart wurde ausgewählt um bei einem möglichst definierten, vergleichbaren Anfangszustand die Messungen durchzuführen, dabei war 100% SoC stets laut der OBD Anzeige. Dies ist ein definierter Zustand der Batterie, der aber in der Regel nicht mit der effektiven vollständigen Ladung der Batterie übereinstimmt. Möglicher Nachteil könnte beschränktes Rekuperationsvermögen am Zyklusstart sein (bei einer effektiv vollgeladenen Batterie kann man keine Bremsenergie rekuperieren) und somit mehr mechanisches Bremsen. Im Abschnitt 3.2.3 konnte erwiesen werden, dass der Ladezustand der Batterie am Zyklusanfang die Bremspartikelemissionen nur geringfügig beeinflusst.
Für die Beurteilung des momentanen Fahrzustandes ist zusätzlich der Verlauf der Fahrgeschwindigkeit (schwarz) dargestellt. Die totale Bremsenergie, die Summe also der Bremsenergie an den Vorder-, den Hinterrädern und der Rekuperation, wird durch die violette Linie dargestellt. Klar zu erkennen ist, dass ein grosser Teil der Bremsenergie elektrisch aufgebracht, also rekuperiert wird. Von dem Rest der Bremsenergie wird der grösste Anteil mechanisch von den Bremsen der Vorderräder erbracht und der kleinere Anteil (auch mechanisch) von den Bremsen der Hinterräder.
Die hellblaue Linie stellt die aus der Batterie entnommene Energie dar. Diese wurde mit dem Signal zum Ladezustand der Batterie, welches aus dem On Board Diagnose (OBD) des Fahrzeuges entnommen wurde, berechnet. Deswegen ist diese, diskret, weniger kontinuierlich, weil grob aufgelöst. Als weitere Information ist die totale Beschleunigungsenergie (gelb), wie vom Prüfstand gemessen, dargestellt. Trotz der relativ grob aufgelösten, aus der Batterie entnommen Energie sieht man, dass die Energiebilanz eingehalten wird, ist die Beschleunigungsenergie (gelb) nur leicht geringer als die Summe der aus der Batterie entnommenen Energie (hellblau) und der Rekuperationsenergie (grün).

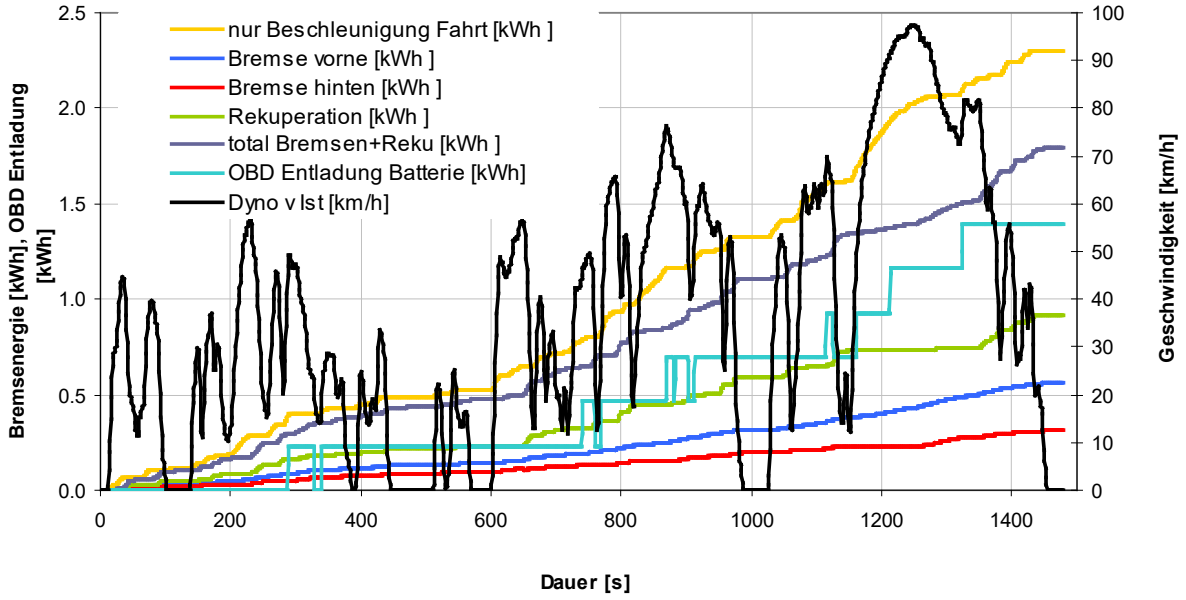


Abbildung 3.1.1: Vergleich der einzelnen Bremsenergien, mechanisch an den Vorder-(dunkelblau), den Hinterrädern, (rot) und elektrisch durch Rekuperation, (grün) sowie deren Summe (violett) für den gesamten WLTC-Zyklus im Komfort Modus bei 100% SoC am Zyklusstart. Die gelbe Linie zeigt die Beschleunigungsenergie, während die hellblaue Linie der berechneten, aus der Traktionsbatterie entnommenen Energie (basierend auf dem vom Fahrzeug OBD ausgegeben Batterieladezustand) entspricht.

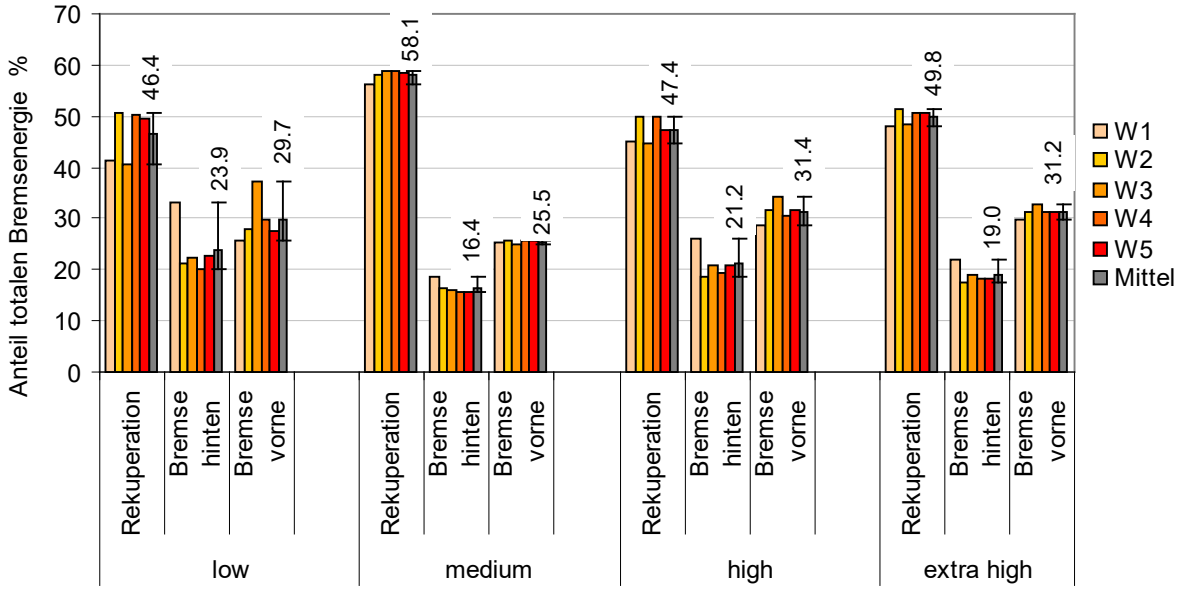


Abb. 3.1.2: Vergleich der Bremsenergien der wiederholten Zyklen und der Summe aller Bremsenergien für den gesamten WLTC-Zyklus im Komfort Modus bei 100% SoC.

Die relativen Anteile dieser Energien werden in Abb. 3.1.2 bei 5 wiederholten, gesamten WLTC-Zyklen dargestellt. Die Zyklen wurden im Komfort Modus gefahren und der SoC beim Start war jeweils 100%.

Das Diagramm zeigt, aufgeteilt in die Teilzyklen und für jede Zykluswiederholung mit einem Mittelwert für jeden Teilzyklus (graue Balken), dass durchwegs nur ca. 46-58% (Teilzyklenmittelwerte) der totalen Bremsenergie durch Rekuperation aufgebracht wird und dass der Anteil der Vorderbremse zwischen 25.5 und 31.4 % liegt und der Anteil der hinteren Bremse von 16.4 bis 23.9 % variiert.
Grundsätzlich ist die Aufteilung der Energien über die wiederholten Zyklen sehr konstant.
Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass 50% der Bremsenergie durch Rekuperation von den Hinterrädern an die Batterie zurückgespeist werden und dass 30% der Bremsenergie mechanisch an den Vorderrädern und 20% der Bremsenergie mechanisch an den Hinterrädern anfällt.

3.2 PN-Emissionen in den WLTC-Zyklen

3.2.1 PN-Emissionen (>23nm) in WLTC-Zyklen (ohne Extra High Teilzyklus)

Abb. 3.2.1 zeigt die Rollenkraftverläufe der 5 wiederholten Zyklen für das verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeug (VM). Eine sehr gute Wiederholbarkeit der Rollenkraft und somit auch der Bremsphasen (negative Rollenkraft, Fvorne Dyno) wurde erzielt.

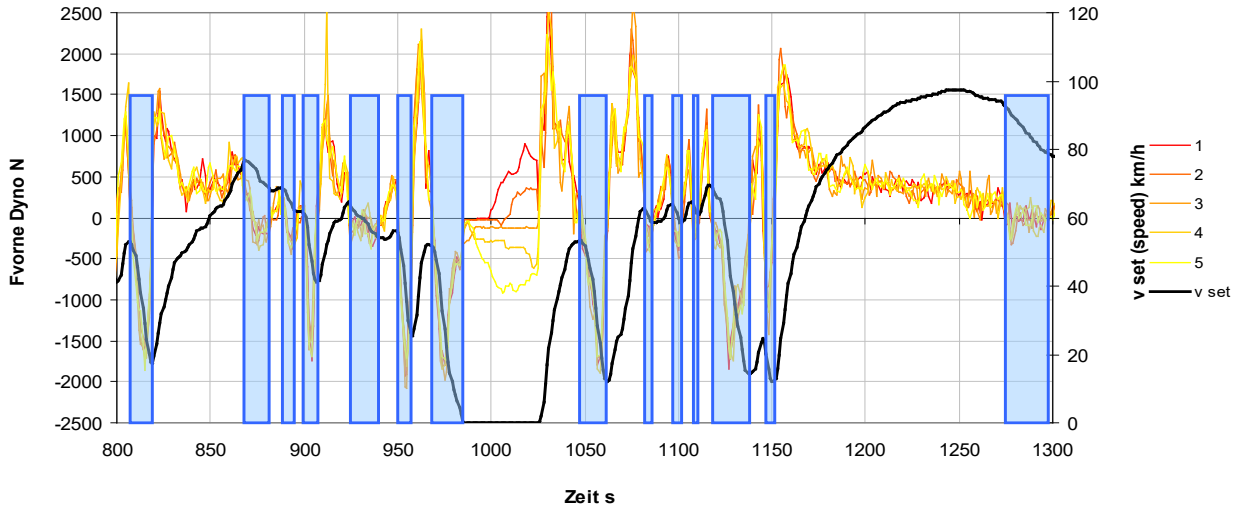


Abbildung 3.2.1: Vergleich der Rollenkräfte (Fvorne-Dyno) von 5 nacheinander gefahrenen WLTC-Zyklen (rote bis gelbe Linien), VM-Fahrzeug. Blaue Bereiche markieren Bremsphasen (negative Rollenkraft, Fvorne-Dyno).

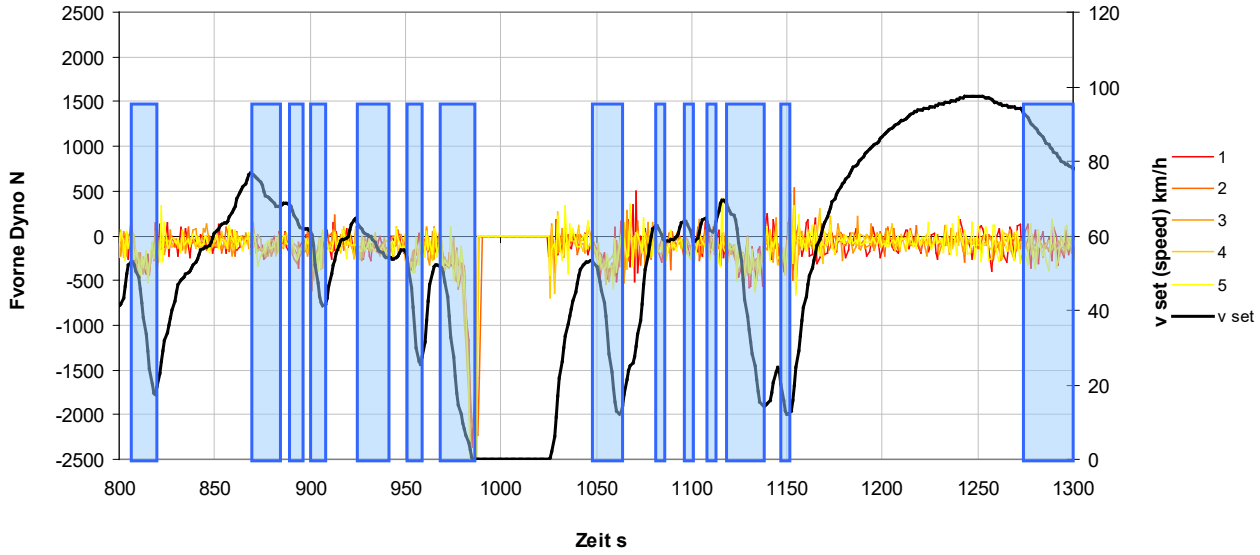


Abbildung 3.2.2: Vergleich der Rollenkräfte (Fvorne-Dyno) von 5 nacheinander gefahrenen WLTC-Zyklen (rote bis gelbe Linien), BEV-Fahrzeug im Komfort Modus, ausgehend von 100% SoC. Blaue Bereiche markieren Bremsphasen (negative Rollenkraft, Fvorne Dyno).

Abb. 3.2.2 zeigt die ähnliche Darstellung für das BEV-Fahrzeug. Erneut sieht man die sehr gute Wiederholbarkeit der Bremskräfte über die 5 Wiederholungen. Auffallend ist das Fehlen der positiven Antriebskräfte; angetrieben wird ja die Hinterachse und Abb. 3.2.2 zeigt nur die Kräfte auf der Vorderachse. Der Vergleich der Bremskräfte zum VM-Fahrzeug zeigt aber auch, dass das VM-Fahrzeug über längere Zeitabschnitte (z.B. zwischen 800s und 950s) viel höhere Bremskräfte als das BEV-Fahrzeug an der Vorderachse aufweist. Hingegen ist die nötige Bremskraft bis zum Stillstand, z.B. bei Sekunde 980 beim BEV-Fahrzeug deutlich höher als beim VM-Fahrzeug.

Abb. 3.2.3 und 3.2.4 zeigen, dass PN-Emissionen (blaue Linie) hauptsächlich - aber nicht nur - beim Bremsen auftreten (negative Rollenkraft am Vorderrad, rote Linie) dies für das verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeug (VM).

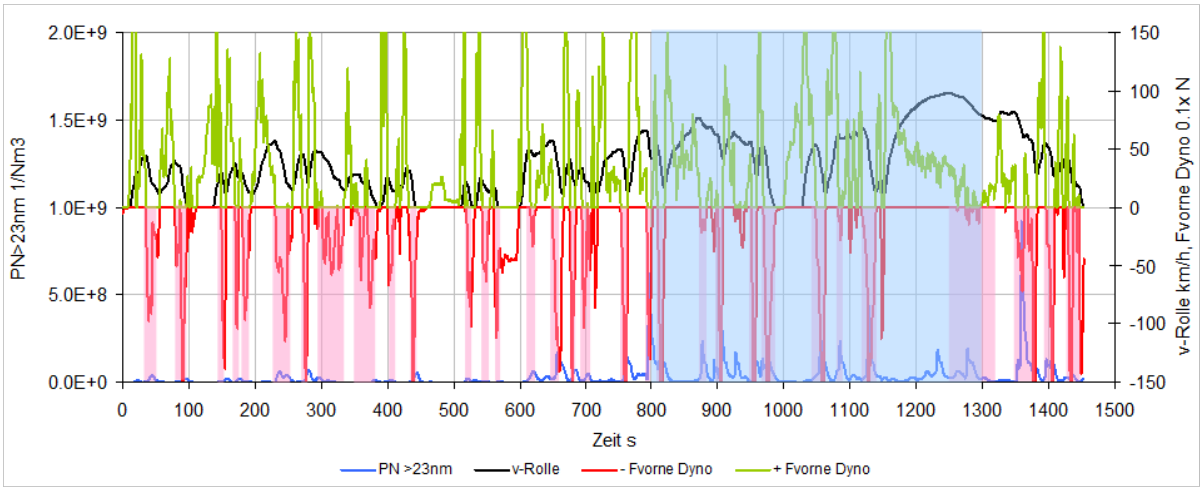


Abbildung 3.2.3: Geschwindigkeitsverlauf (schwarze Linie), PN-Emissionen (blaue Linie) und Rollenkraft (grüne/rote Linie) des VM-Fahrzeuges. Der blaue Bereich ist in Abbildung 3.2.4 zur besseren Detailanalyse vergrössert dargestellt.

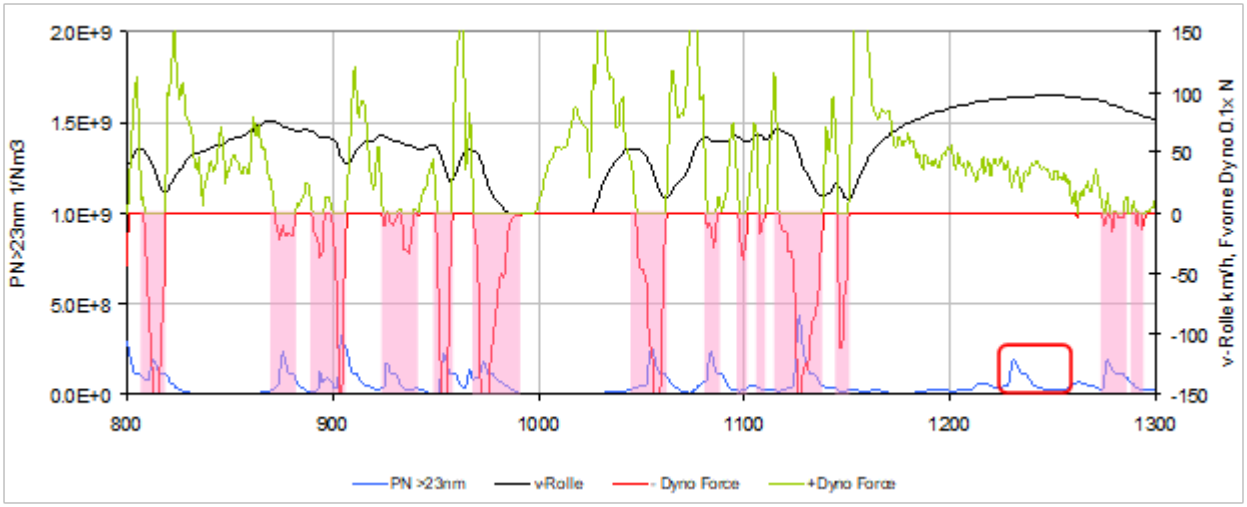


Abbildung 3.2.4: Vergrösserung des blau gekennzeichneten Bereiches der Abb. 3.2.3 (VM-Fahrzeug).

Klar sieht man, dass jeder Bremsvorgang (rot gefärbter negativer Teil der Kraftkurve) eine Spitze in den Partikeln hervorruft. Man sieht aber auch, dass manchmal Partikel ohne einen unmittelbaren Bremsvorgang emittiert werden (rote Umkreisung). Im bereits abgeschlossenen Projekt über die Bremspartikelemissionen eines hybridelektrischen Fahrzeuges wurden solche Spitzen auf das Lösen von vorhandenen Bremspartikeln aus den Bremspartneroberflächen zurückgeführt. Solche Emissionsspitzen wurden am meisten im letzten Zyklusteil registriert. Da erreicht das Fahrzeug nach den ersten Zyklusteilen mit tiefen Geschwindigkeiten, höhere Geschwindigkeiten. Auf den Oberflächen der Reibpartner abgelagerte Partikel werden durch die höheren aerodynamischen Kräfte von der Luft mitgerissen und in die Umgebung emittiert.

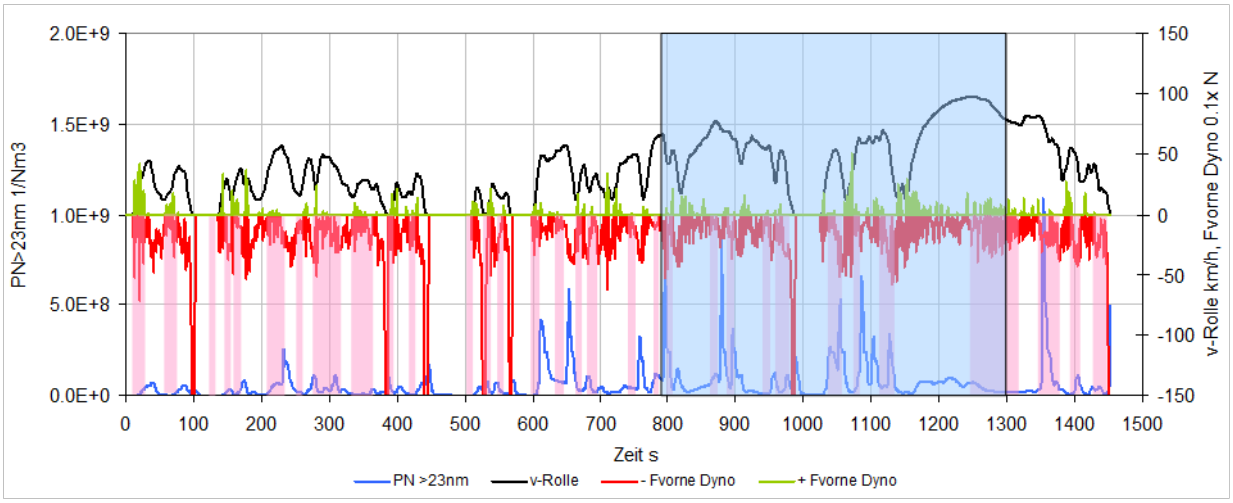


Abbildung 3.2.5: Geschwindigkeitsverlauf (schwarze Linie), PN-Emissionen (blaue Linie) und Rollenkraft (grüne/rote Linie) des BEV-Fahrzeuges. Der blaue Bereich ist in Abbildung 3.2.4 zur besseren Detailanalyse vergrössert dargestellt (Komfort Modus, 100% SoC am Zyklusstart).

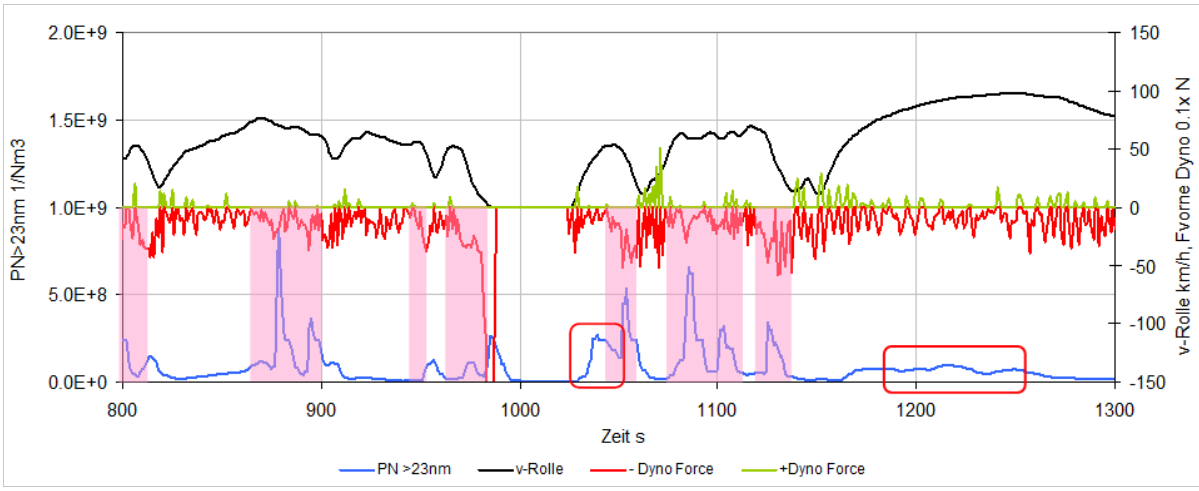


Abbildung 3.2.6: Vergrösserung des blau gekennzeichneten Bereiches der Abb. 3.2.3 (BEV-Fahrzeug) (Komfort Modus, 100% SoC am Zyklusstart).

Sehr ähnlich sieht ein typischer WLTC-Zyklus für das Batterie-Elektrische Fahrzeug (BEV) aus. Allerdings gibt es einige wichtige Unterschiede in Abb. 3.2.5 und Abb. 3.2.6 zu erkennen. Diese können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Beim BEV-Fahrzeug kann man die Antriebskraft (+ Dyno Force, grün) nicht sehen, da diese nicht von den Vorderrädern aufgebracht wird (die wenigen positiven Spitzen kommen aus dem Nachregeln der Vorderachse vom Prüfstand).
- Bremsvorgänge, die zu Bremspartikeln führen sind beim BEV-Fahrzeug seltener als beim VM-Fahrzeug, da die elektrische Rekuperation zum Bremsen genutzt wird (z.B. zwischen Sekunde 920 und 960 werden praktisch keine Bremspartikelemissionen registriert, benutzt also das BEV-Fahrzeug die elektrische Rekuperationsbremse an der Hinterachse).
- Bremspartikelspitzen, wann immer beim BEV-Fahrzeug die mechanischen Bremsen zum Einsatz kommen, sind um ein Vielfaches höher als beim VM-Fahrzeug (vergl. Abb. 3.2.3).

In Abb. 3.2.7 sind die PN-Emissionen der 5 wiederholten WLTC-Zyklen desselben Zeitabschnittes wie in Abb. 3.2.1 verglichen. Obwohl die Bremskraft für alle wiederholten Zyklen praktisch identisch war, werden nicht die gleichen Partikelemissionen an der Scheibenbremse erzeugt (rot umrahmte Emissionsspitzen).

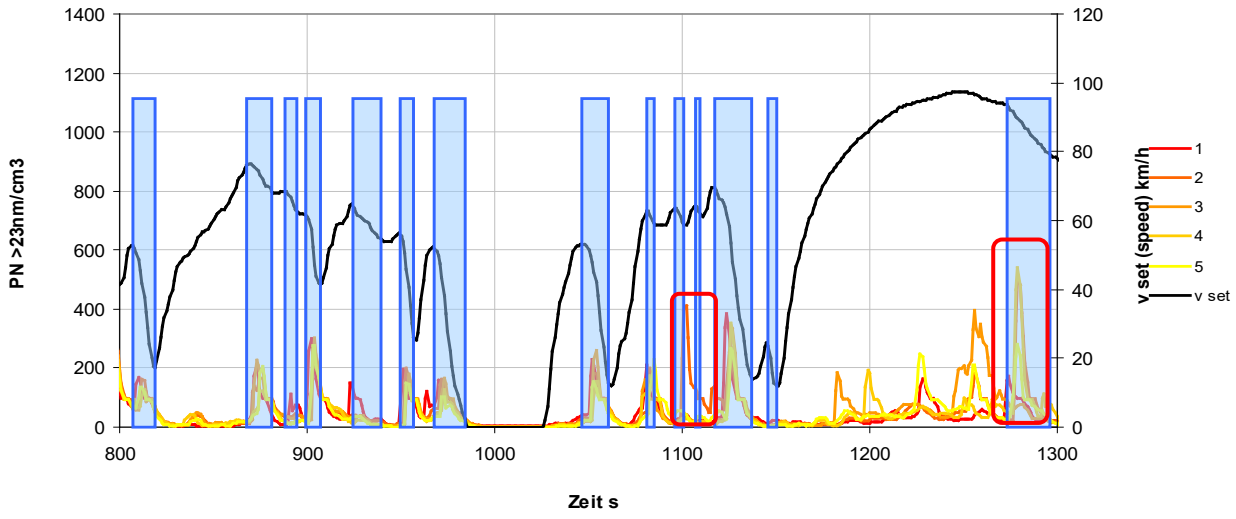


Abbildung 3.2.7: Vergleich der PN-Emissionen der 5 nacheinander gefahrenen WLTC-Zyklen (rote bis gelbe Linien) von Abb. 3.2.1 und 3.2.3, VM-Fahrzeug. Blaue Bereiche markieren Bremsphasen (negative Rollenkraft, F-Dyno). Rot umrahmt sind Bremsevents die teilweise sehr hohe PN-Emissionen verursachten.

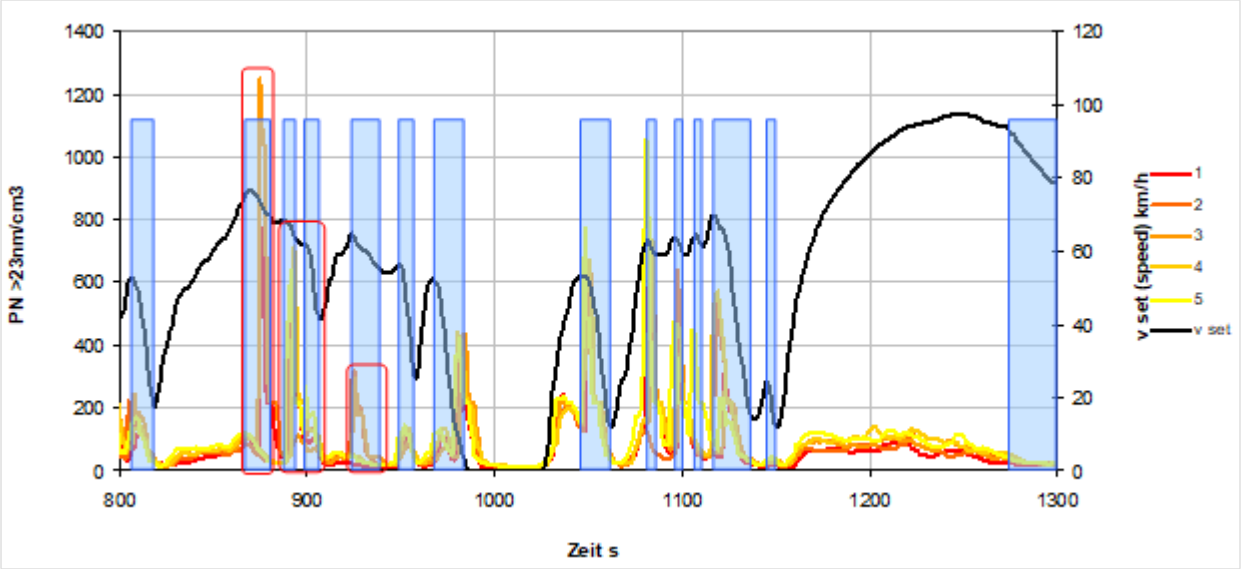


Abbildung 3.2.8: Vergleich der PN-Emissionen der 5 nacheinander gefahrenen WLTC-Zyklen (rote bis gelbe Linien) von Abb. 3.2.2 und 3.2.5, (BEV-FAHRZEUGKomfort Modus, 100% SoC am Zyklusstart). Blaue Bereiche markieren Bremsphasen (negative Rollenkraft, F-Dyno). Jede Bremsphase zeigt deutliche, unterschiedlich hohe PN Emissionen. Rot umrahmt sind Bremsevents, die teilweise sehr hohe PN-Emissionen verursachten.

Das BEV-Fahrzeug hat deutlich höhere Brems-PN Emissionsspitzen, trotz der eher geringeren, mechanischen Bremskräfte (siehe Abb. 3.2.1 und 3.2.2).

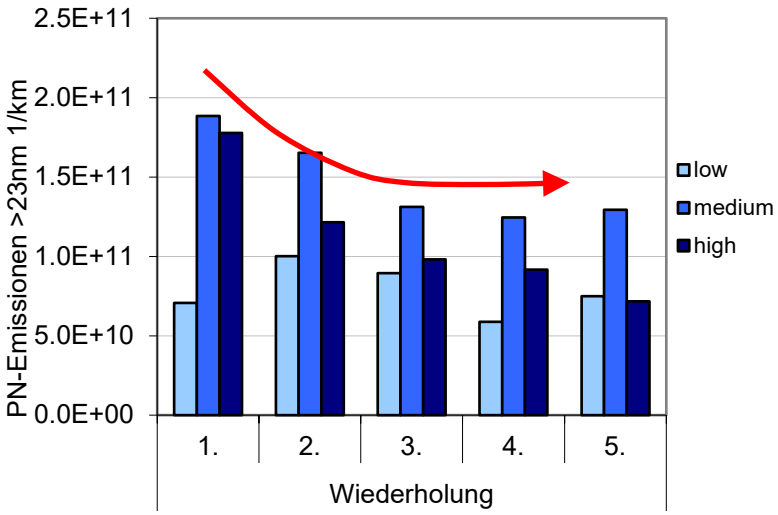


Abbildung 3.2.9: Vergleich der emittierten Bremspartikel der WLTC Teilzyklen von 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen (VM-Fahrzeug).

In Abb. 3.2.9 sind die emittierten Partikel der WLTC-Phasen der wiederholten Zyklen verglichen. Wie im Bild gezeigt, sinken die PN-Emissionen während den ersten 3 Zyklen deutlich und bleiben danach stabil (roter Pfeil). Dies ist entsprechend den bereits durchgeführten Bremspartikelmessungen an einem leicht

hybridisierten Fahrzeug und stimmt mit der Literatur überein, welche als Ursache einen längeren Einlauf mit sinkenden Emissionen bei Reibpaarungen beschreibt und dies als "bedding" bezeichnet [7].
Die höchsten PN-Emissionen während dem Zyklus fallen durchwegs im zweiten Teil (medium) an. Dies ist ähnlich den Messungen an einem leicht hybridisierten Fahrzeug, bei welchem ebenfalls im medium Teil die höchsten Partikelemissionen auftraten.

In Abb. 3.2.10 sind die emittierten Partikel der 3 ersten WLTC-Phasen der wiederholten Zyklen beim BEV-Fahrzeug verglichen. Es gibt deutliche Unterschiede zum VM-Fahrzeug (Abb. 3.2.9). Als erstes werden die meisten Bremspartikel nicht nur im zweiten Zyklusteil, sondern eher im ersten Zyklusteil emittiert. Dies mag eine Konsequenz der höheren Rekuperation während dem zweiten Zyklusteil sein (siehe Abbildung 3.1.2). Die Bremspartikelemissionen nimmt mit jeder Zykluswiederholung zu. Dies ist im grossen Gegensatz zum VM-Fahrzeug und auch dem in der Literatur berichteten "bedding" Effekt.

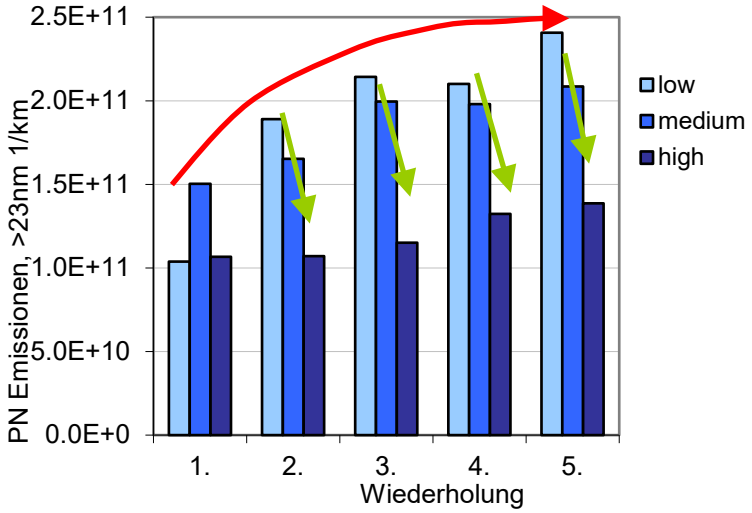


Abbildung 3.2.10: Vergleich der emittierten Bremspartikel der WLTC Teilzyklen von 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen (BEV, Komfort Modus, 100% SoC am Zyklusstart).

Die stark unterschiedliche Charakteristik der Bremspartikelemissionen der beiden Fahrzeuge, VM und BEV, ist höchstwahrscheinlich auf unterschiedliche Materialwahl zurückzuführen. Die Bremspartikelemissionen des VM-Fahrzeug sind gut vergleichbar mit denjenigen von einem hybriden Fahrzeug (siehe Abschnitt 3.6), das unter sehr ähnlichen Bedingungen in dem vorangegangenen Projekt auf unserem Prüfstand gemessen wurde. Deswegen liegt die Vermutung nahe, dass für das BEV-Fahrzeuge spezielle Bremsbeläge verwendet wurden. Die Gründe dafür sind nicht bekannt.

3.2.2 Analyse der Bremspartikelemissionen des VM-Fahrzeugs

Die Reduktion der Bremspartikel beim VM-Fahrzeug nach jedem gefahrenen Zyklus wurde weiter untersucht. Die 5 aufeinanderfolgende Zyklen wurden insgesamt 3-mal wiederholt. In Abb. 3.2.11 sind die

PN-Emissionen (WLTC ohne Extra High Teilzyklus) von den fünf Serien mit jeweils 3 Wiederholungen dargestellt. Es ist ein einmaliges Abklingen der PN-Emissionen ("bedding") während der ersten Serie von fünf Wiederholungen ersichtlich. Die PN-Emissionen der zweiten und dritten Serie bleiben durchwegs auf einem ähnlichen Niveau wie am Ende der ersten Serie. Ein leichtes Absinken der PN-Emissionen mit zunehmenden Wiederholungen ist jedoch noch sichtbar.

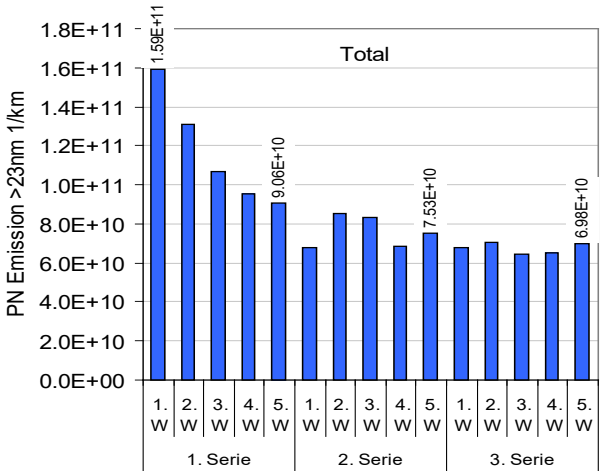


Abbildung 3.2.11: Vergleich der emittierten Partikel des WLTC-Zyklus ohne Extra High Teilzyklus (VM-Fahrzeug).

3.2.3 Analyse der Bremspartikelemissionen des BEV-Fahrzeugs

Für das BEV-Fahrzeug wurde eine Reihe von speziellen Messungen durchgeführt. Ziel war es, die Einflüsse von folgenden Parametern auf die Bremspartikelemissionen zu untersuchen:

- Fahrmodus (Komfort, Eco, Sport)
- Ladezustand der Batterie am Zyklusanfang

Zusätzlich wurde ein zweiter Codensation Particle Counter (CPC) eingesetzt, der Partikel >10nm zählen kann.

Das getestete BEV-Fahrzeug konnte in drei unterschiedliche Fahrmodi eingestellt werden: Komfort, Eco und Sport. In Abb. 3.2.12 sind die gemessenen PN-Emissionen der Modi Komfort, Eco und Sport über den WLTC ohne Extra High dargestellt. Mit den Modi Komfort und Sport wurden jeweils 2 Wiederholserien durchgeführt. Auch hier ist ein Anstieg der Emissionen über die ersten 2 Serien klar sichtbar. Sofern nur die Wiederholmessungen 3-5 verglichen werden, liegen die Emissionen für alle Modi in einer Bandbreite von 1.5E+11 bis 2.0E+11 Partikel/km. Der Eco Modus zeigt dabei eine leicht höhere und der Sport Modus eine leicht tiefere Bremspartikelemissionen.

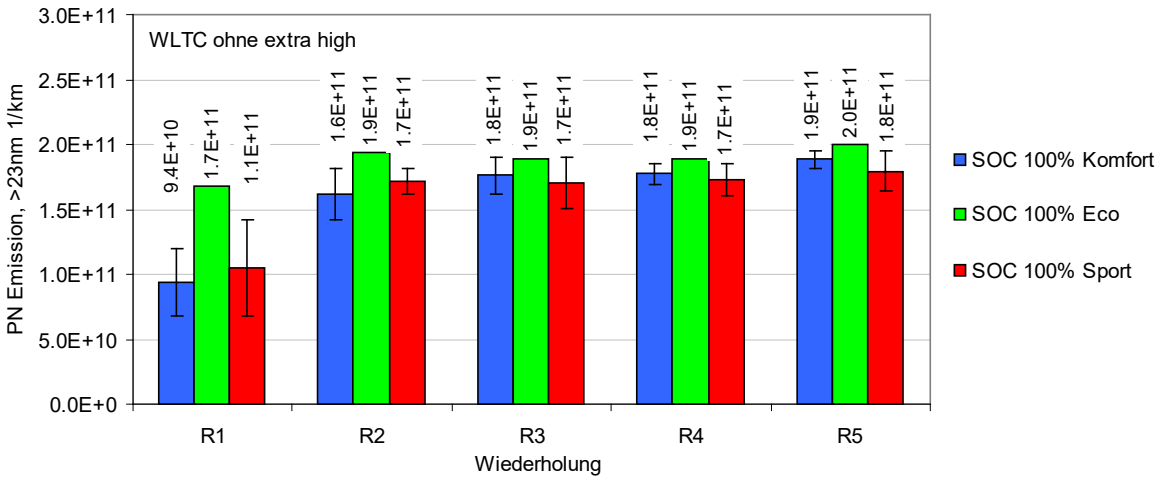


Abbildung 3.2.12: Vergleich der emittierten Partikel bei unterschiedlichen Betriebsmodi im WLTC-Zyklus ohne Extra High. Im Komfort und Sport Modus wurden je 2 Messserien durchgeführt. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte (BEV, 100% SoC am Zyklusstart).

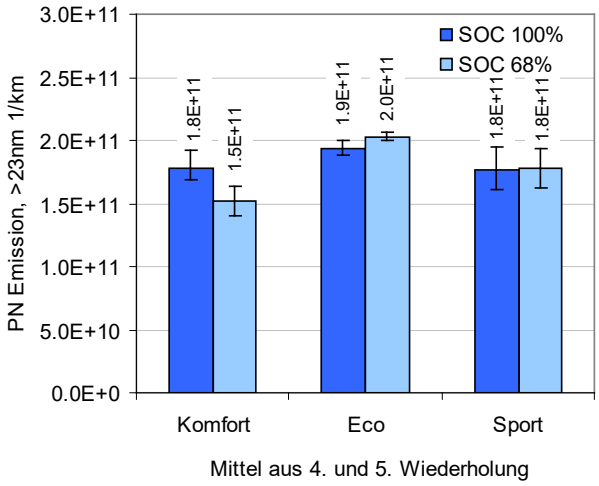


Abbildung 3.2.13: Vergleich der Bremspartikelemissionen bei unterschiedlicher Batterieladung am Zyklusstart (BEV). Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte.

Der Ladezustand der Batterie (SoC) eines BEV-Fahrzeuges kann die Bremspartikelemissionen beeinflussen. Ist die Batterie effektiv vollständig geladen, (SoC=100%), kann keine Bremsenergierekuperation stattfinden. Das grösste Potential für Rekuperation liegt bei möglichst leerer Batterie. Auf der anderen Seite, sollte der WLTC-Zyklus bei einem zu tiefen Batterieladezustand angefangen werden, kann er nicht vollständig gefahren werden. In Abb. 3.2.13 sind die Brems-PN-Emissionen über den WLTC ohne Extra High mit einem SoC von 100% und 68% am Zyklusstart verglichen. Mit den Modi Komfort und Sport wurden jeweils 2 Wiederholserien durchgeführt. Es sind leicht höhere PN-Emissionen im Eco Modus für beide SoC 100% und 68% (1.9E+11 1/km bzw. 2.0E+11 1/km) sichtbar und im Sport Modus (1.8E+11

1/km bzw. 1.8E+11 1/km) leicht tiefere. Im Komfort Modus sind die Mittelwerte (1.8E+11 1/km bzw. 1.5E+11 1/km).

In Abb. 3.2.14 sind die PN-Emissionen für >23nm und >10nm über den WLTC ohne Extra High verglichen. Wie ersichtlich, ist das Verhältnis von den PN Konzentrationen >10nm zu >23nm über alle Wiederholungen konstant (80.0-81.9%). Von besonderem Interesse ist die Tatsache, dass es hiermit erwiesen ist, dass, zwar nicht sehr viele, aber sicherlich eine beachtenswerte Anzahl ultrafeiner Bremspartikel emittiert wird, obwohl während aller dieser Versuche die Temperaturen der Reibpartner eher gering waren (siehe Abb. 2.4.1 und 2.4.2).

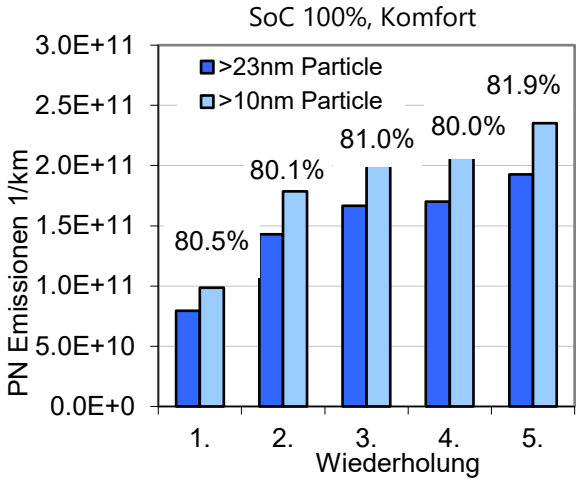


Abbildung 3.2.14: Vergleich der Emissionen von Bremspartikeln >23nm und >10nm des WLTC ohne Extra High (BEV-Fahrzeug, Komfort Modus, 100% SoC am Zyklusstart). Die den Balken beigefügten Werte sind die PN Konzentrationsverhältnisse (>10nm)/(>23nm) in %.

3.3 PN-Bremsemissionsfaktoren

In Abb. 3.3.1 sind Bremspartikel-PN Emissionen des VM-Fahrzeuges, aufgeteilt in Teilzyklen, von 5 wiederholten WLTCs (inklusive Extra High Teilzyklus) verglichen. Die angegebenen Bremspartikelemissionsfaktoren sind Messwerte von der rechten Vorderradbremse. Die Werte in Abb. 3.3.1 zeigen tiefste Bremspartikelemissionen im 1. Teil des WLTC (low, Mittelwert 2.9E+10 1/km), leicht höhere Werte im 3. Teil (high, Mittelwert 4.2E+10 1/km) und klar höhere, jedoch stärker streuende Werte im 2. Teil (medium, 6.5E+10 1/km) und 4. Teil (extra high 6.0E+10 1/km).

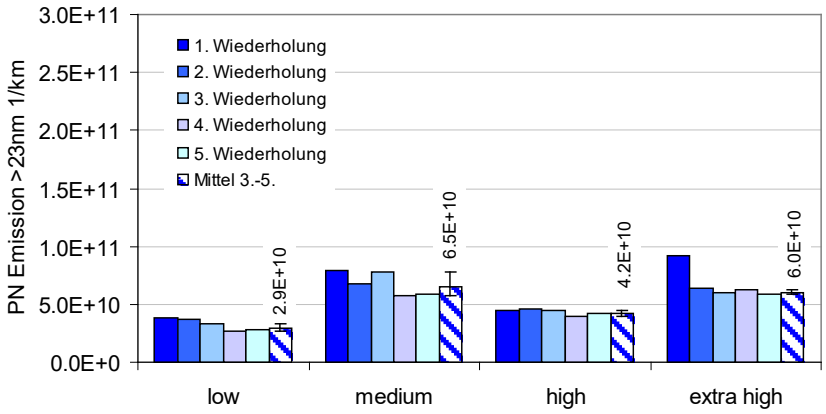


Abbildung 3.3.1: Emissionsfaktoren der einzelnen Teilzyklen für alle Wiederholungen mit Mittelwerten der 3. bis 5. Wiederholung. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte (VM-Fahrzeug).

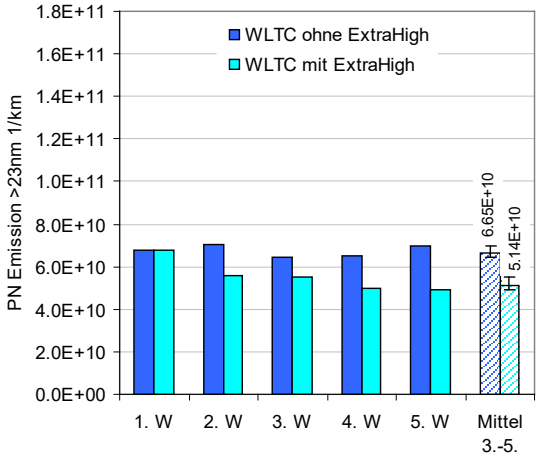


Abbildung 3.3.2: Vergleich der Emissionen von Bremspartikeln >23nm des gesamten WLTC-Zyklus ohne und mit Extra High Teilzyklus. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte (VM-Fahrzeug).

In Abbildung 3.3.2 sind die PN-Emissionen von gesamten WLTC-Zyklen mit 5 Wiederholungen ohne und mit Extra High Teilzyklus verglichen. Der Mittelwert der Wiederholungen 3-5 für den WLTC ohne Extra

High ist 6.65E+10 1/km (Min. 6.5E+10, Max. 7.0E+10 1/km) und für den WLTC mit Extra High mit 5.14E+10 1/km (Min. 4.9E+10, Max. 5.5E+10 1/km) leicht tiefer.

Diese Werte liegen etwas höher als die in der Literatur berichteten Werte [8]. Die bis jetzt veröffentlichten Werte stammen mehrheitlich aus Messungen an einem Prüfstand für Bremskomponenten. Die wenigen Werte in der Literatur, gemessen direkt an Fahrzeugen, sind auch tendenziell etwas tiefer.
Man sollte dazu noch überlegen, dass diese Werte aus den Messungen direkt an der rechten Vorderradbremse stammen. Für eine Abschätzung des Emissionsfaktors des ganzen Fahrzeuges sollten diese Werte, nach [9], verdreifacht werden, (man kann davon ausgehen, dass dieselben Emissionen von der linken Vorderradbremse erzeugt werden und dass die hinteren beiden Scheibenbremsen weniger emittieren, da die Bremskräfte an der Hinterachse deutlich tiefer sind). Somit kann der Bremspartikelemissionsfaktor des gesamten Fahrzeuges auf 1.54E+11 1/km abgeschätzt werden.

In Abb. 3.3.3 sind die Bremspartikel-PN Emissionen des BEV-Fahrzeuges, aufgeteilt in Teilzyklen, von 5 wiederholten WLTCs verglichen. Die angegebenen Bremspartikelemissionsfaktoren sind Messwerte aus der rechten Vorderradbremse. Die Messungen in Abb. 3.3.3 zeigen tiefste Werte im 1. Teil des WLTC (low, Mittelwert 1.0E+11 1/km), leicht höhere Werte im 3. Teil (high, Mittelwert 1.2E+11 1/km) und klar höhere, jedoch relativ stark streuende Werte im 2. Teil (medium, 1.9E+11 1/km) und 4. Teil (extra high 1.6E+11 1/km).

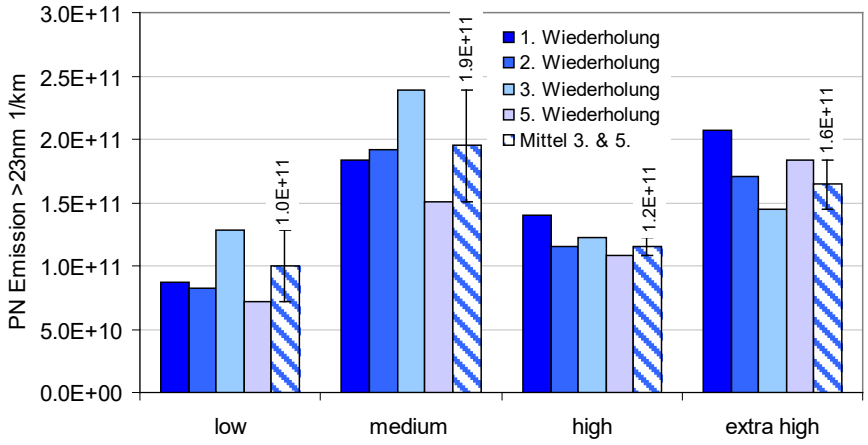


Abbildung 3.3.3: Emissionsfaktoren der einzelnen Teilzyklen für alle Wiederholungen mit Mittelwerten der 3. bis 5. Wiederholung. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte (BEV, Komfort Modus, 100% SoC am Zyklusstart).

In Abb. 3.3.4 sind die PN-Emissionen des Komfort Modus über den WLTC ohne und mit Extra High Teilzyklus verglichen. Der Mittelwert aus den Wiederholungen 3-5 für den WLTC ohne Extra High ist 1.7E+11 1/km (Min. 1.6E+11, Max. 1.8E+11 1/km) und für den WLTC mit Extra High mit 1.5E+11 1/km

(Min. 1.4E+11, Max. 1.6E+11 1/km) leicht tiefer. Durch die relativ stark streuenden Werte ist dieser Unterschied nicht eindeutig.

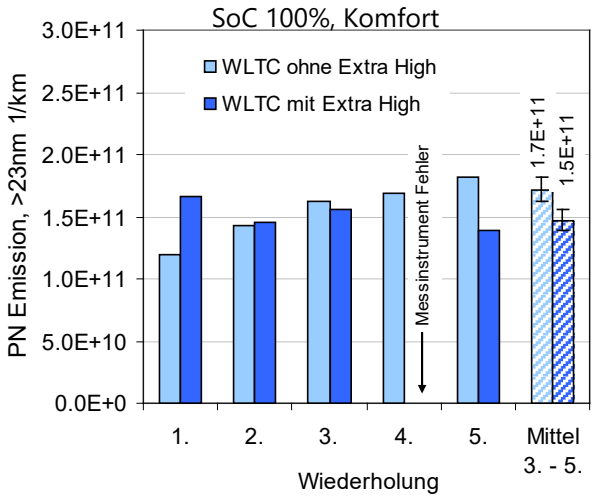


Abbildung 3.3.4: Vergleich der Emissionen von Bremspartikeln >23nm des gesamten WLTC-Zyklus ohne und mit Extra High Teilzyklus. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte (BEV, Komfort Modus, 100% SoC am Zyklusstart).

Diese sind die an rechten Vorderradbremse gemessenen Emissionsfaktoren. Der gesamte Brems-PN Emissionsfaktor des BEV-Fahrzeuges kann durch Verdoppelung dieser Werte approximiert werden. Dies basierend auf der Annahme, dass die Trommelbremsen an der Hinterachse keine PN emittieren. Somit kann der Bremspartikelemissionsfaktor des gesamten Fahrzeuges auf 3.2E+11 1/km abgeschätzt werden.

3.4 PM-Emissionen in den WLTC-Zyklen

3.4.1 PM-Emissionen von 3 Serien mit jeweils 5 wiederholten WLTC-Zyklen (ohne Extra High Teilzyklus)

Gleichzeitig mit den Wiederholmessungen der PN-Emissionen, beschrieben in Abschnitt 3.2 sind jeweils mit dem 13 Stufen Impaktor für die 2. und 3. Wiederholung und die 4. und 5. Wiederholung je ein Set Folien mit Back-up Filter beladen worden. In Abb. 3.4.1 sind von den 3 Testserien die mittleren PM-Grössenverteilungen des VM-Fahrzeuges als Konzentration (Background kompensiert) für den WLTC-Zyklus ohne Extra High Teilzyklus dargestellt. Zusätzlich ist der Backgroundmittelwert dargestellt (violett).

Die Partikel-Massen-Grössenverteilungen der wiederholten Messungen sind bei allen 3 Messserien bezüglich Partikeldurchmesser Modi sehr ähnlich (1.89-2.82 und 4.71-7.88µm). Wegen dem bereits beschriebenen "bedding" Effekt sind auch hier die Partikelemissionen der 1. Serie gegenüber der 2. und 3. Serie viel höher.

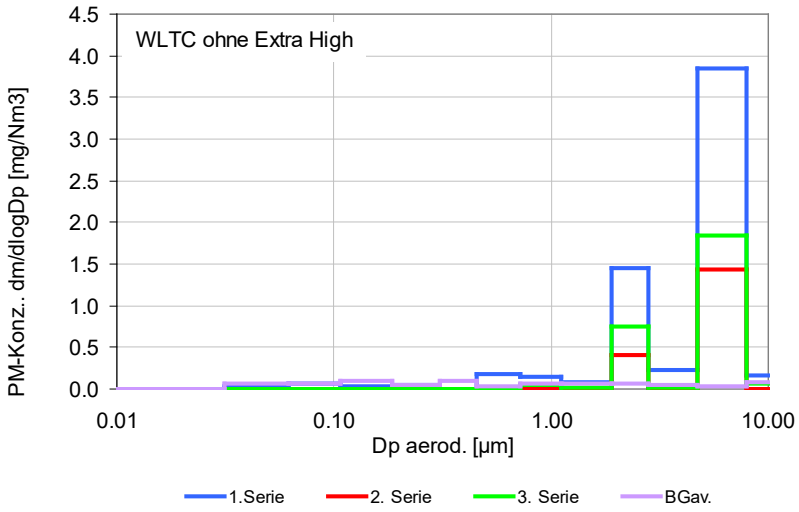


Abbildung 3.4.1: Mittlere PM-Grössenverteilungen als Konzentration (Background kompensiert) des WLTC-Zyklus (ohne Extra High Teilzyklus) von 3 Serien mit je 5 Wiederholungen. Ein Folienset mit Back-Up Filter wurde jeweils mit 2 Zykluswiederholungen beladen (VM-Fahrzeug).

In Abb. 3.4.2 bis 3.4.4 sind die entsprechenden Partikel-Massen-Grössenverteilungen als Konzentration (Background kompensiert) für die Fahrmodi Komfort, Eco und Sport für das BEV-Fahrzeug dargestellt. Die Partikel-Massen-Grössenverteilungen der wiederholten Messungen sind bei allen 3 Modi - Komfort, Eco und Sport - jeweils sehr ähnlich. Der Hauptanteil der Partikelmasse fällt bei allen Modi in den Grössenbereich von 1.9 bis 7.9 µm an (Abb. 3.4.2 Komfort Modus, Abb. 3.4.3 Eco Modus, Abb. 3.4.4 Sport Modus). Die Maximalkonzentrationen sind für den Komfort Modus 1.78 mg/Nm^3, für den Eco Modus 1.89 mg/Nm^3 und für den Sport Modus 1.53 mg/Nm^3.

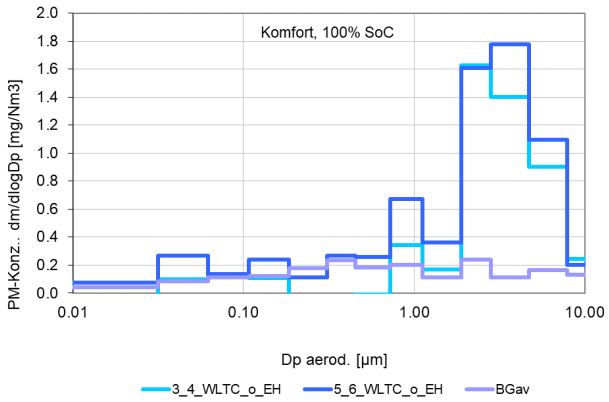


Abbildung 3.4.2: PM Grössenverteilungen als Konzentration (Background kompensiert) des WLTC-Zyklus ohne Extra High Teilzyklus, BEV. Komfort Modus und 100% SoC beim Start der Serie. Ein Folienset mit Back-Up Filter wurde jeweils mit 2 Zykluswiederholungen beladen.

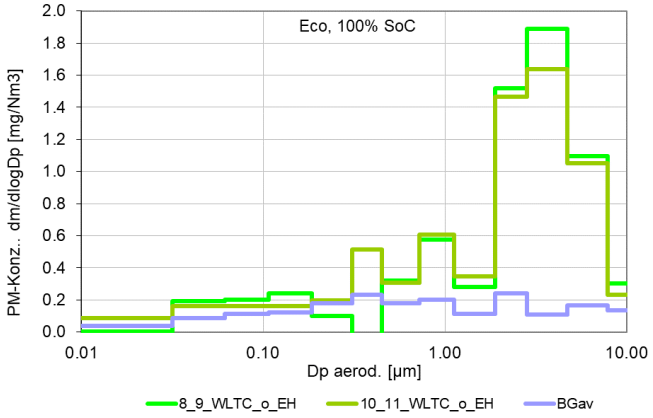


Abbildung 3.4.3: PM Grössenverteilungen als Konzentration (Background kompensiert) des WLTC-Zyklus ohne Extra High Teilzyklus, BEV. Eco Modus und 100% SoC beim Start der Serie. Ein Folienset mit Back-Up Filter wurde jeweils mit 2 Zykluswiederholungen beladen.

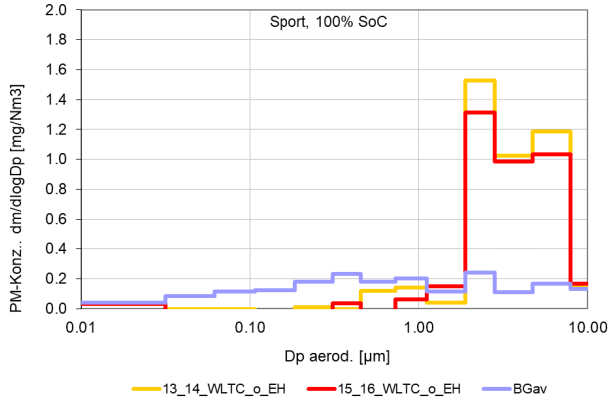


Abbildung 3.4.4: PM Grössenverteilungen als Konzentration (Background kompensiert) des WLTC-Zyklus ohne Extra High Teilzyklus, BEV. Sport Modus und 100% SoC beim Start der Serie. Ein Folienset mit Back-Up Filter wurde jeweils mit 2 Zykluswiederholungen beladen.

3.4.2 PM-Emissionen vollständiger WLTC-Zyklen (mit Extra High Teil)

In Abb. 3.4.5 sind Massen-Grössenverteilungen als Konzentrationen von 5 wiederholten WLTC des VM-Fahrzeuges dargestellt.

Für den WLTC ohne Extra High Teilzyklus (roter Linienzug) ist der Mittelwert von zwei Proben der 2. bis 5. Wiederholung und beim WLTC mit Extra High Teilzyklus (grüner Linienzug) eine Probe der 2. und 3. Wiederholung dargestellt. Die Partikelmassenkonzentrationsverteilungen haben bei beiden Zyklen einen Modus bei 2.82-1.89 und 7.88-4.71 µm. Die Maximalkonzentrationen der Verteilungen sind beim WLTC ohne Extra High Teilzyklus mit 1.64 mg/Nm^3 leicht höher als beim WLTC mit Extra High Teilzyklus mit 1.040 mg/Nm^3.

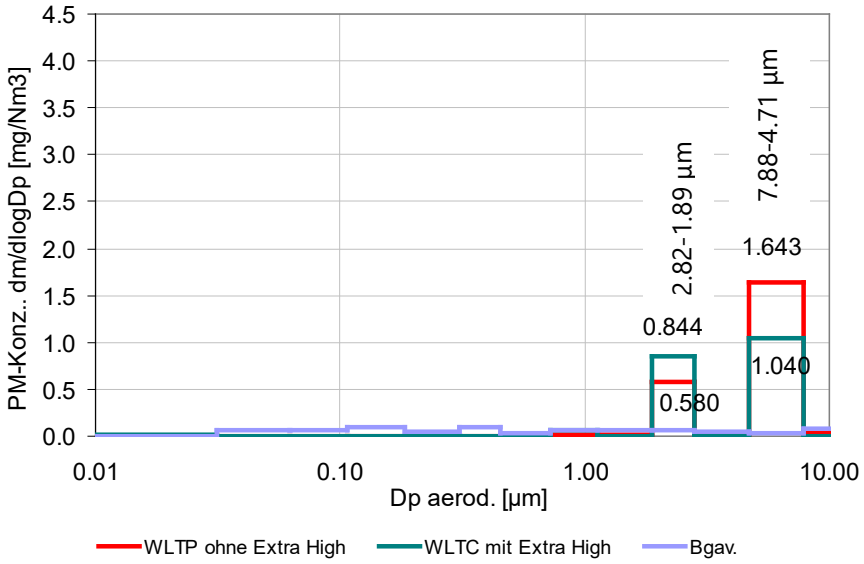


Abbildung 3.4.5: Massen-Grössenverteilungen als Konzentration von wiederholten WLTC-Zyklen (VM-Fahrzeug). WLTC ohne Extra High Teilzyklus (roter Linienzug) und WLTC mit Extra High Teilzyklus (grüner Linienzug).

In Abb. 3.4.6 sind Massen-Grössenverteilungen als Konzentrationen von 5 wiederholten WLTC des BEV-Fahrzeuges dargestellt. Von den fünf Wiederholungen sind die zweite und dritte sowie die vierte und fünfte Wiederholung als Verteilung zusammengefasst. Im linken Diagramm sind die Verteilungen für den WLTC ohne Extra High Teilzyklus und im rechten Diagramm die mit Extra High Teilzyklus dargestellt. Die Partikelmassenverteilungen haben bei beiden Zyklen einen Modus bei 1.9 bis 7.9 µm. Die Maximalkonzentration im Modus ist beim WLTC ohne Extra High Teilzyklus mit 1.626 und 1.776 mg/Nm^3 leicht höher als beim WLTC mit Extra High Teilzyklus mit 1.507 und 1.042 mg/Nm^3, wobei bei einer von zwei Proben eine Folie im Bereich des Modus beschädigt war und nicht in die Verteilung integriert werden konnte (rechtes Diagramm, hellblauer Pfeil).

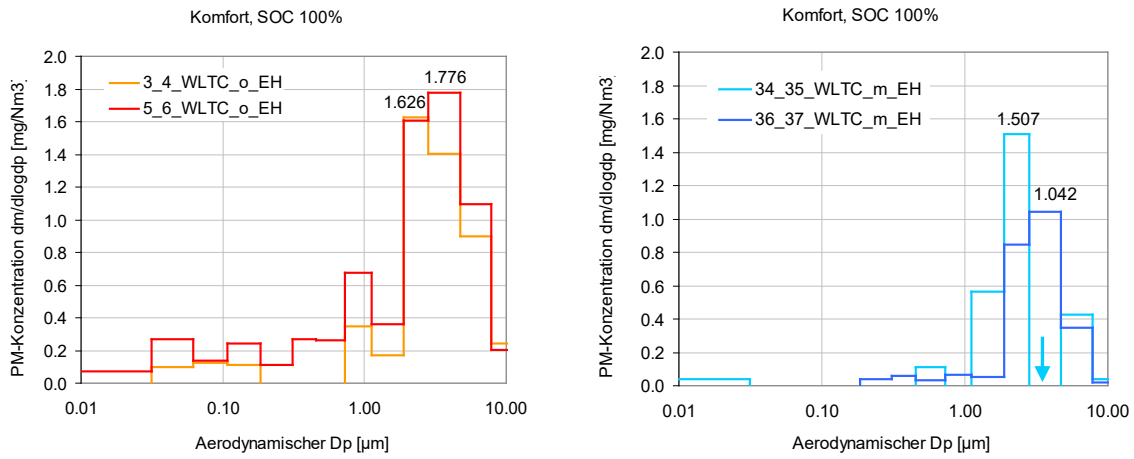


Abbildung 3.4.6: Massen-Grössenverteilungen als Konzentration von wiederholten WLTC-Zyklen (BEV-Fahrzeug, Komfort Modus, 100% SoC am Zyklusstart). Linke Seite ohne Extra High Teilzyklus und rechte Seite mit Extra High Teilzyklus. Im Folienset der ersten Probe mit Extra High Teilzyklus, rechtes Diagramm, hellblaue Verteilung, war eine Folie beschädigt und ist gekennzeichnet mit einem Pfeil.

Die Integration der Grössenklassen (also der Flächen unterhalb der entsprechenden Verteilungen in den Abb. 3.4.6) ergibt die gesamte Partikelmasse und führt zu den PM Bremsemissionsfaktoren. Diese Vorgehensweise in Kombination mit der beschränkten Anzahl Zykluswiederholung ergibt erhebliche Unsicherheit, insbesondere wenn nicht alle Folien auswertbar sind (Abb. 3.4.6. rechts). Trotzdem können aus den Ergebnissen der Abb. 3.4.6. Gesamtemissionen als Anhaltswerte bestimmt werden (siehe nächsten Abschnitt).

3.5 PM Bremsemissionsfaktoren

Die totale Partikelmasse von einem Zyklus, bestehend aus der Summe von den 13 Stufen des Impaktors (13 Differenzmessungen), war mit relativ grosser Messunsicherheit behaftet. Aus Erfahrung von bereits durchgeführten Bremspartikelmessungen an einem leicht hybridisierten Fahrzeug wurde deshalb jeweils ein Satz Impaktorfolien mit Back-Up Filter mit zwei hintereinander gefahren Zyklen belegt.

In Abbildung 3.5.1 sind die Brems PM-Emissionsfaktoren für den WLTC ohne und mit Extra High Teilzyklus verglichen. Die Bremspartikelemissionen sind in zwei Grössenklassen PM<12 µm (dunkle Balken) und PM<2.5 µm (helle Balken) dargestellt. Für den WLTC ohne Extra High Teilzyklus sind die PM<12µm im Mittel 2.69 mg/km (Min. 2.05, Max. 3.90 mg/km) und für PM<2.5 µm 0.6 mg/km (Min. 0.39, Max. 1.19 mg/km). Für den WLTC mit Extra High Teilzyklus sind die PM<12µm im Mittel 2.72 mg/km und für PM<2.5 µm 1.14 mg/km.

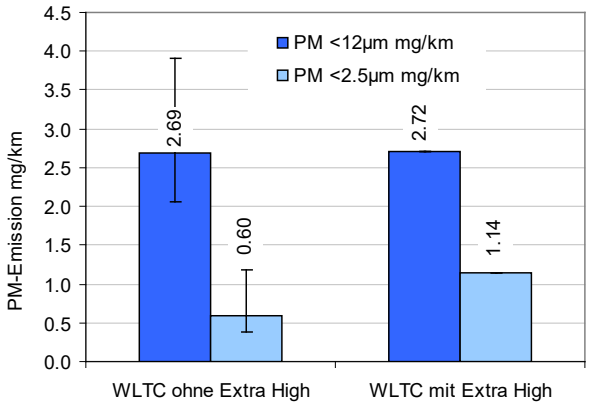


Abbildung 3.5.1: PM-Emissionsfaktoren für den WLTC ohne, (linke Diagrammseite), und mit Extra High Teilzyklus (rechte Diagrammseite), aufgeteilt in zwei Grössenklassen: links PM<12 µm (dunkle Balken) und rechts PM<2.5 µm (helle Balken). Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte. Beim WLTC mit Extra High Teilzyklus sind Werte einer Probe der 2. und 3. Wiederholung angegeben (VM-Fahrzeug).

In den Abb. 3.5.2 und 3.5.3 sind die Brems PM-Emissionsfaktoren für den WLTC ohne Extra High Teilzyklus des BEV-Fahrzeuges der drei Fahrmodi Komfort, Eco und Sport für zwei Grössenklassen PM<12 µm (dunkle Balken) und PM<2.5 µm (helle Balken) dargestellt.

In der Abb. 3.5.2 sind die Werte für 100% SoC und in Bild 3.5.3 für 68% SoC beim Start des ersten von 5 Zyklen verglichen.

In Abb. 3.5.2 (100% SoC) bestehen die Mittelwerte des Komfort und Sport Modus aus je 2 Foliensets mit Backup Filter von zwei Serien à 5 Wiederholungen. Die Mittelwerte des Eco Modus bestehen aus je 2 Foliensets mit Backup Filter von einer Serie à 5 Wiederholungen.

Für den Komfort Modus sind die PM<12µm im Mittel 5.87 mg/km, für den Eco Modus sind sie höher, 8.01 mg/km, und für den Sport Modus tiefer, 5.14 mg/km. Die PM<2.5µm sind für den Komfort Modus im Mittel 2.83 mg/km, für den Eco Modus bei 4.15 mg/km und für den Sport Modus bei 2.19 mg/km. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte.

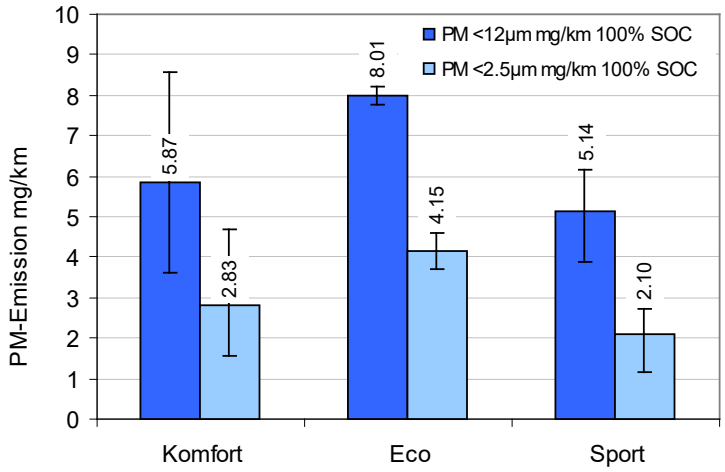


Abbildung 3.5.2: PM-Emissionsfaktoren über den WLTC-Zyklus (ohne Extra High Anteil) für die Fahrmodi Komfort, Eco und Sport für 100% SoC beim Start, aufgeteilt in zwei Grössenklassen: PM<12 µm (dunkle Balken) und PM<2.5 µm (helle Balken), (BEV-Fahrzeug).

In Abb. 3.5.3 sind die PM Bremsemissionen bei 68% SoC beim Zyklusstart aufgeführt. Die Mittelwerte aller Modi sind aus je 2 Foliensets mit Backup Filter von zwei Serien à 5 Wiederholungen errechnet. Für den Komfort Modus sind die PM<12µm im Mittel 3.7 mg/km, den Eco Modus 5.08 mg/km und für den Sport Modus 4.37 mg/km. Die PM<2.5µm sind für den Komfort Modus im Mittel 1.05 mg/km, den Eco Modus 0.61 mg/km und für den Sport Modus 1.26 mg/km. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte.

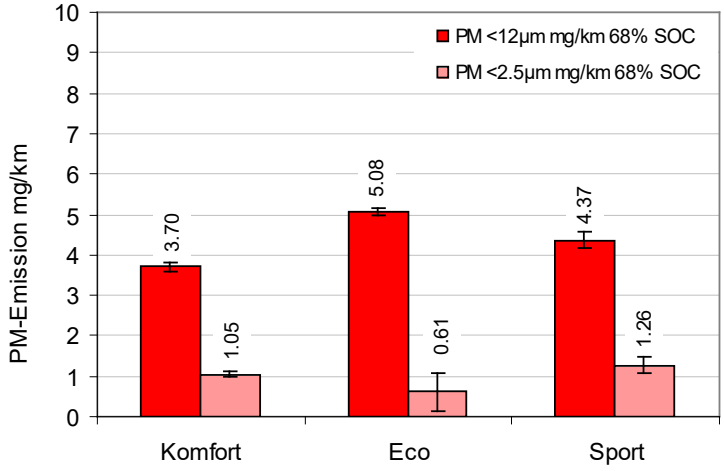


Abbildung 3.5.3: PM-Emissionsfaktoren über den WLTC-Zyklus (ohne Extra High Anteil) für die Fahrmodi Komfort, Eco und Sport für 68% SoC beim Zyklusstart, aufgeteilt in zwei Grössenklassen: PM<12 µm (dunkle Balken) und PM<2.5 µm (helle Balken), (BEV-Fahrzeug).

Obwohl die Werte, insbesondere bei 100% SoC, teilweise stärker streuen, liegen die Werte mit 68% SoC grundsätzlich tiefer. Interessanterweise sind die PM-Bremspartikelemissionen, sollte man den Zyklus bei 68% Batterieladezustand starten, 35% geringer für PM<12 µm und sogar 60% geringer für PM<2.5µm.
Weiter zeigen für beide SoC Startwerte beide Partikelgrössenklassen die gleiche Tendenz, mit den höchsten Werten im Eco und den tiefsten im Sport Fahrmodus.

Dies ist überraschend, sind doch die Verzögerungen durch den Zyklus vorgegeben. Somit kann das Fahrverhalten eher einen geringen Einfluss auf die Bremspartikelemissionen haben. Das Fahren im Sport Modus war eher (subjektiv beurteilt) schwieriger (aggressivere Einstellung des Gaspedals), was tendenziell auch zu leicht grösseren Korrekturen durch Bremsen führte. Demnach wären im Sport Modus höhere Bremspartikelemissionen erwartet worden. Es scheint, dass im Sportmodus das elektrische Bremsen durch Rekuperation effektiver ist.

Somit ergeben sich für die Messungen ohne Extra High Zyklusanteil (Abb. 3.4.6. links) Emissionsfaktoren von 5.9mg PM<12 µm und 2.83mg/km PM<2.5 µm. Wie schon im vorigen Abschnitt erläutert, waren die PM Messungen mit ganzen Zyklen (mit dem Extra High Teil) mit zusätzlichen Unsicherheiten konfrontiert. Die ermittelten PM Emissionsfaktoren (mit Extra High Zyklus) waren 2.92mg PM<12 µm und 1.54mg/km PM<2.5 µm. Dies ist eher überraschend, sollten doch diese Werte, wenn nicht höher, näher bei den Werten aus den WLTC-Zyklen ohne Extra High Anteil sein.

3.6 Zusammenfassender Vergleich der Bremspartikelemissionen der drei bisher gemessen Fahrzeuge am Rollenprüfstand

Mit der beschriebenen Technik (siehe Abschnitt 2) wurden je an einem Personenwagen mit leichtem Hybridantrieb (Empa Bericht im Auftrag des BAFU vom 18.2.2021), mit Verbrennungsmotor (VM-Fahrzeug im vorhandenen Bericht), und reinem Elektroantrieb (BEV-Fahrzeug im vorhandenen Bericht) Festpartikelemissionen der Bremsscheibe vorne rechts gemessen. Alle drei Fahrzeuge waren grössenmässig vergleichbar und stammen von einem Fahrzeugkonzern. Bestimmt wurden die Bremspartikelemissionen durch Messungen der Partikelanzahl, PN, pro km (und dabei wurden alle Partikel grösser als 23nm erfasst, wobei bei vereinzelten Messungen auch alle Partikel grösser als 10nm erfasst wurden) und durch Messung der Partikelmasse, PM, pro km (hier sowohl Partikel kleiner als 12.5 µm als auch solche kleiner als 2.5 µm).

In Abb. 3.6.1 sind die Partikelanzahlemissionen pro km für das rechte Vorderrad des ganzen WLTC mit dem Teilzyklus Extra High von den genannten Fahrzeugtypen verglichen. Die Werte sind Mittelwerte

aus mindestens zwei Zyklen. Verglichen mit dem Personenwagen mit Verbrennungsmotor sind die Emissionen des leicht hybridisierten Personenwagens praktisch identisch. Die des reinelektrischen Personenwagens hingegen sind um gut einen Faktor 3 höher. Erwähnenswert ist dabei, dass das Hybridfahrzeug im Jahre 2020 zuerst gemessen wurde, dann wurde das BEV-Fahrzeug in der ersten Hälfte des Jahres 2022 und als letztes das VM-Fahrzeug im Zeitraum Dezember 2022/Januar 2023 gemessen.

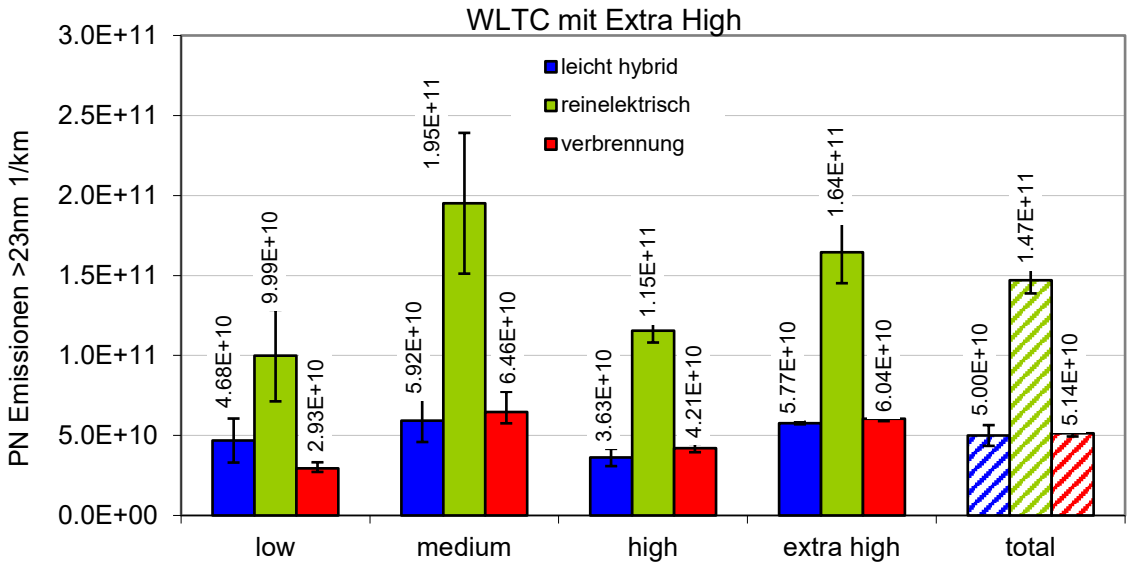


Abb. 3.6.1: Vergleich der Bremspartikelemissionen des gesamten WLTC-Zyklus vom leicht hybridisierten, dem reinelektrischen und dem mit Verbrennungsmotor angetriebenen Personenwagen. Die vier ersten Balkenklassen sind die Werte der Teilzyklen. Auf der rechten Seite, bezeichnet mit Total, sind die gemittelten Werte über den ganzen Zyklus. Alle Balken mit Wertangabe sind Mittelwerte von mindestens zwei Messungen. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte.

In Abb. 3.6.2 werden die Partikelmasseemissionen pro km für das rechte Vorderrad des ganzen WLTC-Zyklus von den drei Fahrzeugen verglichen. Das hybride Fahrzeug hat die tieferen PM Werte. Das BEV-Fahrzeug die höchsten, während die PM vom VM-Fahrzeug dazwischenliegen. Diese Tendenz ist deutlicher, wenn man die PM<2.5µm in die Betrachtung einbezieht.

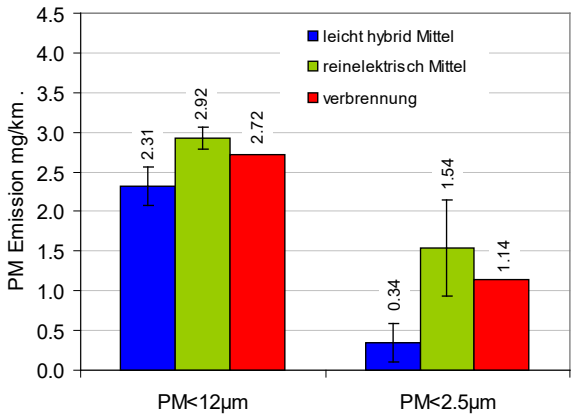


Abbildung 3.6.2: Vergleich der Bremspartikelemissionen des gesamten WLTC vom leicht hybridisierten, reinelektrischen und dem mit Verbrennungsmotor angetriebenen Personenwagen. Alle Balken mit Wertangabe sind Mittelwerte von mindestens zwei Messungen. Die Fehlerbalken zeigen die Minimal- und Maximalwerte.

Wie schon in den Anschnitten 3.3 und 3.5 erläutert, lassen sich aus diesen Messwerten, die aus der Bremse des rechten Vorderrades stammen, die entsprechenden Werte für das gesamte Fahrzeug abschätzen (auch basierend auf [9]). Tabelle 3 fasst die abgeschätzten Gesamtergebnisse für die gesamten Fahrzeuge zusammen. Die Bremspartikelemissionen sind bezüglich dem Partikelanzahlgrenzwert für Abgasemissionen bei den Personenwagen mit leichter Hybridisierung und Verbrennungsmotor um ca. einen Faktor 4 tiefer und für den rein elektrischen Personenwagen um ca. einen Faktor 0.75 tiefer.

	Hybrid	BEV	VM
PN [#/km] ganzer WLTC	$1.50\ 10^{11}$	$2.94\ 10^{11}$	$1.54\ 10^{11}$
PM [mg/km] <12µm WLTC ohne Extra High	11.13	11.80	8.07
PM [mg/km] <2.5µm WLTC ohne Extra High	4.74	5.66	1.80
PM [mg/km] <12µm ganzer WLTC	6.93	5.84	8.10
PM [mg/km] <2.5µm ganzer WLTC	1.02	3.08	3.42

Tabelle 3: Abgeschätzte Emissionsfaktoren für die gesamten Fahrzeuge

4. Literaturhinweise

[1] Holman, J. P., Heat Transfer, McGrawHill, New York, USA, 1972

[2] Friedlander, S. K., Smoke Dust and Haze, Wiley Interscience, New York,1977

[3] Pui, D., Experimental Study of Particle Deposition in Bends of Circular Cross Section, Aerosol Sci. Tech., 7, 301–315, 1987

[4] Fuchs, N., The Mechanics of Aerosols, Pergamon, Oxford, UK, 1964. 1111

[5] Thomas, J., Gravity Settling of Particles in a Horizontal Tube, JAPCA J. Air Waste Ma., 8, 32–34, 1958.

[6] WLTP Addenda No. 15 to the Global Registry (Global Technical Regulations)

[7] Gramstat, S., Impacts on Brake Particle Emission Testing, Atmosphere 2020

[8] Zum Hagen, F.F. , Environ. Sci. Technol. 2019, 53, 5143−5150

[9] Querol X, Amato F., Robusté F., Holman C., Harrison R.M. Chapter 11 – Non-technical Measures on Road Traffic to Abate Urban Air Pollution. In: Amato F, editor. Non-Exhaust Emissions. Academic Press, 2018, pp. 229-260.