Empa
Materials Science and Technology

Charakterisierung der Bremspartikel-emissionen von Elektrofahrzeugen

8600 Dübendorf, 25.2.2026

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, N. Schüller

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 Bremspartikel-emissionen von Elektrofahrzeugen

110016129 / 8T20/19.0106.PJ/0010
A200.0001 Globalkredit / Forschung
19.0106.PJ / B92FC56C1

25. Februar 2026

P. Dimopoulos Eggenschwiler, D. Schreiber, N. Schüller

Chemical Energy Carriers and Vehicle Systems Laboratory 504

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **5**

Résumé **9**

Sommario **13**

Abstract **16**

1 Einleitung **17**

2 Experimenteller Aufbau **19**

2.1 PN- und PM-Messungen **19**

2.2 Fahrzeugmodifikationen **20**

2.3 Batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) **22**

2.4. Testzyklus **23**

3 Ergebnisse und Diskussion **24**

3.1 Verteilung der Bremsenergie der gemessenen BEVs **24**

3.2 Bremspartikelanzahl (PN) **27**

3.3 Bremspartikelmasse (PM) **30**

3.4. Bremspartikelmorphologie **32**

3.5 PN- und PM-Emissionsfaktoren **32**

4 Schlussfolgerungen **37**

5 Literaturverzeichnis **40**

Anhang **44**

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Projektes wurden im Jahr 2023 die Bremspartikelemissionen eines batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV1) in möglichst realen Fahrzuständen quantifiziert. Diese waren ungewöhnlich hoch, auch im Vergleich zu einem ähnlichen, verbrennungsmotorisch angetriebenen (ICE1) und einem vergleichbaren hybriden Fahrzeug (Hybrid). Alle drei 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 Form von Anzahl (PN) und Masse (PM) während mehrerer Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle WLTC (Emissionsmess-)Zyklen vermessen.

Im vorliegenden Projekt sollten zwei weitere vergleichbare batterieelektrische Fahrzeuge (BEV2 und BEV3) mit gleicher Ausrüstung und auf dem identischen Prüfstand und Zyklus gemessen werden. Die Frage im Mittelpunkt ist, ob batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) wegen der (oftmals) höheren Masse mehr Bremspartikel emittieren und ob die Möglichkeit elektrisch zu bremsen (sog. rekuperatives Bremsen) dazu genutzt werden kann, den Einfluss der höheren Fahrzeugmasse auf die Bremspartikelemissionen zu kompensieren.

Alle gemessen Fahrzeuge hatten vier Scheibenbremsen (vorn und hinten) ausser BEV1. Das BEV1 hatte auch zwei Scheibenbremsen vorne, dafür waren an der Hinterachse parallel zum elektrischen Antrieb geschlossene Trommelbremsen verbaut. Mögliche Emissionen dieser Trommelbremsen wurden nicht gemessen oder berücksichtigt. Die Fahrzeuge hatten unterschiedliche Antriebsarten: BEV1 und BEV3 hatten Hinterradantrieb, BEV2 Allradantrieb und ICE1 sowie das Hybrid-Fahrzeug Vorderradantrieb. Dies ist insbesondere für die BEVs von Bedeutung, wenn man bedenkt, dass nur eine angetriebene Achse elektrisch bremsen (rekuperieren) kann.

Es sei hier klar zum Ausdruck gebracht, dass die vorgestellten Ergebnisse charakteristisch für die fünf Fahrzeuge mit den vorhandenen, getesteten, serienmässigen Bremsanlagen sind. Die Ergebnisse sind nicht ohne weiteres auf andere, baugleiche Fahrzeuge, oder auf andere Bremskomponenten gleicher Fahrzeuge übertragbar.

Die Messungen haben zu folgenden Erkenntnissen geführt:

Die drei gemessenen BEVs nutzen die Möglichkeit des elektrischen Bremsens (Rückgewinnung von Energie für die Batterie) in unterschiedlichem Umfang. Die Messungen zeigten, dass BEV3 während des WLTC-Zyklus etwa 68 % der Bremsenergie für elektrisches Bremsen nutzte. Die beiden anderen gemessenen BEVs nutzten das elektrische Bremsen in geringerem Umfang, etwa zu 50 %. Alle drei Fahrzeuge nutzten die elektrische Rekuperation während der ersten beiden WLTC-Teile (niedrigere Geschwindigkeiten) stärker und während der letzten beiden WLTC-Teile (höhere und höchste Geschwindigkeiten) zum Bremsen weniger stark. Der grösste Teil der mechanischen Bremsenergie fiel an der Vorderachse an (<25 % der gesamten Bremsenergie), während der geringste Teil an der Hinterachse anfiel (<5 %). Unterschiedliche Ladezustände (State of Charge, SoC) der Batterie zu Beginn des Zyklus sowie unterschiedliche Fahrmodi (vom Fahrzeugnutzer wählbar) hatten nur einen

geringen Einfluss auf die Verteilung der Bremsenergie. Dabei konnte die gute Reproduzierbarkeit der Bremskräfte (und der Messkette) über mehrere WLTC-Zyklen für alle bereits verwendeten Fahrzeuge nachgewiesen werden. Die Verteilung der Bremsenergien hat sich mit einem anderen Fahrmodus oder auch mit anderen Batterieladungszuständen am Zyklusanfang kaum verändert.

Die Emissionen von Bremspartikeln, durch die gemessene Partikelanzahl (PN), erfasst, zeigten bei allen gemessenen Fahrzeugen ein sehr ähnliches Muster. PN-Emissionen treten bei diskreten Ereignissen auf, die entweder mit

- Bremsvorgängen oder mit
- dem Erreichen von höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten (>60 km/h) zusammenhängen, bei denen aerodynamische Kräfte die Bremspartikel von den Reibungspartnern ablösen.

Die Höhe der Brems-PN-Emissionen hängt stark von der Vorgeschichte der Reibungspartner, früheren Bremsvorgängen und der Menge der auf ihnen abgelagerten Bremspartikel ab. Zuverlässige Messungen sind nach mindestens drei Wiederholungen unter identischen Bedingungen möglich. Nach der dritten Wiederholung ist die Menge der Brems-PN-Emissionen stabil und reproduzierbar. Während der ersten drei Wiederholungen nehmen die Brems-PN-Emissionen in der Regel ab. Dieser sogenannte „Einlauf-Effekt" im Fachjargon "bedding-effect" genannt, wurde sowohl bei den beiden BEVs als auch bei dem Hybrid- und dem ICE1-Fahrzeug gemessen und erfasst. BEV1 wies aussergewöhnlich hohe Brems-PN-Emissionen auf und zeigte sogar einen umgekehrten Einlauf-Effekt, da die PN-Emissionen mit jedem aufeinanderfolgenden WLTC-Zyklus zunahmen. Die PN-Emissionen dieses Fahrzeugs erreichten ebenfalls nach der dritten Wiederholung konstante Werte.

BEV3, das mehr elektrisch bremst, hatte auch die niedrigsten Brems-PN-Emissionen, weniger als die Hälfte im Vergleich zu BEV2. Die Brems-PM-Emissionen der beiden Fahrzeuge (BEV2 und BEV3) waren dafür ähnlich. Dies zeigt, dass BEV2 mehr kleinere Partikel emittierte als BEV3. BEV3 hatte mehr als achtmal niedrigere PN-Emissionen im Vergleich zu den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Hybridantrieb. BEV1 wies die höchsten PN-Emissionen auf, die etwa 23-mal höher waren als die von BEV3. Der Unterschied bei PM war kleiner (als bei PN): BEV1 emittierte viermal mehr PM als BEV3 (was ebenfalls zeigt, dass BEV1 mehr kleine Partikel emittierte). Die Ergebnisse von BEV3 zeigen deutlich, dass BEVs mit einer geeigneten Bremsauslegung in der Lage sind, die Emissionen von Bremsabriebpartikeln stark zu reduzieren.

Die Morphologie der Bremspartikel, im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht, unterschied sich zwischen den Fahrzeugen erheblich. Die grösseren Bremspartikel von BEV1 waren eher einheitlich, dafür wiesen die kleineren weniger regelmässige und inhomogene Formen auf. Im Gegensatz dazu waren die grösseren Bremspartikel von BEV3 sehr unregelmässig, dafür waren die kleineren eher rund und homogen. Bei allen Fahrzeugen waren Bremspartikel im Bereich von 100 bis 400 nm vorhanden.

Die an der rechten, vorderen Scheibenbremse gemessenen, mittleren PN-Emissionen über den WLTC (Emissions-) Zyklus waren (alle Fahrzeuge im normalen Modus und mit 100 % SoC der Traktionsbatterie am Zyklusstart):

- 5.14E+10 #/km für das ICE1-Fahrzeug
- 1.5E+11 #/km für das BEV1-Fahrzeug
- 1.6E+10 #/km für das BEV2-Fahrzeug
- 6.4E+9 #/km für das BEV3-Fahrzeug
- 5.0E+10 #/km für das Hybrid-Fahrzeug

Um die entsprechenden Emissionsfaktoren für das gesamte Fahrzeug abzuschätzen, wurden diese Werte für das BEV1-Fahrzeug verdoppelt (wegen der zweiten, linken Scheibenbremse vorne und den Trommelbremsen hinten, die in dieser Arbeit als (bremspartikel-)emissionsfrei angenommen werden). Für alle anderen Fahrzeuge wurden diese Werte wegen der zweiten, vorderen Scheibenbremse verdoppelt und anschliessend zur Berücksichtigung der hinteren Scheibenbremsemissionen entsprechend der mittleren Bremsleistungsverhältnissen skaliert. Diese Abschätzung der gesamten Bremspartikelemissionen ergab:

- 1.54E+11 #/km für das ICE1-Fahrzeug
- 3.00E+11 #/km für das BEV1-Fahrzeug
- 3.37E+10 #/km für das BEV2-Fahrzeug
- 1.31E+9 #/km für das BEV3-Fahrzeug
- 1.50E+11 #/km für das Hybrid-Fahrzeug

Diese Ergebnisse zeigen:

- Die Gesamtbrems-PN-Emissionsfaktoren der beiden BEVs mit niedrigen PN-Emissionen liegen in der Grössenordnung von 2E+10 [#/km] und sind damit niedriger oder ähnlich wie die Abgas-PN Emissionsfaktoren herkömmlicher Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die mit den neuesten Abgasnachbehandlungstechnologien ausgestattet sind.
- Die Gesamtbrems-PN der beiden BEVs mit niedrigen PN-Emissionen sind etwa fünfmal niedriger als die eines herkömmlichen Verbrennungsmotor- und eines Hybridfahrzeugs vergleichbarer Grösse.
- Das dritte gemessene BEV wies dagegen hohe Brems-PN-Emissionen auf, die um eine Grössenordnung höher waren als die der beiden anderen gemessenen BEVs und doppelt so hoch wie die des Verbrennungsmotor- und des Hybrid-Fahrzeugs.
- Die Gesamtbrems-PM-Emissionsfaktoren der beiden emissionsarmen BEVs lagen in der Grössenordnung von 2.0 mg/km für Partikel kleiner als 12 µm und 1.4 mg/km für Partikel kleiner als 2.5 µm.

- Die Gesamtbrems-PM der beiden emissionsarmen BEVs sind etwa zweimal niedriger als die des Fahrzeuges mit herkömmlichem Verbrennungsmotor- und Hybridantrieb.

Die Brems-PN-Emissionen der gemessenen Fahrzeuge variierten nicht wesentlich, wenn der Zyklus mit unterschiedlichen Ladezuständen (SoC) der Fahrzeugbatterie gestartet wurde. Allerdings wurden bei Messungen mit voll aufgeladener Batterie am Zyklusstart stets etwas höhere Bremspartikelemissionen gemessen. Der niedrige Rekuperationsgrad im „Komfortmodus" für den Fahrzeugbetrieb (vom Fahrer wählbar) führte bei fast allen Messungen zu etwas höheren Brems-PN-Emissionen. Beide Ergebnisse sind angesichts einer leicht reduzierten elektrischen Bremsleistung plausibel.

Fazit: Das BEV3 demonstriert beeindruckend das Potential, das in batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) steckt, mit sehr tiefen Bremspartikelemissionen zu fahren. Dies ist sicher auf eine gelungene Auslegung der Bremsen und des Bremsprozesses, längeres Zurückgreifen aufs elektrische Bremsen und höchstwahrscheinlich auf gute Abstimmung der Reibpartner (Bremsbeläge und -scheiben) zurückzuführen.

Résumé

Dans le cadre d'un projet mené en 2023, les émissions de particules de freinage d'un véhicule électrique à batterie (BEV1) ont été quantifiées dans des conditions de conduite aussi réelles que possible. Celles-ci étaient exceptionnellement élevées, même par rapport à un véhicule similaire à moteur à combustion interne (ICE1) et à un véhicule hybride comparable (hybride). Les trois voitures particulières ont été équipées et mesurées de manière similaire sur le banc d'essai à rouleaux. Pour cela, le frein à disque avant droit a été entièrement encapsulé et ventilé de manière contrôlée. Dans ce flux d'air, le nombre (PN) et la masse (PM) des particules de freinage ont été mesurés pendant plusieurs cycles de mesure des émissions du Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle WLTC (cycle d'essai mondial harmonisé pour les véhicules légers).

Dans le cadre du présent projet, deux autres véhicules électriques à batterie comparables (BEV2 et BEV3) devaient être mesurés avec le même équipement et sur le même banc d'essai et le même cycle. La question centrale était de savoir si les véhicules électriques à batterie (BEV) émettent plus de particules de freinage en raison de leur masse (souvent) plus élevée et si la possibilité de freiner électriquement (ce qu'on appelle le freinage par récupération) peut être utilisée pour compenser l'influence de la masse plus élevée du véhicule sur les émissions de particules de freinage.

Tous les véhicules mesurés étaient équipés de quatre freins à disque (à l'avant et à l'arrière), à l'exception du BEV1.

Le BEV1 était également équipé de deux freins à disque à l'avant, tandis que l'essieu arrière était équipé de freins à tambour fermés parallèles à la propulsion électrique. Les émissions potentielles de ces freins à tambour n'ont pas été mesurées ni prises en compte.

Les véhicules avaient différents types de transmission : les BEV1 et BEV3 avaient une propulsion arrière, le BEV2 une transmission intégrale et l'ICE1 ainsi que le véhicule hybride une traction avant. Cela est particulièrement important pour les BEV, si l'on considère que seul un essieu moteur peut freiner électriquement (récupération).

Il convient de préciser ici que les résultats présentés sont caractéristiques des cinq véhicules équipés des systèmes de freinage de série testés. Les résultats ne sont pas directement transposables à d'autres véhicules de construction identique ou à d'autres composants de freinage des mêmes véhicules.

Les mesures ont permis de tirer les conclusions suivantes :

Les trois BEV mesurés utilisent la possibilité du freinage électrique (récupération d'énergie pour la batterie) à des degrés divers. Les mesures montrent que le BEV3 a utilisé environ 68 % de l'énergie de freinage pour le freinage électrique pendant le cycle WLTC. Les deux autres BEV mesurés ont utilisé le freinage électrique dans une moindre mesure, à environ 50 %.

Les trois véhicules ont davantage utilisé la récupération électrique pour freiner pendant les deux premières parties du WLTC (vitesses plus faibles) et moins pendant les deux dernières parties du WLTC (vitesses plus élevées et maximales). La majeure partie de l'énergie de freinage mécanique a été générée par l'essieu avant (<25 % de l'énergie de freinage totale), tandis que la plus petite partie a été générée par l'essieu arrière

(<5 %). Les différents états de charge (State of Charge, SoC) de la batterie au début du cycle ainsi que les différents modes de conduite (sélectionnables par le conducteur du véhicule) n'ont exercé qu'une influence mineure sur la répartition de l'énergie de freinage. La bonne reproductibilité des forces de freinage (et de la chaîne de mesure) sur plusieurs cycles WLTC a pu être démontrée pour tous les véhicules. La répartition des énergies de freinage n'a guère changé avec un autre mode de conduite ou avec d'autres états de charge de la batterie au début du cycle.

Les émissions de particules de freinage, mesurées par le nombre de particules (PN), ont montré un schéma très similaire pour tous les véhicules mesurés. Les émissions de PN se produisent lors d'événements discrets liés soit

- aux processus de freinage, soit
- à l'atteinte de vitesses plus élevées du véhicule (>60 km/h), lorsque les forces aérodynamiques détachent les particules de freinage des partenaires de friction.

Le niveau des émissions de particules de freinage dépend fortement de l'historique des éléments de friction, des freinages précédents et de la quantité de particules de freinage qui se sont déposées sur ceux-ci. Des mesures fiables sont possibles après au moins trois répétitions dans des conditions identiques. Après la troisième répétition, la quantité d'émissions de particules de freinage devient stable et reproductible. Au cours des trois premières répétitions, les émissions de particules de freinage diminuent généralement. Cet « effet de rodage », appelé « bedding effect » dans le jargon technique, a été mesuré et enregistré à la fois sur les deux BEV, le véhicule hybride et le véhicule à moteur à combustion interne. Le BEV1 présentait des émissions du nombre de particules exceptionnellement élevées au freinage et affichait même un effet inverse, les émissions du nombre de particules augmentant à chaque cycle WLTC successif.

Les émissions de PN de ce véhicule ont également atteint des valeurs constantes après la troisième répétition.

Le BEV3, qui utilise davantage le freinage électrique, présentait également les émissions de PN au freinage les plus faibles, inférieures de plus de moitié à celles du BEV2. Les émissions de PM au freinage des deux véhicules (BEV2 et BEV3) étaient quant à elles similaires. Cela montre que le BEV2 émettait plus de particules fines que le BEV3. Le BEV3 avait des émissions de nombre de particules (PN) plus de huit fois inférieures à celles des véhicules à moteur à combustion et hybrides. Le BEV1 présentait les émissions de nombre de particules (PN) les plus élevées, environ 23 fois supérieures à celles du BEV3.

La différence au niveau des PM n'était pas si importante : le BEV1 émettait quatre fois plus de PM que le BEV3 (ce qui montre également que le BEV1 émettait davantage de petites particules). Les résultats du BEV3 montrent clairement que les BEV équipés d'un système de freinage adapté sont capables de réduire considérablement les émissions de particules de poussière de freinage.

La morphologie des particules de freinage, examinée au microscope électronique à balayage, différait considérablement d'un véhicule à l'autre. Les particules de freinage plus grosses du BEV1 étaient plutôt uniformes, tandis que les plus petites présentaient des formes moins régulières et hétérogènes. En revanche, les particules de freinage plus grosses du BEV3 étaient très irrégulières, tandis que les plus petites étaient plutôt

rondes et homogènes. Tous les véhicules présentaient des particules de freinage comprises entre 100 et 400 nm.

Les émissions moyennes de particules mesurées sur le frein à disque avant droit pendant le cycle WLTC (émissions) étaient les suivantes (tous les véhicules en mode normal et avec un SoC de 100 % de la batterie de traction au début du cycle) :

- 5.14E+10 #/km pour le véhicule ICE1
- 1.5E+11 #/km pour le véhicule BEV1
- 1.6E+10 #/km pour le véhicule BEV2
- 6.4E+9 #/km pour le véhicule BEV3
- 5.0E+10 #/km pour le véhicule hybride

Afin d'estimer les facteurs d'émission correspondants pour l'ensemble du véhicule, ces valeurs ont été doublées pour le véhicule BEV1 (en raison du deuxième frein à disque avant gauche et des freins à tambour arrière, qui sont considérés comme exempts d'émissions de particules de freinage dans ce travail). Pour tous les autres véhicules, ces valeurs ont été doublées en raison du deuxième frein à disque avant, puis ajustées en fonction des conditions moyennes de freinage afin de tenir compte des émissions des freins à disque arrière.

Cette estimation des émissions totales de particules de freinage a donné les résultats suivants :

- 1.54E+11 #/km pour le véhicule ICE1
- 3.00E+11 #/km pour le véhicule BEV1
- 3.37E+10 #/km pour le véhicule BEV2
- 1.31E+10 #/km pour le véhicule BEV3
- 1.50E+11 #/km pour le véhicule hybride

Les résultats montrent que :

- Les facteurs d'émission PN au freinage total des deux BEV à faibles émissions PN sont de l'ordre de 2E+10 [#/km] et sont donc inférieurs ou similaires aux émissions PN dans les gaz d'échappement des véhicules conventionnels équipés d'un moteur à combustion interne et dotés des dernières technologies de post-traitement des gaz d'échappement.
- Les émissions totales du nombre de particules au freinage des deux BEV à faibles émissions PN sont environ cinq fois inférieures à celles d'un véhicule à moteur à combustion interne et d'un véhicule hybride de taille comparable.
- En revanche, le troisième BEV mesuré présentait des émissions de particules de freinage élevées, supérieures d'un ordre de grandeur à celles des deux autres BEV mesurés et deux fois plus élevées que celles du véhicule à moteur à combustion interne et du véhicule hybride.
- Les facteurs d'émission totale de PM au freinage des deux BEV à faibles émissions étaient de l'ordre de 2.0 mg/km pour les particules inférieures à 12 µm et de 1.4 mg/km pour les particules inférieures à 2.5 µm.

- Les émissions totales de particules lors du freinage des deux BEV à faibles émissions sont environ deux fois inférieures à celles d'un véhicule équipé d'une propulsion à moteur à combustion interne ou hybride.

Les émissions de particules lors du freinage des véhicules mesurés ne variaient pas de manière significative lorsque le cycle était lancé avec différents états de charge (SoC) de la batterie du véhicule. Toutefois, les mesures effectuées avec une batterie complètement chargée au début du cycle ont toujours montré des émissions de particules de freinage légèrement plus élevées.

Le faible taux de récupération en « mode confort » pour le fonctionnement du véhicule (sélectionnable par le conducteur) a entraîné, dans presque toutes les mesures, des émissions de particules de freinage légèrement plus élevées. Ces deux résultats sont plausibles compte tenu d'une puissance de freinage électrique légèrement réduite.

Conclusion : le BEV3 démontre de manière impressionnante le potentiel des véhicules électriques à batterie (BEV) pour rouler avec de très faibles émissions de particules de freinage. Cela est certainement dû à une conception réussie des freins et du processus de freinage, à un recours prolongé au freinage électrique et très probablement à une combinaison réussie des éléments de friction (plaquettes et disques de frein).

Sommario

Nell'ambito di un progetto, nel 2023 sono state quantificate le emissioni di particolato dei freni di un veicolo elettrico a batteria (BEV1) in condizioni di guida il più possibile realistiche. Queste erano insolitamente elevate, anche rispetto a un veicolo simile alimentato da un motore a combustione interna (ICE1) e a un veicolo ibrido comparabile (ibrido). Tutte e tre le autovetture sono state equipaggiate e misurate in modo simile per il banco prova a rulli. A tal fine, il freno a disco anteriore destro è stato completamente incapsulato e ventilato in modo controllato. In questo flusso d'aria sono stati misurati il numero (PN) e la massa (PM) delle particelle dei freni durante diversi cicli WLTC (misurazione delle emissioni) Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle.

Nel presente progetto, dovevano essere misurati altri due veicoli elettrici a batteria comparabili (BEV2 e BEV3) con la stessa attrezzatura e sullo stesso banco di prova e ciclo. La questione centrale è se i veicoli elettrici a batteria (BEV) emettano più particelle di frenata a causa della loro massa (spesso) maggiore e se la possibilità di frenare elettricamente (il cosiddetto frenaggio rigenerativo) possa essere utilizzata per compensare l'influenza della maggiore massa del veicolo sulle emissioni di particelle di frenata.

Tutti i veicoli misurati erano dotati di quattro freni a disco (anteriori e posteriori), ad eccezione del BEV1. Il BEV1 aveva anch'esso due freni a disco anteriori, ma sull'asse posteriore, parallelamente alla trazione elettrica, erano presenti freni a tamburo chiusi. Le possibili emissioni di questi freni a tamburo non sono state misurate né prese in considerazione. I veicoli avevano diversi tipi di propulsione: il BEV1 e il BEV3 avevano la propulsione posteriore, il BEV2 la trazione integrale e l'ICE1 e il veicolo ibrido la trazione anteriore. Ciò è particolarmente importante per i BEV, se si considera che solo un asse motore può frenare elettricamente (recuperare energia).

Va chiarito che i risultati presentati sono caratteristici dei cinque veicoli con gli impianti frenanti di serie esistenti e testati. I risultati non sono facilmente trasferibili ad altri veicoli identici o ad altri componenti frenanti degli stessi veicoli.

Le misurazioni hanno fornito le seguenti informazioni:

I tre BEV misurati utilizzano la possibilità della frenata elettrica (recupero di energia per la batteria) in misura diversa. Le misurazioni mostrano che BEV3 ha utilizzato circa il 68% dell'energia di frenata per la frenata elettrica durante il ciclo WLTC. Gli altri due BEV misurati hanno utilizzato la frenata elettrica in misura minore, circa il 50%. Tutti e tre i veicoli hanno utilizzato maggiormente il recupero elettrico durante le prime due parti del WLTC (velocità inferiori) e meno durante le ultime due parti del WLTC (velocità superiori e massime) per la frenata. La maggior parte dell'energia di frenata meccanica è stata generata sull'asse anteriore (<25% dell'energia di frenata totale), mentre la parte minore è stata generata sull'asse posteriore (<5%). I diversi stati di carica (SoC) della batteria all'inizio del ciclo e le diverse modalità di guida (selezionabili dall'utente del veicolo) hanno avuto solo un'influenza minima sulla distribuzione dell'energia di frenata. È stata dimostrata la buona riproducibilità delle forze frenanti (e della catena di misura) su numerosi cicli WLTC per tutti i veicoli

già utilizzati. La distribuzione delle energie di frenata è rimasta pressoché invariata con una modalità di guida diversa o con altri stati di carica della batteria all'inizio del ciclo.

Le emissioni di particelle dei freni, rilevate dal numero di particelle misurate (PN), hanno mostrato un andamento molto simile in tutti i veicoli misurati. Le emissioni PN si verificano in occasione di eventi discreti correlati

- alle operazioni di frenata o
- al raggiungimento di velocità elevate del veicolo (>60 km/h), durante i quali le forze aerodinamiche staccano le particelle dei freni dai partner di attrito.

Il livello delle emissioni di PN dei freni dipende fortemente dalla storia dei partner di attrito, dalle precedenti frenate e dalla quantità di particelle dei freni depositate su di essi. Misurazioni affidabili sono possibili dopo almeno tre ripetizioni in condizioni identiche. Dopo la terza ripetizione, la quantità delle emissioni PN dei freni è stabile e riproducibile. Durante le prime tre ripetizioni, le emissioni PN dei freni tendono a diminuire. Questo cosiddetto «effetto di rodaggio», chiamato in gergo tecnico «bedding effect», è stato misurato e registrato sia nei due BEV che nel veicolo ibrido e in quello con motore a combustione interna. Il BEV1 ha mostrato emissioni PN in frenata eccezionalmente elevate e ha persino mostrato un effetto di rodaggio inverso, poiché le emissioni PN sono aumentate con ogni ciclo WLTC successivo. Anche le emissioni PN di questo veicolo hanno raggiunto valori costanti dopo la terza ripetizione.

Il BEV3, che utilizza maggiormente la frenata elettrica, ha registrato anche le emissioni PN di frenata più basse, meno della metà rispetto al BEV2. Le emissioni PM di frenata dei due veicoli (BEV2 e BEV3) erano invece simili. Ciò dimostra che il BEV2 emetteva più particelle fini rispetto al BEV3. Il BEV3 aveva emissioni di PN più di otto volte inferiori rispetto ai veicoli con motore a combustione interna e propulsione ibrida. Il BEV1 presentava le emissioni di PN più elevate, circa 23 volte superiori a quelle del BEV3. La differenza per quanto riguarda il PM non era così marcata: il BEV1 emetteva quattro volte più PM rispetto al BEV3 (il che dimostra anche che il BEV1 emetteva più particelle fini). I risultati del BEV3 dimostrano chiaramente che i BEV con un sistema frenante adeguato sono in grado di ridurre notevolmente le emissioni di particelle di polvere dei freni.

La morfologia delle particelle dei freni, esaminata al microscopio elettronico a scansione, differiva notevolmente tra i veicoli. Le particelle frenanti più grandi del BEV1 erano piuttosto uniformi, mentre quelle più piccole presentavano forme meno regolari e disomogenee. Al contrario, le particelle frenanti più grandi del BEV3 erano molto irregolari, mentre quelle più piccole erano piuttosto rotonde e omogenee. In tutti i veicoli erano presenti particelle frenanti comprese tra 100 e 400 nm.

Le emissioni medie di PN misurate sul freno a disco anteriore destro durante il ciclo WLTC (emissioni) erano (tutti i veicoli in modalità normale e con il 100% di SoC della batteria di trazione all'inizio del ciclo):

- 5.14E+10 #/km per il veicolo ICE1
- 1.5E+11 #/km per il veicolo BEV1
- 1.6E+10 #/km per il veicolo BEV2
- 6.4E+9 #/km per il veicolo BEV3

- 5.0E+10 #/km per il veicolo ibrido

Per stimare i fattori di emissione corrispondenti per l'intero veicolo, questi valori sono stati raddoppiati per il veicolo BEV1 (a causa del secondo freno a disco anteriore sinistro e dei freni a tamburo posteriori, che in questo lavoro sono considerati privi di emissioni di particolato dei freni). Per tutti gli altri veicoli, questi valori sono stati raddoppiati a causa del secondo freno a disco anteriore e successivamente scalati in base alle emissioni dei freni a disco posteriori, tenendo conto delle condizioni medie di frenata. Questa stima delle emissioni totali di particelle dei freni ha dato come risultato:

- 1.54E+11 #/km per il veicolo ICE1
- 3.0E+11 #/km per il veicolo BEV1
- 3.37E+10 #/km per il veicolo BEV2
- 1.31E+10 #/km per il veicolo BEV3
- 1.5E+11 #/km per il veicolo ibrido

I risultati mostrano che:

- I fattori di emissione PN complessivi dei freni dei due BEV a basse emissioni PN sono dell'ordine di 2E+10 [#/km] e sono quindi inferiori o simili alle emissioni PN dei gas di scarico dei veicoli convenzionali con motore a combustione interna dotati delle più recenti tecnologie di post-trattamento.
- Il PN totale in frenata dei due BEV a basse emissioni di PN è circa cinque volte inferiore a quello di un veicolo convenzionale con motore a combustione interna e di un veicolo ibrido di dimensioni comparabili.
- Il terzo BEV misurato presentava invece elevate emissioni di PN in frenata, superiori di un ordine di grandezza rispetto agli altri due BEV misurati e doppie rispetto a quelle del motore a combustione interna e del veicolo ibrido.
- I fattori di emissione PM complessivi in frenata dei due BEV a basse emissioni sono dell'ordine di 2.0 mg/km per le particelle inferiori a 12 µm e di 1.4 mg/km per le particelle inferiori a 2.5 µm.
- Le emissioni totali di PM dei freni dei due BEV a basse emissioni sono circa la metà di quelle del veicolo con motore a combustione interna convenzionale e propulsione ibrida.

Le emissioni PN dei freni dei veicoli misurati non hanno subito variazioni significative quando il ciclo è stato avviato con diversi stati di carica (SoC) della batteria del veicolo. Tuttavia, nelle misurazioni effettuate con la batteria completamente carica all'inizio del ciclo sono state rilevate emissioni di particolato dei freni leggermente superiori. Il basso grado di recupero in "modalità comfort" per il funzionamento del veicolo (selezionabile dal conducente) ha portato a emissioni PN dei freni leggermente più elevate in quasi tutte le misurazioni. Entrambi i risultati sono plausibili alla luce di una potenza di frenata elettrica leggermente ridotta.

Conclusione: il BEV3 dimostra in modo impressionante il potenziale dei veicoli elettrici a batteria (BEV) di viaggiare con emissioni di particelle dei freni molto basse. Ciò è sicuramente dovuto alla progettazione ottimale dei freni e del processo di frenata, al ricorso prolungato alla frenata elettrica e, molto probabilmente, alla combinazione ottimale dei componenti di attrito (pastiglie e dischi dei freni).

Abstract

Derzeit gelten Bremspartikelemissionen aus dem Verkehr als eine der dominierenden Quellen für Feinstaub in der Atmosphäre. Ihr Beitrag zur Luftverschmutzung, insbesondere in städtischen Gebieten, nimmt zu, da die Abgasfeinstaubemissionen nach der flächendeckenden Einführung von Abgasreinigungstechnologien in den letzten 20 Jahren stark zurückgegangen sind. Daher stehen Bremspartikelemissionen im Fokus von Forschung, Industrie und Regulierung. In Bezug auf Mess- und Quantifizierungsfragen werden derzeit mehrere Aspekte diskutiert. Eine weitere wichtige Frage betrifft den Beitrag von Fahrzeugen mit neuen Antriebstechnologien zu den Bremspartikeln. Batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) gelten als schwerer als ihre Pendants mit Verbrennungsmotor. Allein aufgrund dieser Tatsache ist mit höheren Bremspartikelemissionen zu rechnen. Sie sind jedoch weniger auf mechanisches Bremsen angewiesen, da sie elektrische (rekuperative) Bremsen verwenden können, die elektrische Energie für die Batterie erzeugen. Eine offene Frage ist, welcher der beiden Faktoren die Bremspartikelemissionen stärker beeinflusst.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zu dieser Frage, indem sie die Emissionen von Bremspartikeln nach Anzahl (PN) und Masse (PM) von drei leichten BEVs unter realistischen Fahrbedingungen auf einem Rollenprüfstand ausführlich misst. Dazu wurde deren vordere rechte Scheibenbremse in ein speziell entwickeltes Gehäuse mit kontrollierter, hoher Spülungsluftversorgung eingekapselt.

Für die Messungen wurde der (Emissions-) WLTC-Zyklus gewählt. Der verwendete zweiachsige Rollenprüfstand ermöglichte auch die Messung der Bremsenergien und deren Verteilung zwischen elektrischer und mechanischer Bremsung an beiden Fahrzeugachsen. Die Bremspartikelemissionen der BEVs wurden mit denen eines ähnlichen Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und eines mit Hybridantrieb verglichen.

Das BEV, das stärker elektrisches Bremsen nutzte (etwa 68 % der Bremsenergie wurde durch elektrisches Bremsen abgedeckt), wies mit 6.4E+9 #/km pro Vorderradbremse die niedrigsten Brems-PN-Emissionen über den (Emissions-)WLTC auf. Diese lagen um mehr als die Hälfte unter denen des zweiten BEV (bei dem nur 52 % der Bremsenergie elektrisch waren). Die PM-Emissionen der beiden Fahrzeuge waren mit 0.93 mg/km für PM<12µm und 0.65 mg/km für PM<2.5µm für jeweils eine Vorderradbremse ähnlich. Das BEV mit den niedrigsten Emissionen hatte mehr als achtmal niedrigere PN-Emissionen als die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und Hybridantrieb. Das dritte BEV wies jedoch aussergewöhnlich hohe PN-Emissionen auf, die etwa 23-mal höher als die des BEV mit den niedrigsten Emissionen waren. Der Unterschied bei den PM war nicht so ausgeprägt, etwa viermal höher.

1 Einleitung

Aerosolpartikel aus Verkehrsemissionen gelten als eine der Hauptursachen für die Luftverschmutzung in städtischen Gebieten [1–4]. Partikelemissionen aus dem Strassenverkehr bestehen aus Abgaspartikeln, die durch unvollständige Verbrennung von Kraftstoffen oder durch Verdunstung von Schmierölkomponenten entstehen, und Nicht-Abgaspartikeln, die entweder von den Fahrzeugen erzeugt werden oder bereits in der Umwelt vorhanden sind und von den Fahrzeugen aufgewirbelt und wieder in die Luft gebracht werden [5]. Während die Abgasemissionen aufgrund verbesserter Abgasnachbehandlung und Elektrifizierung des Verkehrssektors weiter sinken, rücken Nicht-Abgasemissionen, die von Bremsscheiben und -belägen sowie Reifen verursacht werden, in den Fokus.

Fahrzeugbremsen tragen erheblich zu den verkehrsbedingten Partikelemissionen bei. Studien berichten, dass Bremsabriebpartikel bis zu 21 % der gesamten PM10-Belastung durch Fahrzeuge in städtischen Gebieten ausmachen können [6,7]. Basierend auf weiteren Studien (z.B. [8–11]), gelangt ein Anteil von ca. 35–55 % in die Luft, während sich der verbleibende Anteil entweder auf den Bremskomponenten oder auf der Strassenoberfläche ablagert. Daher gelten Bremspartikelemissionen als eine der Hauptquellen für die Feinstaubbelastung in städtischen Gebieten.

Die chemische Zusammensetzung der emittierten Bremspartikel hängt weitgehend von der spezifischen Zusammensetzung des Bremsmaterials [12,13] und die zugehörigen Bremsreibungsparameter sowie die Betriebsbedingungen (Geschwindigkeit, Verzögerung, Druck, Drehmoment) und die beim Bremsen entstehende Temperatur [14,15] ab. Bremsbeläge enthalten nicht nur einen einzigen Rohstoff, sondern eine Vielzahl von Materialien in unterschiedlichen Anteilen. Diese Materialien werden anhand ihrer Funktionalität in vier Kategorien eingeteilt: Reibungsmodifikatoren, Verstärkungsmaterialien, Füllstoffe und Bindemittel. Bremsbeläge mit geringem Stahlanteil verursachen aufgrund ihrer hohen Aggressivität gegenüber den entsprechenden Grauguss-Scheiben tendenziell mehr Bremsemissionen als stahlfreie Beläge. Darüber hinaus weisen Bremsscheiben mit geringerer Oberflächenhärte aufgrund des höheren Scheibenverschleisses höhere Bremsemissionen auf. Trotz der Unterschiede im Bremsmaterial werden Fe, Cu, Zn, Ba und Sb den Bremsen zugeschrieben und daher als Marker für den Bremsverschleiss verwendet [16–18]. Während des Bremsvorgangs führt die steigende Temperatur der Reibungspartner zur Vergasung der in der Zusammensetzung der Bremsbeläge enthaltenen Harze und zur Bildung von Kohlenwasserstoffpartikeln [19,20]. Metalloxide können durch die Oxidation von Metallen entstehen [20]. Die Bremsbelagmaterialien unterliegen heftigen Zersetzungs- und Oxidationsreaktionen und erzeugen grosse Mengen unvollständig oxidierter, organischer Produkte, insbesondere bei Temperaturen über 475 °C. Diese organischen Produkte führen zu einer Vermehrung von Partikeln unter 200 nm, während gleichzeitig Nanopartikel unter 40 nm entstehen [21]. Hohe Temperaturen führen auch dazu, dass sich die Oberfläche der Bremsbeläge ablöst (delaminiert) und in Partikel mit einer Grösse von über 2.5 µm zerfällt [22].

Die Ergebnisse der Bremspartikelmessungen sind nicht ohne Weiteres vergleichbar, da sie mit unterschiedlichen Methoden ermittelt wurden. In vielen Fällen sind sie aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Versuchsaufbauten inkonsistent oder sogar widersprüchlich [23–25]. Versuchsaufbauten basieren auf spezifischen

Prüfständen für Bremsenkomponenten [22,25–28], Pin-on-Disc-Messungen [29–32], und Messungen auf dem Rollenprüfstand unter Einbeziehung des gesamten Fahrzeugs [21,23,33,34]. Darüber hinaus gibt es Messungen durch Probenahmen direkt in der Nähe der Räder und Bremsen auf der Strasse [26]. Als eine der am häufigsten verwendeten Methoden zur Bremspartikelmessung bietet die Bremsenprüfstandmethode den Vorteil einer einfachen Struktur und einer hohen Regelgenauigkeit. Der Bremsenprüfstand wird auf unterschiedliche Trägheits- und Drehzahlen eingestellt, um die tatsächlichen Bremsbedingungen am Fahrzeug nachzubilden. Prüfungen auf dem Fahrgestellprüfstand sind einerseits deutlich komplexer und zeitaufwendiger, andererseits können die Ergebnisse jedoch als näher an den realen Fahr-Emissionen angesehen werden.

Die Standardisierung der Messung von Bremsabriebemissionen ist derzeit eines der Hauptthemen der Arbeitsgruppe für Energie und Umweltverschmutzung (GRPE), die im Rahmen der informellen Arbeitsgruppe zum Partikelmessprogramm (PMP IWG) organisiert wurde, um eine globale technische Regelung Nr. 24 (UN GTR No. 24) für die Probenahme und Messung von Bremspartikelemissionen von leichten Personenwagen und Nutzfahrzeugen bis zu 3.5 Tonnen zu entwickeln [6,7]. Ein harmonisiertes, allgemein anerkanntes Prüfverfahren für die Probenahme und Messung von Bremspartikeln [35–41] basierend auf Messungen auf einem speziellen Bremsprüfstand, an dem nur die Reibungspartner beteiligt sind (ohne das Fahrzeug), war das Hauptziel. Darüber hinaus wurde ein standardisierter Bremszyklus in Form der weltweit harmonisierten Typgenehmigungsprüfung für leichte Personenwagen und Nutzfahrzeuge (WLTC) definiert, auch speziell für den Bremsprüfstand [36–38]. Erst kürzlich wurden die Ergebnisse eines Ringversuchs veröffentlicht, bei dem Bremspartikelmessungen an speziellen Bremsenprüfständen durchgeführt wurden [39–41]. Der WLTC-Bremszyklus ist nicht zu verwechseln mit dem WLTC-Zyklus zur Bestimmung der Fahrzeugabgasemissionen.

Während der WLTC-Bremszyklus bei Bremsen auf einem Komponentenprüfstand zum Einsatz kommt, wird mit dem WLTC-Emissionszyklus das gesamte Fahrzeug auf einem Fahrzeugrollenprüfstand vermessen. Bei beiden werden unter Zuschaltung von Schwungmassen zusätzlich die Widerstandseigenschaften des Fahrzeugs simuliert.

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, einen Beitrag zur Bewertung der Bremspartikel von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) zu leisten. BEVs sind aufgrund des Gewichts der Batterie schwerer als ihre Pendants mit Verbrennungsmotor. Daher ist mit erhöhten Bremspartikelemissionen zu rechnen. Andererseits nutzen BEV die Möglichkeit des elektrischen Bremsens, bei dem Energie in die Batterie zurückgewonnen wird, wodurch das mechanische Bremsen und die damit verbundenen Bremspartikelemissionen reduziert werden. Bei jedem Bremsvorgang kommen beide Arten des Bremsens zum Einsatz [42]. Fahrzeughersteller nutzen unterschiedliche Verteilungen der Bremsenergie in den beiden Bremsmodi, basierend auf eigenen Kriterien für sicheres, zuverlässiges und komfortables Abbremsen des Fahrzeugs. Darüber hinaus bieten Fahrzeughersteller BEV-Fahrern die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Fahrzeugmodi zu wählen, was zu einem sportlicheren, komfortableren und/oder ökologischeren Fahrverhalten führt. Die vorliegende Arbeit befasst sich auch mit der Frage, ob diese verschiedenen Fahrzeugmodi die Bremspartikelemissionen beeinflussen. Darüber hinaus wird der Einfluss des Ladezustands der Batterie (SoC) auf die Bremspartikelemissionen untersucht. Eine vollgeladene Batterie erlaubt kein elektrisches Bremsen. Eine mit vollgeladener Batterie zurückgelegte Strecke kann

zu höheren Bremspartikelemissionen führen als bei einer Batterie mit niedrigerem Ladezustand. Gleichzeitig ist die Batterie schnell entladen, was zur Verfügbarkeit des elektrischen Bremsens führt.

Daher wurden drei BEVs verschiedener Hersteller mit speziell entwickelten und hergestellten Teilen ausgestattet (detailliert dargestellt in [21]) für umfangreiche Messungen der Bremspartikelemissionen auf dem Fahrzeugrollenprüfstand. Die Messungen ermöglichten direkte Vergleiche mit je einem ähnlichen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor- und Hybridantrieb, die mit identischen Geräten auf dem identischen Rollenprüfstand gemessen wurden.

2 Experimenteller Aufbau

2.1 PN- und PM-Messungen

Der Messaufbau wurde in enger Anlehnung an das Protokoll des Particle Measurement Programme (PMP) zur Quantifizierung von Abgaspartikeln konzipiert und realisiert. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über den konzeptionellen Aufbau, der in der vorliegenden Arbeit zur Messung der PN- und PM-Emissionen von leichten batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) auf dem Rollenprüfstand verwendet wurde. Der identische Aufbau wurde für PN- und PM-Messungen eines Benzin- sowie eines Hybrid-Fahrzeugs verwendet, [21].

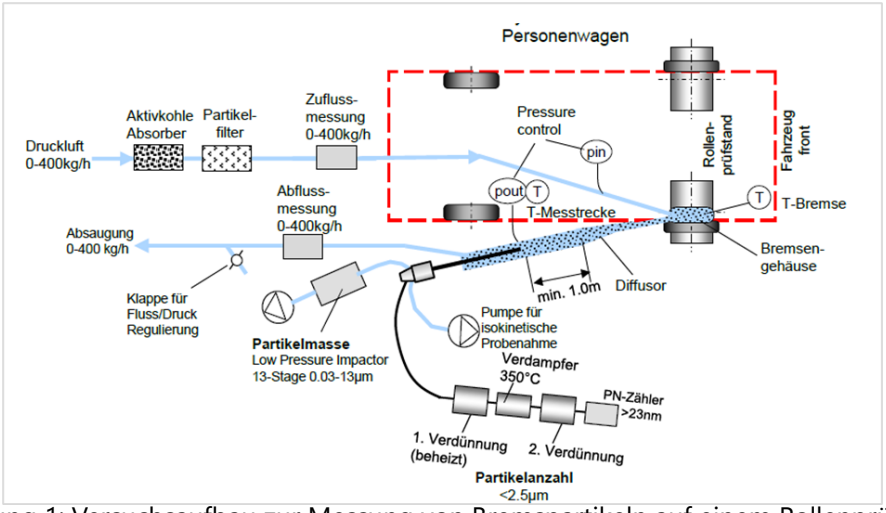

Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Messung von Bremspartikeln auf einem Rollenprüfstand.

Zur Erzeugung des Aerosols, das die Bremspartikel transportiert, wurde ein Kompressor für Umgebungsluft mit integrierter Trocknung verwendet. Die Luft wurde einem Aktivkohleabsorber und einem Partikelfilter zugeführt, um etwaige Umgebungsstaubpartikel abzuscheiden, sodass das Bremsgehäuse mit sauberer Spülluft in ausreichender Menge (220 kg/h) versorgt wurde. Die Spülluftmenge wurde so gewählt, dass an der rechten (im Gehäuse) und der linken (unveränderten) Vorderradbremse des Fahrzeugs ähnliche Temperaturen herrschten [21]. Stromabwärts der Bremse wurde das Aerosol mit einem Sauggebläse abgeführt, um einen leichten Überdruck im Bremsgehäuse zu den Messgeräten zu erzielen, die zur Bewertung der Partikelanzahl

(PN) und Partikelmasse (PM) sowie der damit verbundenen Verteilungen verwendet wurden. Der Messaufbau ist mit einigen weiteren Details in Abbildung 2 dargestellt.

Die PN-Emissionen wurden mit einem PMP-konformen Partikelsammler gemessen, der mit einem Volatile Particle Remover (VPR) und einem Partikelzähler (TSI 3010, mit 50 % Cut-off bei 23 nm) ausgestattet war und alle Partikel grösser als 23 nm zählte.

Zur Bestimmung der gravimetrischen (PM) Massen-Grössenverteilung der emittierten Bremspartikel wurde ein 13-stufiger Dekati-Niederdruck-Impaktor (DLPI) verwendet. Die Unterteilung basiert auf dem äquivalenten aerodynamischen Durchmesser (D) der Partikel, was zu einem Partikelspektrum von 13 Grössenklassen zwischen 30 nm und 12.06 µm führt, basierend auf der Annahme, dass die Partikel kugelförmig sind und eine Dichte von 1 g/cm^3 haben. Als Partikelträger für die Messung der Massen-Grössenverteilung wurden Polycarbonatfolien verwendet. Für die letzte Stufe des Impaktors (Stufe 0) wurde ein Backup-Filter verwendet (teflonbeschichteter Glasfaserfilter, TX 40), der die aus den vorherigen Stufen verbleibenden Partikel mit einer Grösse von weniger als 30 nm auffängt. Um elektrostatische Einflüsse zu vermeiden, wurden die Folien vor dem Wiegen mit einem elektrischen Hochspannungsionisator elektrisch neutralisiert.

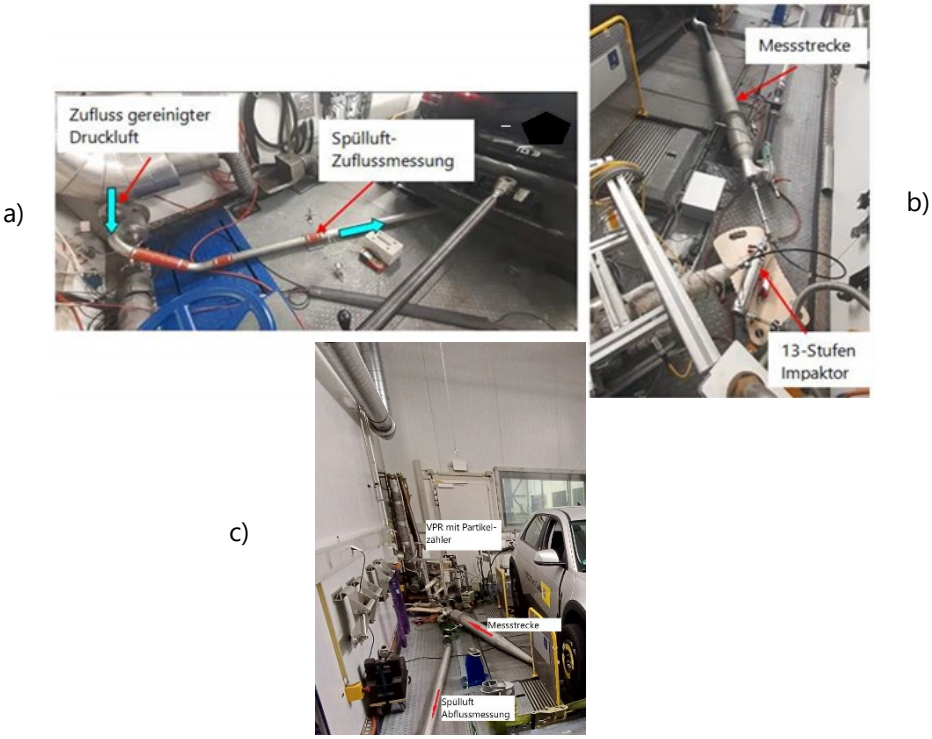

Abbildung 2: BEV-Fahrzeug, a) Zufuhr gereinigter Luft mit Zuflussmessung zum Bremsengehäuse. b) Messstrecke und 13-Stufen Impaktor. c) Messstrecke mit Partikelprobennahme sowie Spül- und Abflussmessung.

2.2 Fahrzeugmodifikationen

Zur Messung der Bremspartikel wurde die vordere, rechte Bremsscheibe in ein speziell angefertigtes Gehäuse mit einer rollenden mechanischen Dichtung eingekapselt. Um genügend Platz für das Bremsgehäuse innerhalb und teilweise ausserhalb der Radkästen zu schaffen, wurde die Vorderachse verlängert, sodass der

Abstand zwischen den beiden Vorderrädern im Vergleich zum Strassenfahrzeug geringfügig vergrössert wurde. Das Bremsgehäuse (die untere Hälfte davon) ist in Abbildung 3a dargestellt. In der Mitte ist auch die Verlängerung zu sehen. Das Notrad des Fahrzeugs wurde auf der Verlängerung montiert. In Abbildung 3b befindet sich die gekapselte Bremse hinter dem Notrad. Das Auslassrohr ist ebenfalls in der unteren, linken Ecke zu sehen. Diese Anordnung wurde gewählt, um die Fahrzeuggeometrie so wenig wie möglich zu verändern und die zusätzlichen Komponenten für die Messungen unterzubringen. Die verschiedenen erforderlichen Teile mussten mit hoher Präzision konstruiert und gefertigt werden, um die erforderliche gute Passform für jedes Fahrzeug zu gewährleisten.

Die Noträder haben im Vergleich zu den Originalrädern einen kleineren Durchmesser. Bei identischen Fahrzeuggeschwindigkeiten haben das Notrad und die Scheibenbremse daher eine um ca. 25 % höhere Drehzahl. Die Bremspartikel können bei dieser Baugruppe höher sein als bei einem normalen Rad. Der Durchmesser des Notrades ist jedoch nur etwa 10 % kleiner als der kleinste für die gemessenen Fahrzeuge zugelassene Reifendurchmesser.

Die Kräfte auf den Rollenprüfstand wurden sowohl mit den Originalrädern als auch mit den Noträdern und der Bremse gemessen.

a) b)

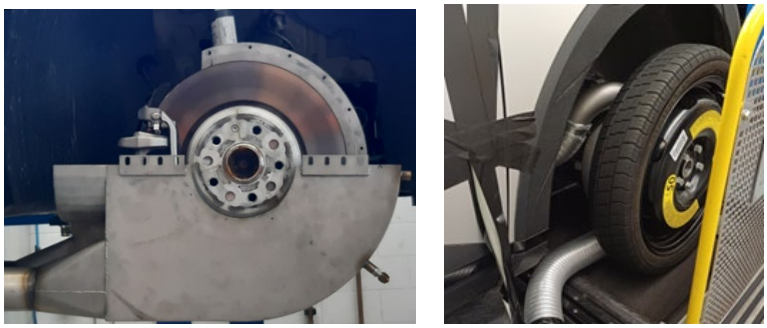

Abbildung 3: a) Bremsgehäuse (nur die untere Hälfte, für die Messungen wurde auch die obere Hälfte des Gehäuses montiert), b) Messkonfiguration mit dem Notrad (gesamtes Bremsgehäuse und Verlängerung hinter dem Notrad).

Um Komplikationen mit dem Bremsgehäuse in Kombination mit dem Notrad zu vermeiden, wurde der letzte Teil des WLTC-Zyklus mit den Höchstgeschwindigkeiten nicht in alle Messungen integriert. Alle Messungen der verschiedenen Fahrzeuge sowie der verschiedenen Bedingungen jedes Fahrzeugs bestanden aus fünf Wiederholungen des WLTC-Zyklus ohne den letzten Teil, gefolgt von zwei Wiederholungen des gesamten WLTC-Zyklus (mit dem Höchstgeschwindigkeitsteil).

Zur Evaluierung des Versuchsaufbaus wurde eine Reihe spezifischer Messungen durchgeführt. Die Hauptziele waren:

- Einschätzung des Einflusses der Hintergrundpartikelkonzentrationen,
- Bestimmung des optimalen Spülstroms,
- Bewertung der Partikeltransporteffizienz des gesamten Aufbaus,

- Überwachung der Temperatur der Bremsscheiben (am Ende jedes Zyklus), um sicherzustellen, dass keine signifikanten Temperaturunterschiede zwischen der rechten, vorderen, gemessenen Scheibe (im Gehäuse eingeschlossen) und der linken Scheibe (in der regulären Fahrzeugkonfiguration) bestehen.

Weitere Einzelheiten und Ergebnisse dieser spezifischen Messungen zur Beurteilung der oben genannten Punkte sind in [21] zu finden.

2.3 Batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs)

In dieser Studie wurden drei mittelgrosse BEVs ausgewählt, die für den europäischen Markt für mittelgrosse Personenwagen typisch sind. Die wichtigsten Merkmale der Fahrzeuge in Bezug auf das Bremsverhalten sind in Tabelle 1 zusammengefasst, wo wir auch die Merkmale eines Verbrennungsmotor- und eines Hybrid-Fahrzeugs aufführen, die für die Vergleiche in Abschnitt 3.5 herangezogen wurden. Weitere Details zum Verbrennungsmotor- und zum Hybrid-Fahrzeug hinsichtlich der Bremspartikelemissionen sind in [21] zu finden.

Während die Antriebskonfiguration für konventionelle (Verbrennungsmotor-) und Hybrid-Fahrzeuge hinsichtlich der Bremspartikelemissionen keine Bedeutung haben sollte, kann sie für BEVs wichtig sein, da nur die mit einem Elektromotor verbundenen Räder für das elektrische (rekuperative) Bremsen verwendet werden können.

	BEV1	BEV2	BEV3	ICE1	Hybrid
Vordere Bremsen	Scheiben	Scheiben	Scheiben	Scheiben	Scheiben
Hintere Bremsen	Trommeln	Scheiben	Scheiben	Scheiben	Scheiben
Antrieb	Hinterrad	Allrad	Hinterrad	Vorderrad	Vorderrad
Leergewicht [kg]	1815	1899	2275	1820	1805
Zulassungsjahr	2021	2023	2023	2015	2013

Tabelle 1: Relevante technische Daten der gemessenen Fahrzeuge

Die in dieser Studie verwendeten Fahrzeuge verfügten über serienmässige Reibungspartner (Scheiben und Bremsbeläge). Die Fahrzeuge wurden für die Messungen von ihren Besitzern ausgeliehen, sodass die Reibungspartner vor den Messungen im normalen Alltagsbetrieb verwendet wurden.

Der Start des Messzyklus mit einer voll aufgeladenen Batterie (SoC=100 %) kann zu höheren Bremspartikelemissionen führen, da das elektrische Rekuperationspotenzial zumindest zu Beginn des Zyklus geringer ist. Daher wurden alle Zyklen ausgehend von zwei verschiedenen SoCs gemessen, nämlich 100 % und 65 %. Ein Start bei niedrigeren SoCs wurde nicht untersucht, um zu vermeiden, dass die Batterie gegen Ende des Zyklus ihren Entlademodus ändert. Es ist zu beachten, dass das Entladen von Batterien unter konstanter Spannung erfolgt, solange der Ladezustand der Batterie über etwa 20 % liegt (abhängig vom Zelltyp und der Auslegung

des Batteriemanagementsystems durch den Fahrzeughersteller). Die weitere Entladung erfolgt unter variabler (abnehmender) Spannung und konstantem Strom. Der Einfluss des Energiemanagementsystems des Fahrzeugs in diesem Bereich ist einer der nicht offengelegten Punkte und kann auch das Bremsverhalten beeinflussen. Daher wurden die Bremsvorgänge und die damit verbundenen Emissionen in der vorliegenden Studie nur im ersten Entladungsbereich untersucht.

Im Allgemeinen bieten BEVs ihren Nutzern mehrere Betriebsmodi zur Auswahl. Neben dem „normalen" Betriebsmodus besteht die Möglichkeit, einen aggressiveren „Sportmodus", einen Modus für widrige Wetterbedingungen (Schnee usw.) sowie einen Betriebsmodus zu wählen, der sich auf „komfortables Fahren" konzentriert und unter anderem auf einer ausgewogeneren Verteilung zwischen elektrischer und mechanischer Bremsung basiert. In der vorliegenden Arbeit bezeichnen wir den komfortorientierten Betriebsmodus als „reduzierten Rekuperations"-Modus. Die spezifischen Ziele und Vorgaben der Fahrzeughersteller hinter diesen Betriebsmodi sind uns nicht bekannt und unterscheiden sich höchstwahrscheinlich von Hersteller zu Hersteller, da auch die Bezeichnung dieser Modi unterschiedlich ist. In der vorliegenden Arbeit wurden die BEVs sowohl im „normalen" Betriebsmodus als auch im Modus „reduzierte Rekuperation" gemessen, bei dem wir mehr mechanisches Bremsen und damit auch höhere Bremspartikelemissionen erwarteten. Vereinzelt wurden auch die andere Modi gemessen, insbesondere für Fahrzeug BEV1.

2.4. Testzyklus

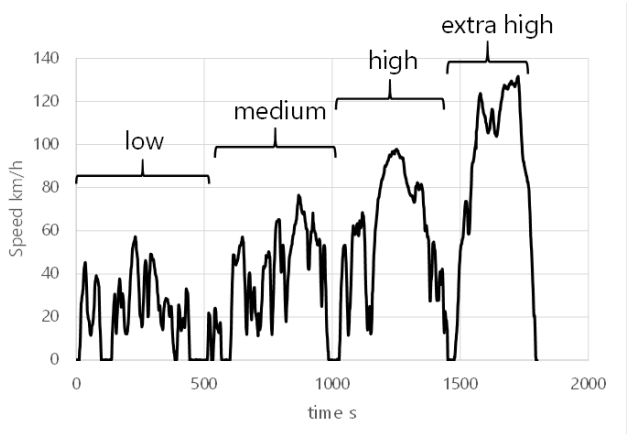

Abbildung 4: Geschwindigkeitsprofil [km/h] des WLTC-Zyklus mit den vier Anteilen mit tiefen (low), mittleren (medium), hohen (high), and sehr hohen (extra high) Geschwindigkeiten.

Für die Messungen wurde der aktuelle WLTC-Emissionszertifizierungszyklus für leichte Nutzfahrzeuge gewählt (Abbildung 4). Dieser Zyklus ist nicht zu verwechseln mit dem spezifischen WLTC-Bremszyklus, der nur für einen Bremsprüfstand (ohne Fahrzeug) definiert ist. Der WLTC-Fahrzyklus für Emissionen besteht aus vier Teilen: niedrige, mittlere, hohe und sehr hohe Geschwindigkeit. Die jeweiligen Höchstgeschwindigkeiten (v_{max}) jedes Teilzyklus sind: Niedrig: $v_{max} \leq 60$ km/h; Mittel: 60 km/h $< v_{max} \leq 80$ km/h; Hoch: 80 km/h $< v_{max} \leq 110$ km/h; Extra hoch: $v_{max} > 110$ km/h.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Verteilung der Bremsenergie der gemessenen BEVs

Alle Experimente wurden auf einem 2-Achsen-Rollenprüfstand durchgeführt, der die Erfassung des Energieflusses auf beiden Fahrzeugachsen während der Beschleunigung sowie beim Bremsen über den gesamten WLTC-Zyklus ermöglicht. Die Zeitverläufe dieser Energieflüsse sind in Abbildung 5 für das BEV3 dargestellt. Für diese Messung wurde das BEV3 im Normalmodus betrieben, während der Zyklus mit einer voll aufgeladenen Batterie (100 % SoC) gestartet wurde. Die wichtigsten Merkmale sind deutlich zu erkennen. Der grösste Teil der Bremsenergie wird durch die elektrische Bremse erzielt, die Energie in die Batterie zurückführt (grüne Linie). Deutlich geringer ist die Bremsenergie, die durch die mechanischen Bremsen an den Vorderrädern erzielt wird (hellviolette Linie), während die geringste Bremsenergie auf die mechanischen Bremsen an den Hinterrädern entfällt (dunkelviolette Linie). Die Summe der gesamten Bremsenergien ist durch die hellblaue Linie dargestellt. Wie zu erwarten, ist sie deutlich geringer als die Beschleunigungsenergie (gelbe Linie). In [21] haben wir gezeigt, dass die Summe aus der Rekuperationsenergie (grüne Linie) und der aus der Fahrzeugbatterie entnommenen Energie (in Abbildung 5 nicht dargestellt) zu Werten führt, die etwa 10–15 % höher sind als die Beschleunigungsenergie (gelbe Linie).

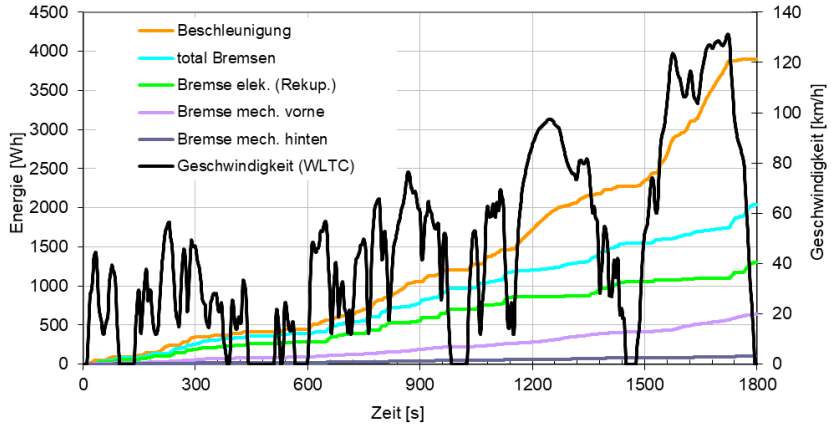

Abbildung 5: Vergleich der Zeitverläufe der verschiedenen Bremsenergien von BEV3 im Normalbetrieb und bei 100 % SoC zu Beginn des Testzyklus.

Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, werden etwa zwei Drittel der Bremsenergie von der elektrischen Bremse, etwa ein Drittel davon von den mechanischen Vorderradbremsen und ein sehr kleiner Teil von den mechanischen Hinterradbremsen übernommen. Diese Verteilung der Bremsenergie ist in Abbildung 6 für 5 Wiederholungen detailliert dargestellt (ohne Modifikationen, mit 100 % SoC zu Beginn des Zyklus). Darüber hinaus werden die Ergebnisse für die vier Teile des WLTC-Zyklus separat dargestellt.

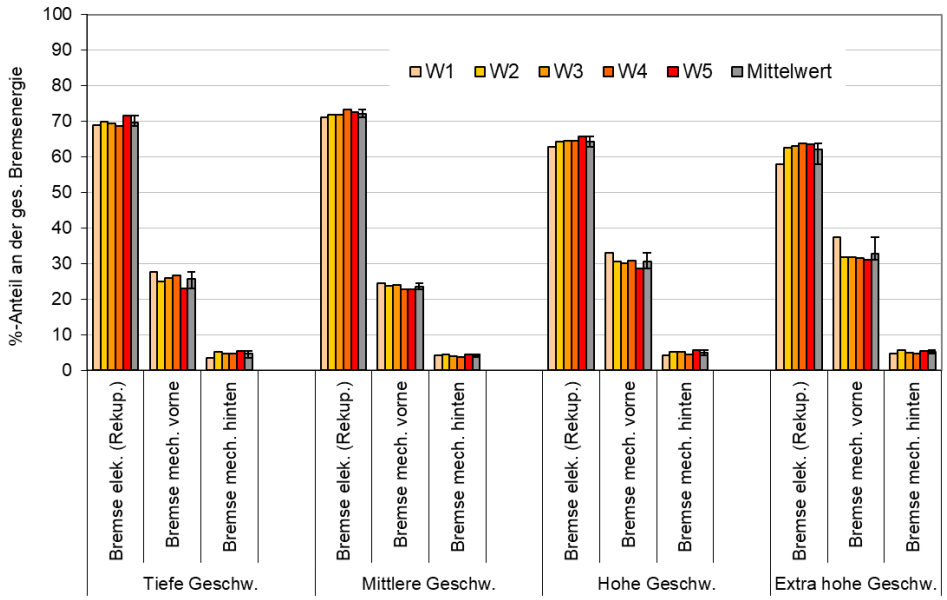

Abbildung 6: Vergleich der Bremsenergieverteilung auf elektrische und mechanische Bremsen (Vorder- und Hinterachse) des BEV3 im Normalbetrieb und bei 100 % SoC zu Beginn des Testzyklus (5 Wiederholungen W1-W5 unter identischen Startbedingungen). Abbildungen A1 und A2 im Anhang, zeigen die entsprechenden Bremsenergieverteilungen von BEV1 und BEV2.

Die Ergebnisse sind für die 5 Wiederholungen nahezu identisch, während die Tendenzen für alle Teile des WLTC-Zyklus sehr ähnlich sind. Abbildung 6 zeigt, dass in den beiden letzten WLTC-Teilen mit den höchsten Fahrzeuggeschwindigkeiten die mechanischen Bremsen stärker genutzt werden als in den ersten beiden Teilen mit den niedrigeren Geschwindigkeiten. Es ist wahrscheinlich, dass in den beiden Teilen des Zyklus mit den höchsten Geschwindigkeiten die erforderliche Bremsleistung manchmal die maximale Batterieladeleistung übersteigt, was zu mehr mechanischem Bremsen führt. Auch die beiden anderen gemessenen BEVs hatten in den letzten beiden Teilen des WLTC-Zyklus höhere mechanische Bremsanteile (siehe Anhang Abbildungen A1 und A2).

Das allgemeine Muster für BEV3 ist offensichtlich: Etwa 68 % der Bremsenergie wird elektrisch erzeugt, wobei Energie in die Batterie zurückgeführt wird. Etwa 27 % der Bremsleistung wird mechanisch von den Vorderachsbremsen erbracht, während die restlichen 5 % (ebenfalls mechanisch) von den Bremsen der Hinterachse erbracht werden. Diese Verteilung unterschied sich bei den drei gemessenen BEVs erheblich (Tabelle 2). Das elektrische Bremsen wurde beim BEV1 nur für 52 % der Bremsenergie verwendet, während beim BEV2 54 % der gesamten Bremsenergie durch elektrisches Bremsen abgedeckt wurde.

	BEV1	BEV2	BEV3
Elektr. Bremsen (Rekup.)	52%	54%	68%
Mech. Bremsen (vorne)	33%	36%	27%
Mech. Bremsen (hinten)	15%	10%	5%

Tabelle 2: Mittlere Verteilung der Bremsenergie bei den drei gemessenen BEVs über den WLTC-Zyklus.

Abbildung 7 zeigt die Bremsenergieverteilung von BEV3, wenn beim Start des WLTC die Batterie zwei verschiedenen Ladezustände (SoCs) hatte, sowie im normalen Fahrmodus und im Fahrmodus mit reduzierter Rekuperation. Es ist ersichtlich, dass die Unterschiede sehr gering sind. Der Start mit einer nicht vollständig geladenen Batterie (SoC=65 %) ermöglicht zu Beginn des Zyklus eine etwas stärkere Rekuperation. Sobald ein Teil der Batterieladung verbraucht ist, steht die Rekuperation in vollem Umfang zur Verfügung, sodass die Unterschiede über den gesamten WLTC-Zyklus hinweg gering, jedoch erkennbar und plausibel sind. Bei den Messungen mit SoC=65 % zu Beginn des Zyklus wurde die elektrische Bremse etwas häufiger eingesetzt als bei denen mit SoC=100 % (und die mechanische Bremse etwas seltener). Zu beachten ist, dass in Abbildung 7 die meisten der gezeigten WLTC-Wiederholungen den extra hohen (EH) Teil nicht enthielten. Wie zu sehen ist, wirkte sich dies nur um wenige Prozentpunkte auf die Bremsenergieverteilung aus.

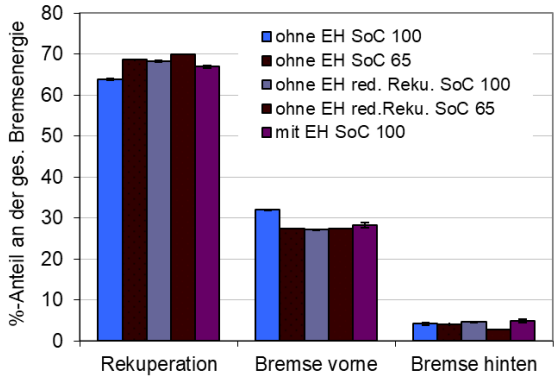

Abbildung 7: Bremsenergieverteilung von BEV3 bei verschiedenen Fahrzeugparameterkonfigurationen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die verschiedenen Fahrmodi sowie die unterschiedlichen SoCs zu Beginn des Zyklus keinen grossen Einfluss auf die Verteilung der Bremsenergie zwischen elektrischem und mechanischem Bremsen haben. Bei voll aufgeladener Batterie ist eine leichte Verringerung des elektrischen Bremsens und eine leichte Zunahme des mechanischen Bremsens zu beobachten. Das Verhalten von BEV1 und BEV2 war sehr ähnlich.

3.2 Bremspartikelanzahl (PN)

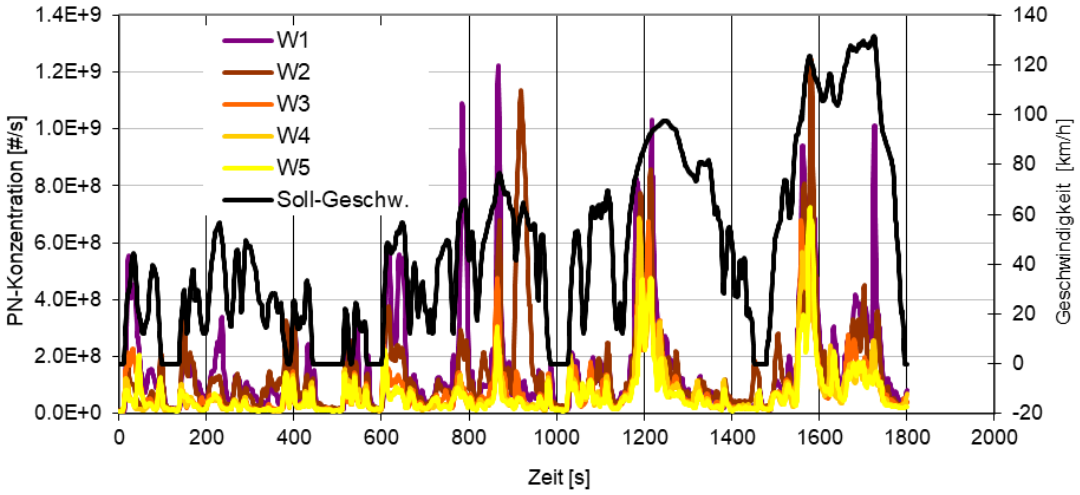

Abbildung 8: PN-Konzentrationen von BEV3 während 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen des WLTC-Zyklus (W1-W5, Normalbetrieb mit 100 % SoC der Batterie zu Beginn des Zyklus).

Die PN-Emissionskonzentrationen des BEV3 während 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen des WLTC-Zyklus sind in Abbildung 8 dargestellt. Bremspartikel (PN) werden in diskreten Ereignissen mit unterschiedlich hohen Spitzen freigesetzt. Bei jeder Wiederholung treten die Emissionsereignisse zu fast identischen Zeitpunkten auf, jedoch unterscheiden sich die emittierten Mengen. Es wurden hauptsächlich zwei Gründe für diese PN-Emissionsspitzen identifiziert: Einige dieser Spitzen stehen eindeutig im Zusammenhang mit dem Bremsen (Verzögerungen), wie in Abbildung 9 (blau umrandet) zu sehen ist. Weitere Spitzen treten während Beschleunigungen (Phasen ohne Bremsen) auf, nachdem das Fahrzeug höhere Geschwindigkeiten (>60 km/h) überschritten hat (in Abbildung 9, rot umrandet), die eindeutig nicht mit dem Bremsen in Verbindung stehen. Diese entsprechen Emissionen von Bremspartikeln, die bei früheren Bremsvorgängen entstanden sind und auf den Reibungspartnern abgelagert waren. Mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit werden diese abgelagerten Partikel durch die zunehmenden aerodynamischen Kräfte von den Reibungspartnern abgetragen. Diese Emissionscharakteristik war bei allen drei gemessenen BEVs sowie bei einem Hybrid- und einem konventionellen ICE-Fahrzeug, gemessen unter ähnliche Bedingung am identischen Prüfstand, sehr ähnlich [21]. Die Emissionsmengen unterschieden sich jedoch stark.

Wie bereits erwähnt und in Abbildung 9 deutlich zu erkennen ist, treten fast alle diskreten Emissionsereignisse in allen fünf Wiederholungen zu identischen Zeitpunkten auf. Mit jeder Wiederholung nehmen die PN-Emissionsmengen jedoch ab (niedrigere Spitzen bei jeder aufeinanderfolgenden Wiederholung). Abbildung 10 zeigt die gesamten Brems-PN-Emissionen der fünf aufeinanderfolgenden WLTC-Zyklen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Emissionen um mehr als den Faktor 2 abnehmen, aber nach der dritten Wiederholung sich eher stabilisieren. Dieser Effekt wurde auch in [21,38–40] beschrieben und als "bedding effect" oder

"Einlaufeffekt" bezeichnet. Ein Faktor, der dazu beiträgt, ist, der Reibungsfilm, der sich auf der Bremsbelagsoberfläche bildet und der eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der Verschleissfestigkeit und der Bremsemissionen von Bremsbelägen und Bremsscheiben spielt. Verschleisspartikel aus dem Bremsbelag und der Bremsscheibe aggregieren und bilden einen Reibungsfilm auf der Bremsbelagsoberfläche, der als temporäres Reservoir für Partikel während des Gleitens zwischen den Reibungspartnern dient, bevor dieser Film teilweise abgebaut wird und lose Partikel freigesetzt werden. Somit hängen die Bremsemissionen stark von der Vorgeschichte der Reibungspartner ab. Wissenschaftlich konnte der „Einlauf-Effekt" nicht genau quantifiziert werden; die Beschreibung des Effekts hat jedoch zu einer Best-Practice-Empfehlung geführt, wonach 5 Zykluswiederholungen erforderlich sind, um zuverlässige PN-Emissionsergebnisse zu erhalten, [40]. In der vorliegenden Studie zeigte die vorgestellte Messreihe von BEV3 ein sehr ähnliches „Einlaufverhalten" wie BEV2 (siehe Abbildung A4 im Anhang). Der mit beiden BEV gemessene „Einlaufeffekt" war auch bei Messungen des herkömmlichen ICE- und des Hybrid-Fahrzeuges sehr ähnlich [21]. Im Gegensatz dazu zeigte BEV1 (siehe Abbildung A3 im Anhang) kein typisches "Einlaufverhalten". Die Brems-PN-Emissionen von BEV1 nahmen mit jeder Wiederholung mal zu und mal ab, wobei sich nach der vierten Wiederholung eine Tendenz zur Stabilisierung abzeichnete (was einem umgekehrten Einlaufeffekt entspricht, siehe Abbildung A3). Wie in Abschnitt 3.4 zu sehen ist, wies BEV1 aussergewöhnlich hohe Brems-PN-Emissionen auf. Sicherlich hängt der „Einlauf-Effekt" mit der Geschichte der Reibungspartner, früheren Bremsvorgängen und der Menge der abgelagerten Bremspartikel zusammen. Das eher untypische Verhalten der PN-Emissionen von BEV1 zeigt jedoch, dass ein typischer Einlauf-Effekt mit abnehmenden Bremspartikeln über mehrere Wiederholungen nicht mit allen Bremskonfigurationen aller Fahrzeuge in Verbindung gebracht werden kann.

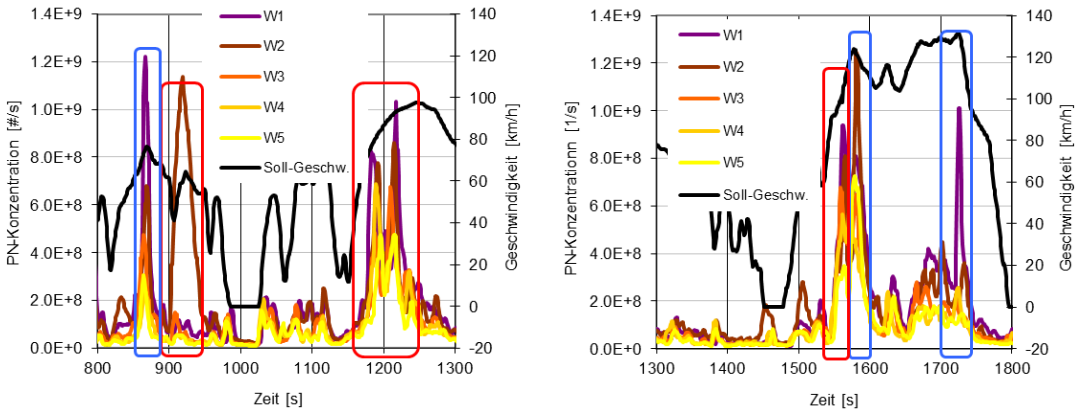

Abbildung 9: PN-Konzentrationen von BEV3 während 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen des WLTC-Zyklus, Auszüge aus Abbildung 8, die Emissionsspitzen hervorheben, die durch Bremsen (blaue Rahmen) und aerodynamische Kräfte (rote Rahmen) verursacht werden, wobei Bremspartikel von den Reibungspartnern abgelöst werden, nachdem die Fahrzeuggeschwindigkeiten hohe Werte erreichen (rote Rahmen) (alle im Normalbetrieb mit 100 % SoC der Batterie zu Beginn des Zyklus).

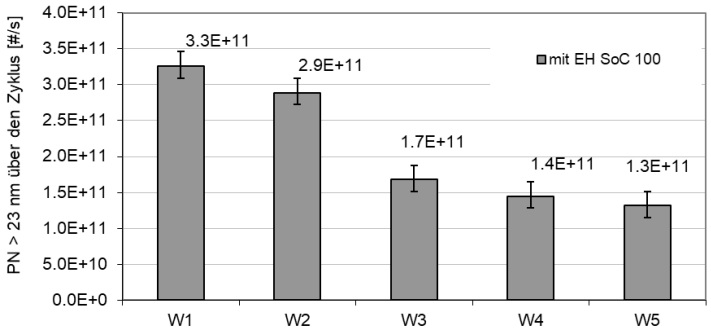

Abbildung 10: Gesamt-PN-Emissionen von BEV3 bei 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen des WLTC-Zyklus (Normalbetrieb mit 100 % SoC der Batterie zu Beginn des Zyklus, Toleranzbalken entsprechen den min. und max. Messwerten). Abbildungen A3 und A4 im Anhang zeigen die entsprechenden Gesamt-PN-Emissionen von BEV1 und BEV2.

Die Abhängigkeit des Einlaufeffektes von der Menge der Brems-PN-Emissionen wird auch in Abbildung 11 hervorgehoben. Abbildung 11 zeigt ferner, dass die ersten Wiederholungen (W1 und auch W2) nicht so zuverlässig sind, da sich zwischendurch die Rangfolge der verschiedenen untersuchten Fälle ändert. Darüber hinaus werden die Auswirkungen des Fahrzeugbetriebsmodus sowie des Ladezustands der Batterie (SoC) zu Beginn des Zyklus dargestellt.

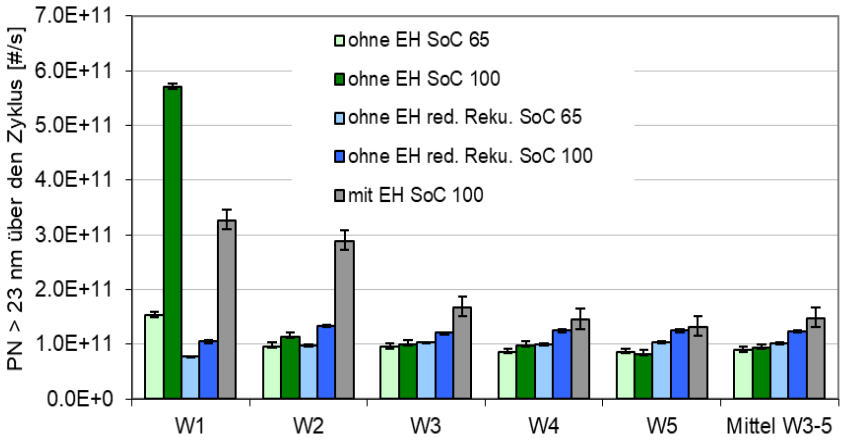

Abbildung 11: Gesamt-PN-Emissionen von BEV3 bei 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen des WLTC-Zyklus, beginnend mit unterschiedlichem Ladezustand (SoC) der Batterie, in zwei verschiedenen Betriebsmodi (normal, nicht gekennzeichnet, und reduzierte Rekuperation) sowie ohne oder mit dem Teil des WLTC-Zyklus mit extra hohen Geschwindigkeiten (EH) (Toleranzbalken entsprechen den min. und max. Messwerten). Abbildungen A5 und A6 im Anhang zeigen die entsprechenden PN-Emissionen von BEV1 und BEV2.

Der Betriebsmodus „geringe Rekuperation" führt zu den höchsten PN-Emissionen (in den letzten 3 Wiederholungen). Dies ist angesichts der zusätzlichen Verwendung der mechanischen Bremsen nicht überraschend. Die Unterschiede zwischen allen untersuchten Fällen sind eher gering, insbesondere nach der dritten Wiederholung. Der Einfluss des Ladezustands der Batterie zu Beginn des Zyklus auf die PN-Emissionen ist auch sehr gering. Der Einfluss des Fahrmodus ist ausgeprägter und führt zu höheren PN-Emissionen im Modus „geringe Rekuperation". Die entsprechenden Messungen von BEV1 sind der Abbildung A5 und die von BEV2 der Abbildung A6 im Anhang zu entnehmen.

3.3 Bremspartikelmasse (PM)

Parallel zu den PN-Messungen wurde die Partikelmassenverteilung (PM) während der WLTC-Zyklen mit dem Dekati-Niederdruck-Impaktor (DLPI) gemessen. Die absoluten akkumulierten Partikelkonzentrationen (in mg/Nm^3) auf jeder Folie (Stufen 1–12) sind in Abbildung 12 dargestellt. Die Massenverteilung ist hintergrundkompensiert und durchmessergewichtet, wobei eine logarithmisch-normale Partikelverteilung auf den Trägerfolien angenommen wird.

Abbildung 12 zeigt, dass die gesamten PM-Emissionen von Bremspartikeln und damit auch die Emissionen in den einzelnen Grössenklassen sehr gering sind, jedoch deutlich über dem Hintergrundniveau liegen. Die Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von etwa 0.31–7.9 µm machen den grössten Anteil der Bremspartikel aus. Auch ultrafeine Partikel sind deutlich vorhanden. In unserer früheren Arbeit [13] haben wir die Morphologie von Bremspartikeln untersucht. Die ultrafeinen Partikel sind eher kugelförmig und wir haben die Hypothese aufgestellt, dass sie das Ergebnis hoher Temperaturen der Reibungspartner sind, die zur Verdampfung und Rekondensation von organischen Komponenten der Bremspartikel führen.

Wie erwartet, wurden die höchsten PM-Emissionen bei den WLTC-Zyklen gemessen, die den Teil mit besonders hohen Geschwindigkeiten (EH) enthalten. Interessanterweise führte der Modus „niedrige Rekuperation" in fast allen Grössenklassen zu deutlich höheren PM-Emissionen (um fast eine Grössenordnung) als der Normalmodus. Dass dieser Unterschied bei den PN-Emissionen nicht so gross war, belegt, dass die Bremspartikel im Modus „niedrige Rekuperation" zu den grösseren Grössenklassen gehören (d. h. mehr mechanisches Bremsen bei niedrigeren Temperaturen der Reibungspartner). Derzeit gibt es starke wissenschaftliche Hinweise darauf, dass Partikelemissionen mit der Bremsscheibentemperatur zusammenhängen und in signifikanten Mengen oberhalb einer Schwellentemperatur auftreten [15,43].

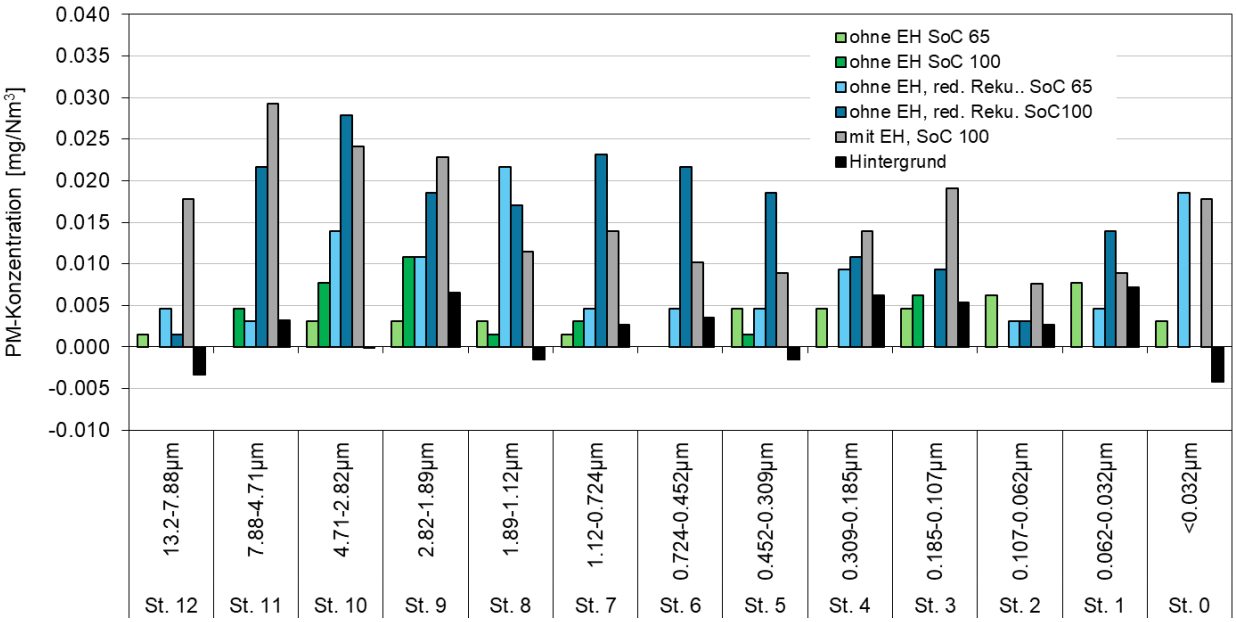

Abbildung 12: PM-Konzentrationen von BEV3 über verschiedene WLTC-Zyklen, beginnend mit unterschiedlichem Ladezustand (SoC) der Batterie, in zwei verschiedenen Betriebsmodi sowie mit und ohne den Teil des WLTC-Zyklus mit besonders hohen Geschwindigkeiten (EH). Abbildungen A7 und A8 im Anhang zeigen die entsprechenden PM-Emissionen von BEV1 und BEV2.

Interessanterweise zeigt Abbildung 12 eine deutliche Verschiebung in der modalen Verteilung zwischen den Zyklen mit den niedrigsten Reibungspartnertemperaturen (ohne EH, niedrige Rekuperation, SoC 100) und denen mit den höchsten (mit EH, SoC 100). Während beide eher bimodal sind, hat die erstere einen Modus bei ca. 4 µm und einen bei 0.6 µm, die letztere einen bei 6 µm und einen bei 0.2 µm. Es wurde berichtet, dass die Massenverteilungen unimodal sind, wobei der Peak zwischen 1 µm und 6 µm variiert [7,12,14]. Im Gegensatz dazu berichten andere Arbeiten (z. B. in [43] und deren Referenzen) von bimodalen oder sogar multimodalen Partikelgrössenverteilungen mit mindestens einem Peak in der feinen und/oder ultrafeinen Fraktion und einem erhöhten Anteil der Partikelmasse im PM2.5-Bereich.

Die Brems-PM-Emissionen von BEV1 (siehe Abbildung A7 im Anhang) waren deutlich höher, etwa viermal so hoch. Der weitaus grösste Teil konzentrierte sich auf die ersten fünf grösseren Grössenklassen. Die entsprechenden PM-Emissionen von BEV2 (siehe Abbildung A8 im Anhang) waren ähnlich wie die von BEV1, wobei BEV2 in den grösseren Grössenklassen mehr und in den kleineren weniger Emissionen aufwies.

3.4. Bremspartikelmorphologie

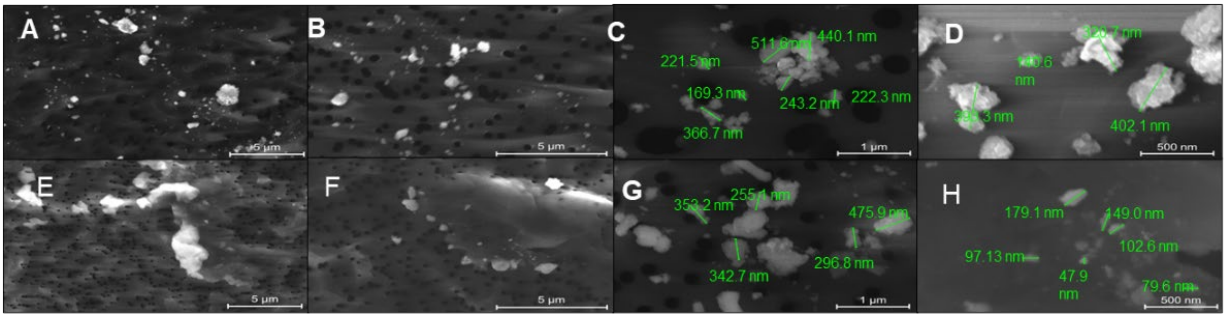

Abbildung 13: REM-Bilder von Bremspartikeln des BEV1 (A-D) und BEV3 (E-H) bei 20'000-facher (A, E), 30'000-facher (B, F), 100'000-facher (C, G) und 200'000-facher Vergrösserung (D, H).

Die Morphologie der Bremspartikel unterschied sich zwischen den Fahrzeugen erheblich. Die grösseren Bremspartikel von BEV1 waren eher einheitlich geformt (Abbildung 13 A und B). Die kleineren Partikel von BEV1 wiesen weniger regelmässige Formen auf und waren inhomogen (Abbildung13 C und D). Im Gegensatz dazu sind die grösseren Bremspartikel von BEV3 (Abbildung 13 E und F) sehr unregelmässig, was auf mechanischen Abrieb hindeutet. Kleinere Bremspartikel von BEV3 haben regelmässigere Formen und scheinen homogen zu sein (Abbildung 13 G und H). Bei beiden Fahrzeugen gibt es reichlich Bremspartikel im Bereich von 100 bis 400 nm.

3.5 PN- und PM-Emissionsfaktoren

In Abbildung 14 sind die durchschnittlichen PN-Emissionen der Bremsen von BEV3 in [#/km] dargestellt, berechnet aus den Ergebnissen in Abbildung 11. Als Gesamtdurchschnitt kann ein grober Wert von 7E+9 #/km angenommen werden. Bei Beginn des Zyklus mit einer voll aufgeladenen Batterie (100 % SoC) sind die Emissionen etwas höher als bei 65 % SoC. Darüber hinaus weist der Modus mit geringer Rekuperation im Vergleich zum Normalmodus deutlich höhere PN-Emissionen auf. Andererseits führen die höheren PN-Emissionen in den Zyklen mit dem extra hohen (EH) Teil (siehe Abbildung 11) nicht zu höheren Emissionsfaktoren, da mit dem extra hohen Teil die zurückgelegte Distanz (Kilometer) überproportional zunimmt. Dieser Rückgang der PN-Emissionen bei Einbeziehung des EH-Geschwindigkeitsanteils im WLTC-Zyklus war nicht bei allen drei untersuchten BEVs der Fall; die Einbeziehung der PN-Emissionen während des EH-Zyklusanteils führte zu einem Anstieg der PN für BEV2 (Abbildung A10 im Anhang).

Kürzlich berichtete eine Laborvergleichsstudie zu ICE-Leichtfahrzeugen, an der 16 Labore mit fünf Bremssystemen mit Messungen auf einem Bremsprüfstand teilnahmen, von Konzentrationen zwischen 9.4E+8 und 1.1E+10 #/km/Bremse [40]. Damit liegt BEV3 in dieser Studie mit einem Durchschnitt von 7E+9 #/km/Bremse etwa im unteren Quartil. [15] berichtet von durchschnittlichen PN-Emissionen der Bremsen von 4.9E+10 #/km/Bremse. Es sollte jedoch beachtet werden, dass sowohl [15] als auch [40] den bremsenspezifischen

WLTC-Zyklus verwendet haben. Andererseits berichtet [44] von Werten zwischen 4.1E+7 und 1.7E+9 #/km/Bremse, die direkt hinter dem Rad an einem Schulbus gemessen wurden.

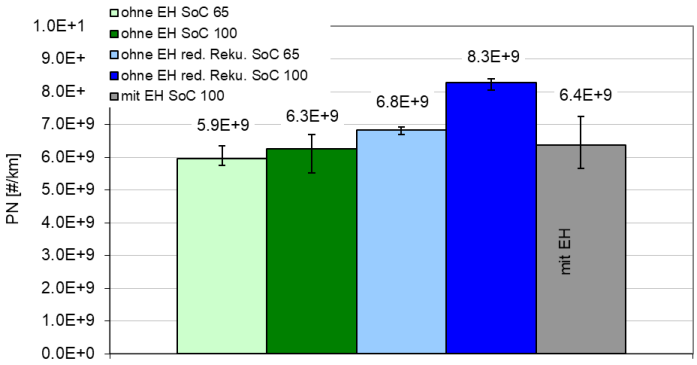

Abbildung 14: Durchschnittliche PN-Emissionen in [#/km] von BEV3, Beginn der Zyklen mit unterschiedlichem Ladezustand (SoC) der Batterie, in zwei verschiedenen Betriebsmodi (normal, nicht gekennzeichnet, und reduzierte Rekuperation) sowie ohne oder mit dem Teil des WLTC-Zyklus mit besonders hohen Geschwindigkeiten (EH), gemäss den Messungen an einer vorderen Scheibenbremse (für jeden Balken wurden 5 WLTC-Wiederholungen gemessen, der Durchschnitt wurde aus den letzten 3 Wiederholungen gebildet, Toleranzbalken entsprechen dem maximalen und dem minimalen gemessenen Wert). Abbildungen A9 und A10 im Anhang zeigen die entsprechenden PN-Emissionen von BEV1 und BEV2.

Abbildung 15 zeigt die gemessenen PN-Emissionen aller drei BEVs im Vergleich untereinander und zum konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (ICE1) sowie zum Hybrid-Fahrzeug ähnlicher Grösse. Alle 5 Fahrzeuge wurden in der vorliegenden Studie unter sehr ähnlichen Bedingungen auf dem gleichen Rollenprüfstand gemessen, wie in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschrieben, mit dem WLTC-Zyklus der Abgasemissionszertifizierung. BEV2 und BEV3 demonstrieren deutlich das Potenzial zur Reduzierung der Bremspartikelemissionen bei BEVs. Die Bremspartikelemissionen von BEV3 sind im Vergleich zu denen des verbrennungsmotorangetriebenen (ICE1) und des Hybrid-Fahrzeugs um das Neunfache geringer. Die Bremspartikelemissionen von BEV2 sind höher, aber immer noch fast dreimal so niedrig im Vergleich zum ICE1 oder zum hybriden Fahrzeug. Dafür aber wies BEV1 die deutlich höchsten Bremspartikelemissionen auf.

Dieses Ergebnis ist besonders interessant, wenn man bedenkt, dass BEV3 das schwerste aller gemessenen Fahrzeuge ist (siehe Tabelle 1). Es unterstreicht das Potenzial zur Reduzierung der Bremspartikelemissionen durch eine optimale Auslegung der Bremsen und des Bremsvorgangs, wobei die Vorteile des elektrischen, rekuperativen Bremsens genutzt werden.

Diese Messergebnisse können für die Schätzung der gesamten PN-Emissionsfaktoren verwendet werden. Es ist zu beachten, dass die Messungen und die in Abbildung 15 dargestellten Ergebnisse an der rechten

Vorderradbremse durchgeführt wurden. Die Zahlen müssen verdoppelt werden, um die Emissionen beider Vorderräder und Bremsen zu erhalten.

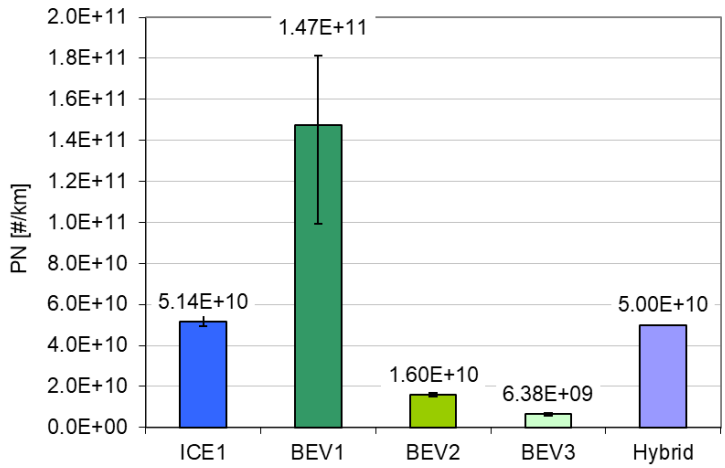

Abbildung 15: Durchschnittliche Brems-PN-Emissionen der drei gemessenen BEVs, eines herkömmlichen verbrennungsmotorangetriebenen Fahrzeuges (ICE1) und eines Hybrid-Fahrzeugs vergleichbarer Grösse, gemessen mit identischer Ausrüstung an der rechten vorderen Scheibenbremse. Die dargestellten Ergebnisse stammen aus dem gesamten WLTC-Zyklus (einschliesslich des Teils mit besonders hohen Geschwindigkeiten). BEVs und das Hybrid-Fahrzeug mit 100 % SoC zu Beginn des Zyklus, alle Fahrzeuge wurden im Normalmodus betrieben (Toleranzbalken entsprechen dem maximalen und dem minimalen gemessenen Wert).

Für BEV1 ergibt sich der Gesamtbremspartikelemissionsfaktor aus dem Wert in Abbildung 14, multipliziert mit dem Faktor 2 unter der Annahme, dass aus den hinteren Trommelbremsen keine Bremspartikelemissionen entweichen können. Für BEV2 und BEV3 werden die Werte aus Abbildung 14 verdoppelt, um die Emissionen der zweiten Vorderradbremse zu berücksichtigen. Die Berücksichtigung der zusätzlichen Emissionen der Hinterradscheibenbremsen wurde proportional der in Tabelle 2 gemessenen und angegebenen, mechanischen Bremsenergieverteilungen durchgeführt. Ein ähnliches Verfahren wurde für ICE1 und das Hybrid-Fahrzeug angewendet.

	ICE1	BEV1	BEV2	BEV3	Hybrid
Brems-PN Emissionsfaktoren [#/km]	1.54E+11	3.0E+11	3.37E+10	1.31E+10	1.5E+11

Tabelle 3: Geschätzte Gesamt-PN-Emissionsfaktoren der Bremsen über den WLTC-Zyklus basierend auf den in Abbildung 14 dargestellten Messergebnissen und unter der Annahme, dass die zweite Vorderradbremse identische Emissionen aufweist, während die Emissionen der Hinterradbremsen basierend auf der Bremsenergieverteilung zwischen Vorder- und Hinterradbremse abgeschätzt sind.

Die Partikelmasse (PM) aus einem Zyklus, bestehend aus der Summe der 13 Stufen des Impaktors (13 Differentialmessungen), unterlag angesichts der recht niedrigen Werte jeder einzelnen Messung einer relativ

hohen Unsicherheit. Daher wurden die Emissionsfaktoren aus den Folienbeladungen über drei aufeinanderfolgende WLTC-Zyklen ermittelt. Die für die rechte Vorderradbremse des BEV3 ermittelten Emissionsfaktoren, die in Abbildung 16 dargestellt sind, ergeben einen Durchschnittswert von etwa 0.5 mg/km für PM < 12 µm und 0.4 mg/km für PM < 2.5 µm. Die Messungen mit dem Hochgeschwindigkeitsteil des Zyklus führen zu den höchsten Werten. Der Einfluss des Ladezustands (SoC) der Batterie im Normalbetrieb ist nicht klar, die gemessenen Werte sind jedoch sehr niedrig. Der Modus „reduzierte Rekuperation" führt hingegen eindeutig zu höheren PM-Emissionen. In diesem Modus führt der Start des Zyklus mit einem SoC der Batterie von 100 % zu höheren PM-Emissionen. Interessanterweise sind die Tendenzen in Abbildung 16 sehr ähnlich und gut vergleichbar zu denen in Abbildung14.

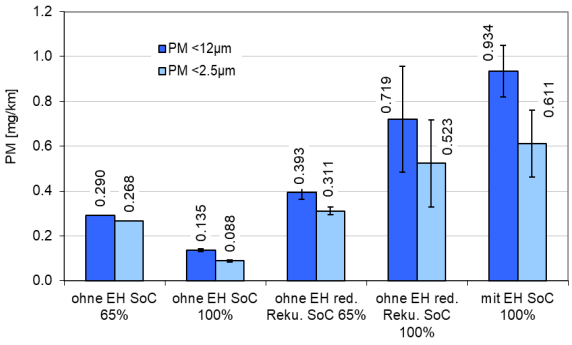

Abbildung 16: Durchschnittliche Brems-PM-Emissionen in [mg/km] von BEV3, Beginn der Zyklen mit unterschiedlichem Ladezustand (SoC) der Batterie, in zwei verschiedenen Betriebsmodi (normal, nicht gekennzeichnet, und reduzierte Rekuperation) sowie ohne oder mit dem Teil des WLTC-Zyklus mit besonders hohen Geschwindigkeiten (EH), gemäss den Messungen an der rechten, vorderen Scheibenbremse (für jeden Balken wurden PM aus 3 WLTC-Wiederholungen auf den Filtern integriert, so dass lediglich ein Durchschnittwert ausgewertet werden kann. Abbildungen A11 und A12 im Anhang zeigen die entsprechenden Ergebnisse von BEV1 und BEV2).

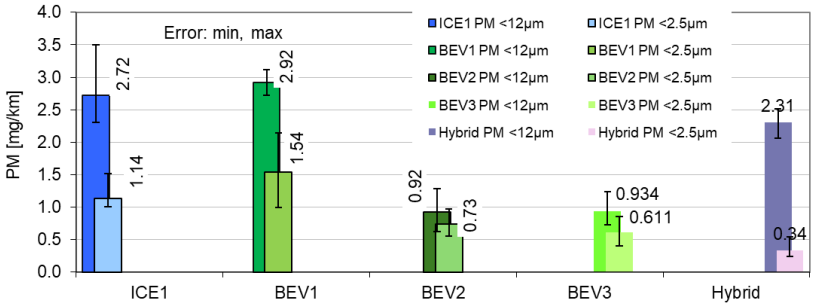

Abbildung 17: Brems-PM-Emissionsfaktoren der gemessenen drei BEVs, eines herkömmlichen ICE und eines hybriden Fahrzeugs mit vergleichbaren Abmessungen, gemessen mit identischer Ausrüstung an der rechten, vorderen Scheibenbremse. Die dargestellten Ergebnisse wurden aus den gesamten WLTC-Zyklen (einschliesslich des Teils mit besonders hohen Geschwindigkeiten) abgeleitet. BEVs mit 100 % SoC zu Beginn des Zyklus, alle Fahrzeuge wurden im Normalmodus betrieben.

Abbildung 17 zeigt die gemessenen Brems-PM-Emissionen der drei BEVs im Vergleich zu einem konventionellen, verbrennungsmotorangetriebenen (ICE1) und einem Hybrid-Fahrzeug ähnlicher Grösse. Die PM-Emissionen von BEV2 und BEV3 betragen etwa ein Drittel der Emissionen des ICE1 und des BEV1-Fahrzeugs. Die PM-Emissionen des Hybrid-Fahrzeugs lagen näher an denen des ICE1 und des BEV1. Interessanterweise sind die PM-Emissionen von BEV2 ähnlich zu denen von BEV3. Da die PN-Emissionen von BEV2 mehr als doppelt so hoch waren wie die entsprechenden Emissionen von BEV3 (siehe Abbildung 15 und Tabelle 3), kann davon ausgegangen werden, dass die von BEV2 emittierten Bremspartikel deutlich kleiner sind (und somit eine höhere Umwelt- und Gesundheitsbelastung darstellen).

Die in Abbildung 17 gemessenen und dargestellten Werte liegen im unteren Bereich der veröffentlichten Werte. Die in [39] zusammengefassten Messungen kommen zu dem Ergebnis, dass die PM2.5- und PM10-Emissionen je nach Bremsentyp und aufgebrachter Prüfkraft zwischen 0.8 und 4.0 mg/km bzw. 2.2 und 9.5 mg/km pro Bremse variierten. Die Trommelbremse emittierte aufgrund ihrer geschlossenen Bauweise deutlich weniger PM, jedoch nicht null (wie in der vorliegenden Studie zur Bestimmung der entsprechenden Emissionsfaktoren angenommen, siehe Tabelle 4). Die Testmatrix umfasste eine Vielzahl von Bremssystemen und -konfigurationen. Fast 37–45 % der emittierten PM fielen in den Bereich der Feinstaubgrösse, wobei dieser Anteil bei der Trommelbremse höher war (eher kleinere Bremspartikel entweichen aus dem Trommelbremsgehäuse). Andererseits fielen fast 50–65 % des gesamten Bremsenmasseverlustes in den Bereich der Partikelgrössen über 10 µm oder gingen vor der Messung verloren [39]. In einer sehr ähnlichen Grössenordnung liegen die in [15] angegebenen PM-Emissionen. Dort wird ein PM10-Wert von 4.6 mg/km pro Rad für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor angegeben. [45] hingegen liefert unterschiedliche Ergebnisse für zwei verschiedene Arten von Bremsbelägen, nämlich Beläge mit geringem Stahlgehalt und Beläge ohne Stahlgehalt. Bremsbeläge mit geringem Stahlgehalt wiesen eine PM10-Emission von 3.9 mg/km pro Bremse pro 1000 kg Fahrzeugmasse auf, allerdings mit erheblicher Streuung. Im Gegensatz dazu wurde für die Bremsbeläge ohne Stahlanteil eine PM10-Emission von 0.4 mg/km pro Bremse pro 1000 kg Fahrzeugmasse ermittelt.

Basierend auf den Messungen in der vorliegenden Arbeit und den Ergebnissen zu den PM-Emissionen der Bremse an einem der Vorderräder, wie in Abbildung 17 dargestellt, wurden die PM-Emissionsfaktoren abgeleitet. Der Ansatz wurde in der Diskussion zum Thema PN beschrieben. Die PM-Emissionsfaktoren sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Brems-PM Emissionsfaktoren	ICE1	BEV1	BEV2	BEV3	Hybrid
PM<12µm [mg/km]	8.16	5.84	1.91	1.93	6.93
PM<2.5µm [mg/km]	3.42	3.08	1.25	1.53	1.02

Tabelle 4: Geschätzte Gesamt-PM-Emissionsfaktoren während des WLTC-Zyklus auf Grundlage der in Abbildung 17 dargestellten Messergebnisse und unter der Annahme, dass die zweite Vorderradbremse identische Emissionen aufweist, während die Emissionen der Hinterradbremsen basierend auf der Bremsenergieverteilung zwischen Vorder- und Hinterradbremse abgeschätzt sind.

4 Schlussfolgerungen

Messungen von PN- und PM-Bremspartikelemissionen wurden an drei batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) auf dem Rollenprüfstand durchgeführt. Dazu wurde die rechte Vorderradbremse bei jedem Fahrzeug in ein speziell entwickeltes Bremsgehäuse mit kontrollierter Belüftung eingekapselt. Diese Anordnung ermöglichte die Messung und Quantifizierung der Emissionen von Bremspartikeln über den WLTC-Zyklus (Emissionszyklus), im Gegensatz zu den gesetzlich vorgeschriebenen Messungen, die nur die Reibpartner der Bremsen in einem eigens definierten Zyklus, dem WLTC-Bremszyklus, betreffen. Parallel dazu konnte auf dem Zweiachs-Rollenprüfstand die Bremsenergieverteilung zwischen elektrischem Bremsen (Rückgewinnung von elektrischer Energie in die Batterie) und mechanischem Bremsen an der vorderen und hinteren Fahrzeugachse ermittelt werden.

Die drei gemessenen BEVs nutzen die Möglichkeit des elektrischen Bremsens (Rückgewinnung von Energie für die Batterie) in unterschiedlichem Umfang. Die Messungen zeigen, dass BEV3 während des WLTC-Zyklus etwa 68 % der Bremsenergie mit elektrischem Bremsen abdeckt. Die beiden anderen gemessenen BEVs nutzten die elektrische Bremsung in geringerem Umfang, etwa zu 50 %. Alle drei Fahrzeuge nutzten die elektrische Rekuperation während der ersten beiden WLTC-Teile (niedrigere Geschwindigkeiten) stärker und während der letzten beiden WLTC-Teile (höhere und höchste Geschwindigkeiten) weniger stark zum Bremsen. Der grösste Teil der mechanischen Bremsenergie fiel an der Vorderachse an (>25 % der gesamten Bremsenergie), während der geringste Teil an der Hinterachse anfiel (>5 %). Unterschiedliche Ladezustände (SoC) der Batterie zu Beginn des Zyklus sowie unterschiedliche Fahrmodi (vom Fahrzeugnutzer wählbar) hatten nur einen geringen Einfluss auf die Verteilung der Bremsenergie.

Die Emissionen von Bremspartikeln zeigten bei allen gemessenen Fahrzeugen ein sehr ähnliches Muster (sowohl bei den in dieser Studie untersuchten BEVs als auch bei einem weiteren Hybrid-Fahrzeug und einem nur mit Verbrennungsmotor angetriebenen (ICE) Fahrzeug vergleichbarer Abmessungen, die mit derselben Ausrüstung gemessen wurden). Bremspartikelemissionen treten bei bestimmten Ereignissen auf, die entweder mit

- Bremsvorgängen, oder mit
- höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten (>60 km/h) zusammenhängen, bei denen aerodynamische Kräfte die Bremspartikel von den Reibungspartnern ablösen.

Die Menge der Brems-PN-Emissionen hängt stark von der Vorgeschichte der Reibungspartner, früheren Bremsvorgängen und der Menge der auf ihnen abgelagerten Bremspartikel ab. Zuverlässige Messungen sind nach mindestens drei Wiederholungen einer Messung unter identischen Bedingungen möglich. Nach der dritten Wiederholung ist die Menge der Brems-PN-Emissionen stabil und reproduzierbar. Während der ersten drei Wiederholungen nehmen die Brems-PN-Emissionen im Allgemeinen ab. Dieser sogenannte „Einlauf-Effekt" wurde sowohl bei den beiden BEVs als auch beim Hybrid- und dem ICE-angetriebenen Fahrzeug beobachtet. Eines der gemessenen BEVs wies aussergewöhnlich hohe Brems-PN-Emissionen auf und zeigte sogar einen umgekehrten Einlauf-Effekt, da die PN-Emissionen mit jedem aufeinanderfolgenden WLTC-Zyklus, zwar

unregelmässig, aber letztendlich zunahmen. Die PN-Emissionen dieses Fahrzeugs erreichten ebenfalls nach der dritten Wiederholung konstante Werte. Alle in dieser Studie durchgeführten Messungen wurden für jede Variante fünffach wiederholt, die vorgestellten Ergebnisse sind jeweils aus den letzten drei Wiederholungen zusammengefasst.

BEV3, das stärker elektrisches Bremsen nutzt (~68 %), hatte auch die niedrigsten PN-Emissionen, weniger als die Hälfte im Vergleich zu BEV2. Die PM-Emissionen der beiden Fahrzeuge waren ähnlich. Dies zeigt, dass BEV2 mehr kleinere Partikel emittierte als BEV3. BEV3 hatte mehr als achtmal niedrigere PN-Emissionen im Vergleich zu den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICE1) und dem Hybrid-Fahrzeug. BEV1 wies jedoch ausserordentlich hohe PN-Emissionen auf, die etwa 23-mal höher waren als die von BEV3. Der Unterschied bei den PM war nicht so gross: BEV1 emittierte viermal mehr PM als BEV3 (was ebenfalls zeigt, dass BEV1 mehr kleine Partikel emittierte). Eine wichtige Schlussfolgerung ist, dass BEVs mit optimierten Bremsanordnung und Bremsvorgängen in der Lage sind, die Bremspartikelemissionen stark zu reduzieren.

Auf der Grundlage der am rechten Vorderrad durchgeführten Messungen wurden die Gesamtemissionsfaktoren (für das gesamte Fahrzeug) abgeschätzt. Die Ergebnisse zeigen:

- Die gesamten PN-Emissionsfaktoren der Bremsen der beiden BEVs mit niedrigen PN-Emissionen liegen in der Grössenordnung von 2E+10 [#/km] und sind damit etwas niedriger oder ähnlich wie die Verbrennungs-PN-Emissionen herkömmlicher Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die mit den neuesten Abgasnachbehandlungstechnologien ausgestattet sind.
- Die Gesamtbrems-PN der beiden BEVs mit niedrigen PN-Emissionen sind etwa fünfmal niedriger als die eines herkömmlichen, verbrennungsmotorangetriebenen und eines hybriden Fahrzeuges vergleichbarer Grösse.
- Das dritte gemessene BEV wies dagegen sehr hohe Brems-PN-Emissionen auf, die um eine Grössenordnung höher waren als die der beiden anderen gemessenen BEVs und doppelt so hoch wie die des verbrennungsmotorangetriebenen und des hybriden Fahrzeuges.
- Die Gesamtbrems-PM-Emissionsfaktoren der beiden emissionstiefen BEVs liegen in der Grössenordnung von 2.0 mg/km für Partikel kleiner als 12 µm und 1.4 mg/km für Partikel kleiner als 2.5 µm.
- Die Gesamtbrems-PM der beiden emissionstiefen BEVs sind etwa zweimal niedriger als die eines herkömmlichen Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor.
- Das dritte gemessene BEV wies dagegen hohe Brems-PM-Emissionen auf, die dreimal höher waren als die der beiden anderen gemessenen BEVs, aber etwas niedriger als diejenigen des verbrennungsmotorangetriebenen und des hybriden Fahrzeuges.

Die PN-Bremspartikelemissionen der gemessenen Fahrzeuge variierten nicht wesentlich, wenn der Zyklus mit unterschiedlichen Ladezuständen (SoC) der Fahrzeugbatterie gestartet wurde. Allerdings wurden bei Messungen mit voll aufgeladener Batterie am Zyklusstart etwas höhere Bremspartikelemissionen gemessen. Der niedrige Rekuperationsgrad im „Komfortmodus" für den Fahrzeugbetrieb (vom Fahrer wählbar) führte bei fast allen Messungen zu etwas höheren Brems-PN-Emissionen. Beide Ergebnisse sind angesichts einer leicht reduzierten elektrischen Bremsleistung plausibel.

PM-Bremspartikelemissionen sind tief, wobei die meisten Partikel zwischen 0.5 und 10 µm gross sind. Es wurden auch ultrafeine Partikel (unter 60 nm) festgestellt, insbesondere bei Messungen, die den Teil des WLTC mit der höchsten Geschwindigkeit umfassten. Der „Komfortmodus" mit geringer Rekuperation wies im Vergleich zum Normalmodus deutlich höhere PM-Emissionen in grösseren Grössenklassen auf. Dies deutet auf eine stärkere mechanische Bremswirkung bei niedrigeren Temperaturen der Reibungspartner hin.

5 Literaturverzeichnis

1. Meister, K.; Johansson, C.; Forsberg, B. Estimated Short-Term Effects of Coarse Particles on Daily Mortality in Stockholm, Sweden. *Environ Health Perspect* **2012**, *120*, 431–436, doi:10.1289/ehp.1103995.
2. Pope, C.A.; Dockery, D.W. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines That Connect. *J Air Waste Manage Assoc* **2006**, *56*, 709–742, doi:10.1080/10473289.2006.10464485.
3. Jiang, R.; Liu, Y.; Hu, D.; Zhu, L. Exhaust and Non-Exhaust Airborne Particles from Diesel and Electric Buses in Xi'an: A Comparative Analysis. *Chemosphere* **2022**, *306*, 135523, doi:10.1016/j.chemosphere.2022.135523.
4. Matthaios, V.N.; Lawrence, J.; Martins, M.A.G.; Ferguson, S.T.; Wolfson, J.M.; Harrison, R.M.; Koutrakis, P. Quantifying Factors Affecting Contributions of Roadway Exhaust and Non-Exhaust Emissions to Ambient PM10–2.5 and PM2.5–0.2 Particles. *Science of The Total Environment* **2022**, *835*, 155368, doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155368.
5. Thorpe, A.; Harrison, R.M. Sources and Properties of Non-Exhaust Particulate Matter from Road Traffic: A Review. *Science of The Total Environment* **2008**, *400*, 270–282, doi:10.1016/j.scitotenv.2008.06.007.
6. Bukowiecki, N.; Lienemann, P.; Hill, M.; Furger, M.; Richard, A.; Amato, F.; Prévôt, A.S.H.; Baltensperger, U.; Buchmann, B.; Gehrig, R. PM10 Emission Factors for Non-Exhaust Particles Generated by Road Traffic in an Urban Street Canyon and along a Freeway in Switzerland. *Atmos Environ* **2010**, *44*, 2330–2340, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.03.039.
7. Grigoratos, T.; Martini, G. Brake Wear Particle Emissions: A Review. *Environmental Science and Pollution Research* **2015**, *22*, 2491–2504, doi:10.1007/s11356-014-3696-8.
8. Harrison, R.M.; Jones, A.M.; Gietl, J.; Yin, J.; Green, D.C. Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements. *Environ Sci Technol* **2012**, *46*, 6523–6529, doi:10.1021/es300894r.
9. Lawrence, S.; Sokhi, R.; Ravindra, K.; Mao, H.; Prain, H.D.; Bull, I.D. Source Apportionment of Traffic Emissions of Particulate Matter Using Tunnel Measurements. *Atmos Environ* **2013**, *77*, 548–557, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.03.040.
10. Padoan, E.; Amato, F. *Vehicle Non-Exhaust Emissions: Impact on Air Quality. In Non-Exhaust Emissions*; Amato, F., Ed.; Ed.;Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2018;
11. Kumar, P.; Pirjola, L.; Ketzel, M.; Harrison, R.M. Nanoparticle Emissions from 11 Non-Vehicle Exhaust Sources – A Review. *Atmos Environ* **2013**, *67*, 252–277, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.11.011.
12. Liati, A.; Schreiber, D.; Lugovyy, D.; Gramstat, S.; Dimopoulos Eggenschwiler, P. Airborne Particulate Matter Emissions from Vehicle Brakes in Micro- and Nano-Scales: Morphology and Chemistry by Electron Microscopy. *Atmos Environ* **2019**, *212*, 281–289, doi:10.1016/j.atmosenv.2019.05.037.

13. Dimopoulos Eggenschwiler, P.; Schreiber, D.; Papetti, V.; Gramstat, S.; Lugovyy, D. Electron Microscopic Characterization of the Brake Assembly Components (Disc and Pads) from Passenger Vehicles. *Atmosphere (Basel)* **2022**, *13*, 523, doi:10.3390/atmos13040523.

14. Iijima, A.; Sato, K.; Yano, K.; Tago, H.; Kato, M.; Kimura, H.; Furuta, N. Particle Size and Composition Distribution Analysis of Automotive Brake Abrasion Dusts for the Evaluation of Antimony Sources of Airborne Particulate Matter. *Atmos Environ* **2007**, *41*, 4908–4919, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.02.005.

15. zum Hagen, F.H.F.; Mathissen, M.; Grabiec, T.; Hennicke, T.; Rettig, M.; Grochowicz, J.; Vogt, R.; Benter, T. Study of Brake Wear Particle Emissions: Impact of Braking and Cruising Conditions. *Environ Sci Technol* **2019**, *53*, 5143–5150, doi:10.1021/acs.est.8b07142.

16. Dall'Osto, M.; Querol, X.; Amato, F.; Karanasiou, A.; Lucarelli, F.; Nava, S.; Calzolai, G.; Chiari, M. Hourly Elemental Concentrations in PM2.5; Aerosols Sampled Simultaneously at Urban Background and Road Site during SAPUSS – Diurnal Variations and PMF Receptor Modelling. *Atmos Chem Phys* **2013**, *13*, 4375–4392, doi:10.5194/acp-13-4375-2013.

17. Gietl, J.K.; Lawrence, R.; Thorpe, A.J.; Harrison, R.M. Identification of Brake Wear Particles and Derivation of a Quantitative Tracer for Brake Dust at a Major Road. *Atmos Environ* **2010**, *44*, 141–146, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.10.016.

18. Johansson, C.; Norman, M.; Burman, L. Road Traffic Emission Factors for Heavy Metals. *Atmos Environ* **2009**, *43*, 4681–4688, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.10.024.

19. Sanders, P.G.; Xu, N.; Dalka, T.M.; Maricq, M.M. Airborne Brake Wear Debris: Size Distributions, Composition, and a Comparison of Dynamometer and Vehicle Tests. *Environ Sci Technol* **2003**, *37*, 4060–4069, doi:10.1021/es034145s.

20. Hinrichs, R.; Soares, M.R.F.; Lamb, R.G.; Soares, M.R.F.; Vasconcellos, M.A.Z. Phase Characterization of Debris Generated in Brake Pad Coefficient of Friction Tests. *Wear* **2011**, *270*, 515–519, doi:10.1016/j.wear.2011.01.004.

21. Dimopoulos Eggenschwiler, P.; Schreiber, D.; Habersatter, J. Brake Particle PN and PM Emissions of a Hybrid Light Duty Vehicle Measured on the Chassis Dynamometer. *Atmosphere (Basel)* **2023**, *14*, 784, doi:10.3390/atmos14050784.

22. Li, J.; Wang, C.; Chen, X.; Li, A.; Ge, Y.; Wang, Y. Characterization of Brake Wear Particle Emissions from Passenger Cars: A Case Study of Particle Agglomeration and Fragmentation. *Journal of Environmental Sciences* **2025**, *158*, 790–801, doi:10.1016/j.jes.2025.02.024.

23. Mathissen, M.; Grigoratos, T.; Lahde, T.; Vogt, R. Brake Wear Particle Emissions of a Passenger Car Measured on a Chassis Dynamometer. *Atmosphere (Basel)* **2019**, *10*, 556, doi:10.3390/atmos10090556.

24. Mamakos, A.; Arndt, M.; Hesse, D.; Augsburg, K. Physical Characterization of Brake-Wear Particles in a PM10 Dilution Tunnel. *Atmosphere (Basel)* **2019**, *10*, 639, doi:10.3390/atmos10110639.

25. Iijima, A.; Sato, K.; Yano, K.; Kato, M.; Kozawa, K.; Furuta, N. Emission Factor for Antimony in Brake Abrasion Dusts as One of the Major Atmospheric Antimony Sources. *Environ Sci Technol* **2008**, *42*, 2937–2942, doi:10.1021/es702137g.

26. Augsburg, K.; Hesse, D.; Feissel, T.; Wenzel, F. Real Driving Emissions Measurement of Brake Dust Particles. In; 2019; pp. 663–674.

27. Liu, Y.; Chen, H.; Yin, C.; Federici, M.; Perricone, G.; Li, Y.; Margaritis, D.; Shen, Y.; Guo, J.; Wei, T. PM10 Prediction for Brake Wear of Passenger Car during Different Test Driving Cycles. *Chemosphere* **2022**, *305*, 135481, doi:10.1016/j.chemosphere.2022.135481.

28. Hagino, H.; Oyama, M.; Sasaki, S. Laboratory Testing of Airborne Brake Wear Particle Emissions Using a Dynamometer System under Urban City Driving Cycles. *Atmos Environ* **2016**, *131*, 269–278, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.02.014.

29. Alemani, M.; Gialanella, S.; Straffelini, G.; Ciudin, R.; Olofsson, U.; Perricone, G.; Metinoz, I. Dry Sliding of a Low Steel Friction Material against Cast Iron at Different Loads: Characterization of the Friction Layer and Wear Debris. *Wear* **2017**, *376–377*, 1450–1459, doi:10.1016/j.wear.2017.01.040.

30. Mosleh, M.; Blau, P.J.; Dumitrescu, D. Characteristics and Morphology of Wear Particles from Laboratory Testing of Disk Brake Materials. *Wear* **2004**, *256*, 1128–1134, doi:10.1016/j.wear.2003.07.007.

31. Philippe, F.; Xiang, M.; Bressot, C.; Chen, Y.; Guingand, F.; Charles, P.; Loigerot, J.; Morgeneyer, M. Relevance of Pin-on-Disc and Inertia Dynamometer Bench Experiments for Braking Emission Studies. *J Phys Conf Ser* **2019**, *1323*, 012025, doi:10.1088/1742-6596/1323/1/012025.

32. Sinha, A.; Ischia, G.; Menapace, C.; Gialanella, S. Experimental Characterization Protocols for Wear Products from Disc Brake Materials. *Atmosphere (Basel)* **2020**, *11*, 1102, doi:10.3390/atmos11101102.

33. Beji, A.; Deboudt, K.; Khardi, S.; Muresan, B.; Flament, P.; Fourmentin, M.; Lumière, L. Non-Exhaust Particle Emissions under Various Driving Conditions: Implications for Sustainable Mobility. *Transp Res D Transp Environ* **2020**, *81*, 102290, doi:10.1016/j.trd.2020.102290.

34. Kwak, J.; Kim, H.; Lee, J.; Lee, S. Characterization of Non-Exhaust Coarse and Fine Particles from on-Road Driving and Laboratory Measurements. *Science of The Total Environment* **2013**, *458–460*, 273–282, doi:10.1016/j.scitotenv.2013.04.040.

35. Grigoratos, T.; Martini, G. Development of a Commonized Methodology for Measuring Brake Wear Particles – Current Status within the PMP IWG. In; 2017; pp. 627–627.

36. Mathissen, M.; Grochowicz, J.; Schmidt, C.; Vogt, R.; Farwick zum Hagen, F.H.; Grabiec, T.; Steven, H.; Grigoratos, T. A Novel Real-World Braking Cycle for Studying Brake Wear Particle Emissions. *Wear* **2018**, *414–415*, 219–226, doi:10.1016/j.wear.2018.07.020.

37. Grigoratos, T.; Agudelo, C.; Grochowicz, J.; Gramstat, S.; Robere, M.; Perricone, G.; Sin, A.; Paulus, A.; Zessinger, M.; Hortet, A.; et al. Statistical Assessment and Temperature Study from the Interlaboratory Application of the WLTP–Brake Cycle. *Atmosphere (Basel)* **2020**, *11*, 1309, doi:10.3390/atmos11121309.

38. Grigoratos, T.; Mamakos, A.; Arndt, M.; Lugovyy, D.; Anderson, R.; Hafenmayer, C.; Moisio, M.; Vanhanen, J.; Frazee, R.; Agudelo, C.; et al. Characterization of Particle Number Setups for Measuring Brake Particle Emissions and Comparison with Exhaust Setups. *Atmosphere (Basel)* **2023**, *14*, 103, doi:10.3390/atmos14010103.

39. Grigoratos, T.; Mathissen, M.; Vedula, R.; Mamakos, A.; Agudelo, C.; Gramstat, S.; Giechaskiel, B. Interlaboratory Study on Brake Particle Emissions—Part I: Particulate Matter Mass Emissions. *Atmosphere (Basel)* **2023**, *14*, 498, doi:10.3390/atmos14030498.

40. Mathissen, M.; Grigoratos, T.; Gramstat, S.; Mamakos, A.; Vedula, R.; Agudelo, C.; Grochowicz, J.; Giechaskiel, B. Interlaboratory Study on Brake Particle Emissions Part II: Particle Number Emissions. *Atmosphere (Basel)* **2023**, *14*, 424, doi:10.3390/atmos14030424.

41. ECE/TRANS/180/Add.24. UN Global Technical Regulation No. 24, Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles (s. Global Technical Regulations (GTRs) | UNECE).

42. Gramstat S. Chapter 10–Technological Measures for Brake Wear Emission Reduction: Possible Improvement in Compositions and Technological Remediation. In *Non-Exhaust Emissions*; Amato F., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2018; pp. 205–227.

43. Kupper, M.; Schubert, L.; Nachtnebel, M.; Schröttner, H.; Huber, M.P.; Fischer, P.; Bergmann, A. Measurement and Analysis of Brake and Tyre Particle Emissions from Automotive Series Components for High-Load Driving Tests on a Wheel and Suspension Test Bed. *Atmosphere (Basel)* **2024**, *15*, 430, doi:10.3390/atmos15040430.

44. Vishnoi, A.S.; Vansevenant, B.; Beji, A.; Goriaux, M.; Guiot, B.; Azizi, Y.; Messieux, M.; Tassel, P.; Serindat, S.; Quennet, N.; et al. On-Board Characterization of Brake-Wear Emissions from a Heavy-Duty Vehicle in Real-World Driving Conditions. *Atmos Environ X* **2025**, *28*, 100379, doi:10.1016/j.aeaoa.2025.100379.

45. Hagino, H. Brake Wear and Airborne Particle Mass Emissions from Passenger Car Brakes in Dynamometer Experiments Based on the Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure Brake Cycle. *Lubricants* **2024**, *12*, 206, doi:10.3390/lubricants12060206.

Anhang

Alle für diese Studie relevanten technischen Fahrzeugdaten sind in Tabelle 1 Abschnitt 2.3, zusammengefasst.

Im Abschnitt „Ergebnisse und Diskussion“ wurden hauptsächlich die Bremspartikelemissionen von BEV3 und einige Vergleiche mit den entsprechenden Emissionen von BEV1 und BEV2 vorgestellt. In diesem Anhang werden die entsprechenden Ergebnisse von BEV1 und BEV2 aufgezeigt.

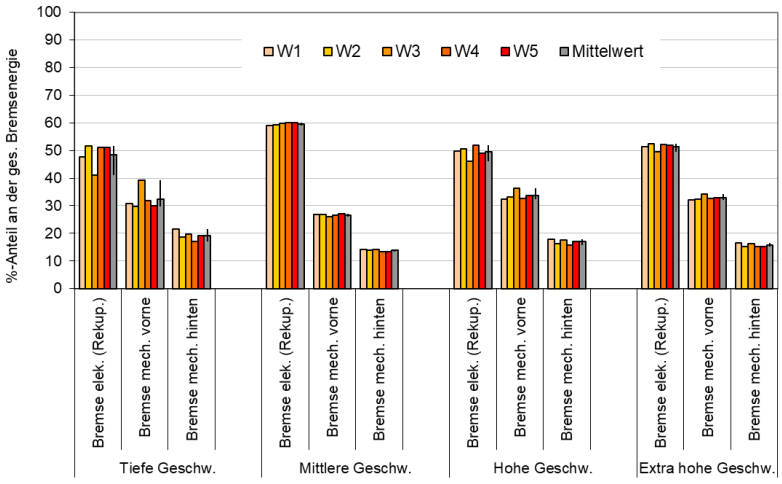

Abbildung A1: Vergleich der Bremsenergieverteilung auf elektrisches und mechanisches Bremsen (Vorder- und Hinterachse) von BEV1 im Normalbetrieb und bei 100 % SoC zu Beginn des Testzyklus (5 Wiederholungen W1-W5 unter identischen Startbedingungen). Abbildung 6 zeigt die entsprechenden Ergebnisse von BEV3.

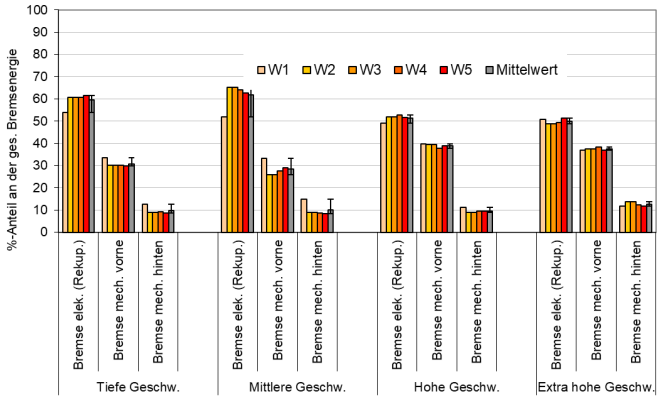

Abbildung A2: Vergleich der Bremsenergieverteilung auf elektrisches und mechanisches Bremsen (Vorder- und Hinterachse) von BEV2 im Normalbetrieb und bei 100 % SoC zu Beginn des Testzyklus (5

Wiederholungen W1-W5 unter identischen Startbedingungen). Abbildung 6 zeigt die entsprechenden Ergebnisse von BEV3.

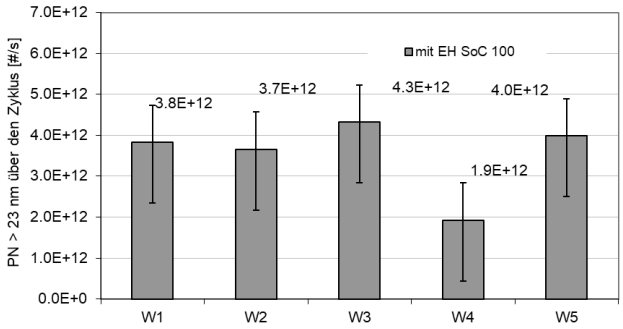

Abbildung A3: Gesamt-PN-Emissionen von BEV1 bei 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen des WLTC-Zyklus (Normalbetrieb mit 100 % SoC der Batterie zu Beginn des Zyklus). Abbildung 10 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für BEV3. Zu beachten ist, dass die Skalierung der y-Achse im Vergleich zur Abbildung 10 und A4 unterschiedlich ist.

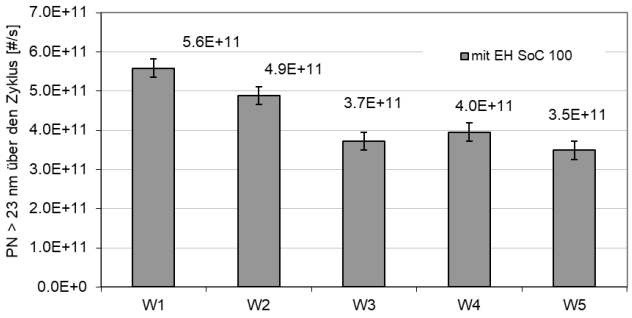

Abbildung A4: Gesamt-PN-Emissionen von BEV2 bei 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen des WLTC-Zyklus (Normalbetrieb mit 100 % SoC der Batterie zu Beginn des Zyklus). Abbildung 10 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für BEV3.

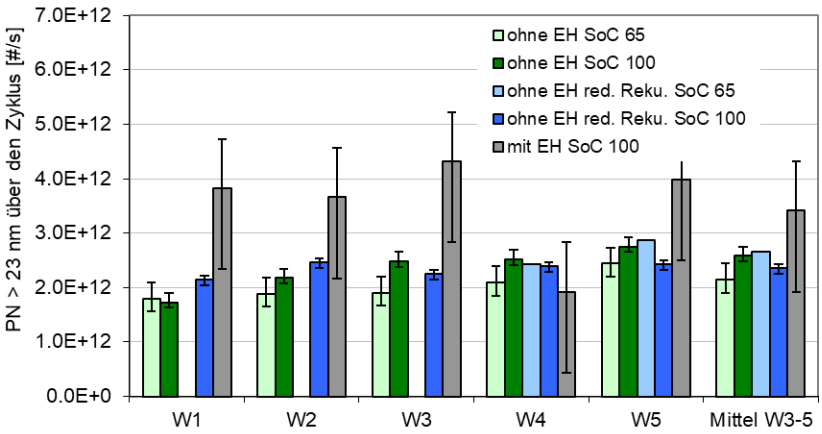

Abbildung A5: PN-Emissionen von BEV1 bei 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen des WLTC-Zyklus, beginnend mit unterschiedlichem Ladezustand (SoC) der Batterie, in zwei verschiedenen Betriebsmodi (normal, nicht gekennzeichnet, und reduzierte Rekuperation) sowie ohne oder mit dem Teil des WLTC-Zyklus mit extra hohen Geschwindigkeiten (EH). Abbildung 11 zeigt die entsprechenden Ergebnisse von BEV3. Zu beachten ist, dass die Skalierung der y-Achse im Vergleich zu Abbildungen 11 und A6 unterschiedlich ist.

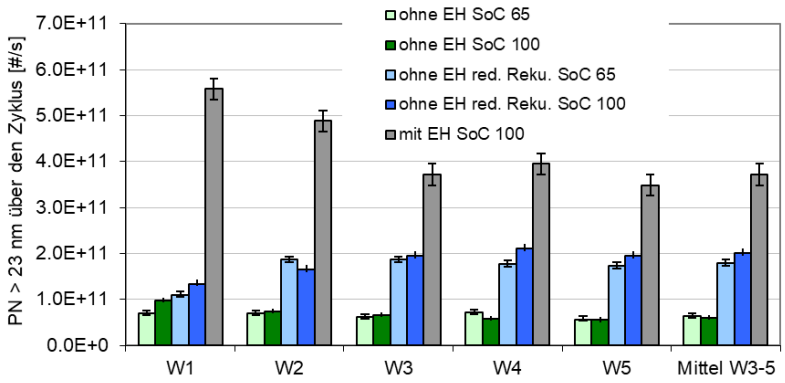

Abbildung A6: PN-Emissionen von BEV2 bei 5 aufeinanderfolgenden Wiederholungen des WLTC-Zyklus, beginnend mit unterschiedlichem Ladezustand (SoC) der Batterie, in zwei verschiedenen Betriebsmodi (normal, nicht gekennzeichnet, und reduzierte Rekuperation) sowie ohne oder mit dem Teil des WLTC-Zyklus mit extra hohen Geschwindigkeiten (EH). Abbildung 11 zeigt die entsprechenden Ergebnisse von BEV3.

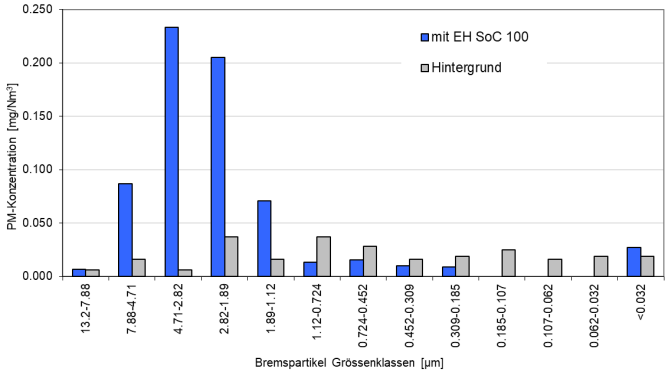

Abbildung A7: PM-Konzentrationen von BEV1 über den WLTC-Zyklus (mit extra hohen Geschwindigkeiten, EH). Abbildung 12 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für BEV3.

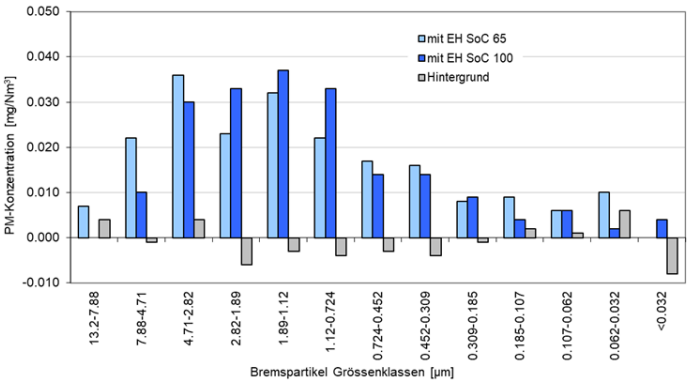

Abbildung A8: PM-Konzentrationen von BEV2 über den WLTC-Zyklus (mit extra hohen Geschwindigkeiten, EH) und beginnend mit zwei unterschiedlichen Ladezuständen (SoCs) der Batterie. Abbildung 12 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für BEV3.

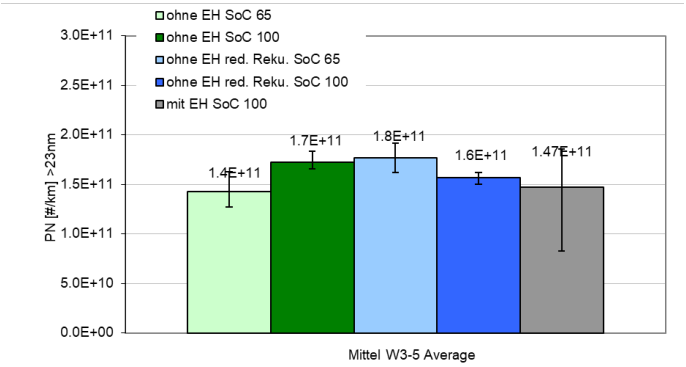

Abbildung A9: Durchschnittliche PN-Emissionen in [#/km] von BEV1, Beginn der Zyklen mit unterschiedlichem Ladezustand (SoC) der Batterie, in zwei verschiedenen Betriebsmodi (normal, nicht gekennzeichnet, und reduzierte Rekuperation) sowie ohne oder mit dem Teil des WLTC-Zyklus mit besonders hohen Geschwindigkeiten (EH), gemäss den Messungen an einer vorderen Scheibenbremse (für jeden Balken wurden 5 WLTC-Wiederholungen gemessen, der Durchschnitt wurde aus den letzten 3 Wiederholungen gebildet, Toleranzbalken entsprechen dem minimalen und maximalen gemessenen Wert). Abbildung 14 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für BEV3.

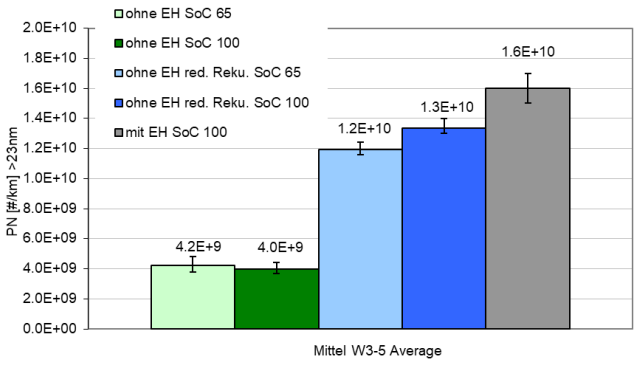

Abbildung A10: Durchschnittliche PN-Emissionen in [#/km] von BEV2, Beginn der Zyklen mit unterschiedlichem Ladezustand (SoC) der Batterie, in zwei verschiedenen Betriebsmodi (normal, nicht gekennzeichnet, und reduzierte Rekuperation) sowie ohne oder mit dem Teil des WLTC-Zyklus mit besonders hohen Geschwindigkeiten (EH), gemäss den Messungen an einer vorderen Scheibenbremse (für jeden Balken wurden 5 WLTC-Wiederholungen gemessen, der Durchschnitt wurde aus den letzten 3 Wiederholungen gebildet, Toleranzbalken entsprechen dem minimalen und maximalen gemessenen Wert). Abbildung 14 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für BEV3.

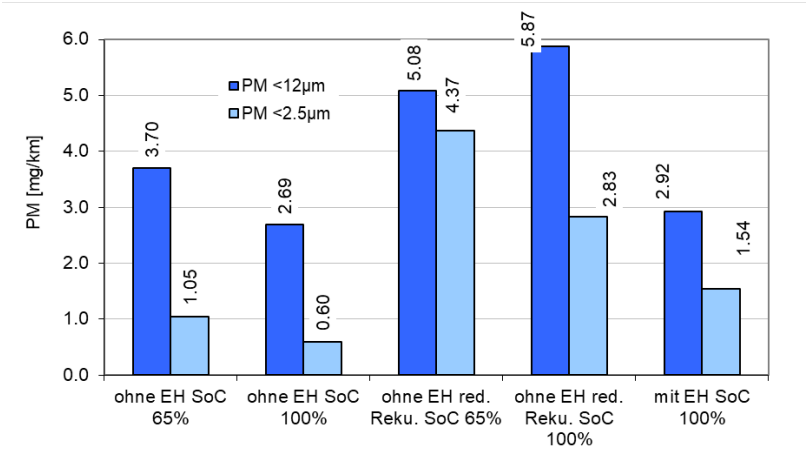

Abbildung A11: Durchschnittliche Brems-PM-Emissionen in [mg/km] von BEV1, Beginn der Zyklen mit unterschiedlichem Ladezustand (SoC) der Batterie, in zwei verschiedenen Betriebsmodi (normal, nicht gekennzeichnet, und reduzierte Rekuperation) sowie ohne oder mit dem Teil des WLTC-Zyklus mit besonders hohen Geschwindigkeiten (EH), gemäss den Messungen an der rechten, vorderen Scheibenbremse (für jeden Balken wurden PM aus 3 WLTC-Wiederholungen auf den Filtern integriert, so dass lediglich ein Durchschnittwert ausgewertet werden kann). Abbildung 16 zeigt die entsprechenden Ergebnisse von BEV3.

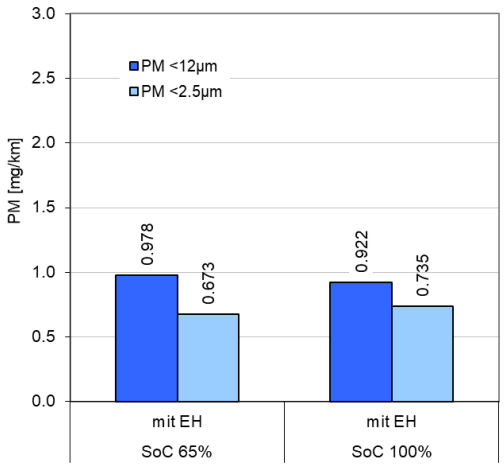

Abbildung A12: Durchschnittliche Brems-PM-Emissionen in [mg/km] von BEV2, Beginn der Zyklen mit unterschiedlichem Ladezustand (SoC) der Batterie, jeweils mit dem Teil des WLTC-Zyklus mit besonders hohen

Geschwindigkeiten (EH), gemäss den Messungen an der rechten, vorderen Scheibenbremse (für jeden Balken wurden PM aus 3 WLTC-Wiederholungen auf den Filtern integriert, so dass lediglich ein Durchschnittswert ausgewertet werden kann). Abbildung 16 zeigt die entsprechenden Ergebnisse von BEV3.