

TEXTE

137/2025

Abschlussbericht

Reifen- und Bremsenabrieb bei leichten Straßenfahrzeugen

Ergebnisbericht eines Projektes zur Unterstützung des Regulierungsprozesses für Partikelemissionen und Feinstaub aus Reifen- und Bremsenabrieb von PKW

von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bachmann, M.Sc. Felix Feist
Fachgebiet Fahrzeugtechnik, TU Ilmenau

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 137/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare
Sicherheit

Forschungskennzahl 3720 57 102 0
FB001828

Abschlussbericht

Reifen- und Bremsenabrieb bei leichten Straßenfahrzeugen

Ergebnisbericht eines Projektes zur Unterstützung des
Regulierungsprozesses für Partikelemissionen und
Feinstaub aus Reifen- und Bremsenabrieb von PKW

von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bachmann, M.Sc. Felix Feist
Fachgebiet Fahrzeugtechnik, TU Ilmenau

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Ilmenau
Ehrenbergstraße 15
98693 Ilmenau

Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bachmann, M.Sc. Felix Feist
unter Mitwirkung von M.Sc. Lukas Storch, Dr.-Ing. David Hesse, Dr.-Ing. Toni Feißel,
B.Sc. Tobias Hegewald, M.Sc. Jürgen Braun, M.Sc. Alexander Hentschel,
M.Sc. Matti Wenke

Abschlussdatum:

Juli 2025

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Dr. Philipp Eichler

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7941>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Reifen- und Bremsenabrieb bei Straßenfahrzeugen

Das Forschungsvorhaben begleitete und unterstützte den Regulierungsprozess für Feinstaub aus Reifen- und Bremsenabrieb von PKW.

Hierzu wurde zunächst der mögliche gesetzliche Rahmen für die potenzielle Regulierung von Bremsen- und Reifenabrieb analysiert. Dabei lag der Fokus auf der Bewertung der Implementierungsmöglichkeiten eines Grenzwertes für diese Emissionen. In internationalen Gremien wurden in einem zeitlich parallel-laufenden Prozess Methoden entwickelt, welche die Bestimmung dieser Emissionen ermöglichen. Um die vorgestellten Methoden zu validieren und mögliche Verbesserungsvorschläge für die Methoden abzuleiten, wurden hierfür geeignete Messkampagnen konzipiert, geplant, durchgeführt und ausgewertet. Diese Methoden hatten die Reproduzierbarkeit der Emissionsmessungen unter repräsentativen Bedingungen zu gewährleisten und ermöglichten somit eine realitätsnahe Betrachtung.

Zusätzlich wurden zwei Fachgespräche auf nationaler Ebene organisiert – eines für Reifenabrieb und eines für Bremsenabrieb. Diese dienten als Plattform für einen interdisziplinären Diskurs zwischen Ministerien, Behörden, Verbänden sowie der Industrie und Wissenschaft.

Ziel war es, eine qualifizierte Analyse und Bewertung der Regulierung des Abriebs aus Reifen und Bremsen abzuleiten.

Abstract: Tire and brake wear for road vehicles

The research project was intended to support the regulatory process of tire and brake wear for passenger cars.

To this end, the possible legal framework for the potential regulation of brake and tire abrasion was analysed. The focus here was on evaluating the implementation options for a limit value for these emissions. Within a contemporaneous process methods have been developed in international committees that enable to determine these emissions. In order to validate the methods presented and derive possible suggestions for improving the methods, suitable measurement campaigns have been designed, planned, carried out and evaluated. This ensured the reproducibility of the emission measurements under representative conditions and thus enabled a realistic assessment.

In addition, two expert meetings have been organized on nation-wide level - one for tire abrasion and one for brake abrasion. These served as a platform for an interdisciplinary discourse between ministries, authorities, associations, industry and science.

The aim was to derive a comprehensive position on the regulation of abrasion from tires and brakes.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildungsverzeichnis..... | 9 |
| Tabellenverzeichnis | 11 |
| Abkürzungsverzeichnis | 12 |
| Zusammenfassung..... | 13 |
| Summary | 21 |
| 1 Aufgabenstellung..... | 29 |
| 2 Analyse des Regulierungsrahmens für die Beschränkung von Reifen- und Bremsenabrieb | 30 |
| 2.1 Internationale Richtlinien zur Regulierung von Fahrzeugen der UN | 31 |
| 2.1.1 Ziele des WP.29..... | 33 |
| 2.1.2 Organisation der WP.29..... | 33 |
| 2.1.3 Regulierungsprozess und Dokumentation..... | 34 |
| 2.2 Regulierung von Fahrzeugen in der EU | 34 |
| 2.3 EU-Reifenlabel..... | 36 |
| 2.4 Voraussichtlicher Regulierungsrahmen für die Beschränkung von Reifen- und Bremsenabrieb..... | 37 |
| 2.5 Analyse und Bewertung des Regulierungsrahmens und Ausblick | 38 |
| 3 Reifenabrieb | 40 |
| 3.1 Aktivitäten der UNECE GRBP/GRPE TFTA | 40 |
| 3.2 Analyse des Entwurfs der Methode zur Bestimmung von Reifenabrieb der UNECE GRPE/GRBP TFTA | 41 |
| 3.2.1 Abriebratenbestimmung im realen Straßenverkehr | 41 |
| 3.2.1.1 Allgemeine Vorgaben | 42 |
| 3.2.1.2 Messgeräte und Instrumentierung..... | 42 |
| 3.2.1.3 Prüfzyklus..... | 46 |
| 3.2.1.4 Prüfbericht | 47 |
| 3.2.1.5 Datenverarbeitung..... | 48 |
| 3.2.1.6 Zusammenfassung und kritische Punkte | 49 |
| 3.2.2 Verschleißbestimmung in einer Prüfstandsumgebung..... | 50 |
| 3.2.2.1 Allgemeine Vorgaben | 50 |
| 3.2.2.2 Messgeräte und Instrumentierung..... | 51 |
| 3.2.2.3 Prüfzyklus und Prüfablauf..... | 51 |
| 3.2.2.4 Prüfbericht | 52 |
| 3.2.2.5 Datenverarbeitung..... | 52 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.2.2.6 | Zusammenfassung und kritische Punkte | 53 |
| 3.3 | Durchführung von Messungen als Beitrag zur Entwicklung oder Validierung einer Methode zur Bestimmung von Reifenabrieb..... | 54 |
| 3.3.1 | Zielstellungen | 54 |
| 3.3.2 | Prüfmethode..... | 55 |
| 3.3.3 | Prüfumgebung und Messtechnik..... | 56 |
| 3.3.3.1 | Allgemeine Anforderungen und Randbedingungen | 56 |
| 3.3.3.2 | Messtechnik..... | 56 |
| 3.3.3.3 | Prüfumgebung | 58 |
| 3.3.4 | Versuchsfahrzeug und Versuchsreifen | 63 |
| 3.3.4.1 | Versuchsfahrzeug | 63 |
| 3.3.4.2 | Versuchsreifen | 63 |
| 3.3.5 | Messergebnisse | 65 |
| 3.3.5.1 | Auswertung der Einzelergebnisse der Prüflinge..... | 65 |
| 3.3.5.2 | Vergleich der Prüfzyklen..... | 70 |
| 3.3.5.3 | Vergleich der Prüflinge | 72 |
| 3.3.6 | Entwicklung der AR im Verlauf von RDE-Messungen | 72 |
| 3.3.7 | Zusammenfassung und Einordnung der Messergebnisse | 73 |
| 4 | Bremsenabrieb | 76 |
| 4.1 | Aktivitäten der UNECE GRPE PMP IWG | 76 |
| 4.2 | Analyse des aktuellen Entwurfs der UN-GTR der UNECE GRPE PMP IWG | 77 |
| 4.2.1 | Eignung der Methode zur Grenzwertimplementierung | 77 |
| 4.2.2 | Übertragbarkeit der Methode auf weitere Fahrzeugflotten, bzw. Flottenbestandteile..... | 85 |
| 4.2.2.1 | Schwere Nutzfahrzeuge | 85 |
| 4.2.2.2 | Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten und regenerativen Bremssystemen . | 85 |
| 4.2.3 | Überführung der Methode auf Messungen im realen Fahrbetrieb | 86 |
| 4.2.4 | Abschätzung des zeitlichen Horizonts bezüglich der Einführung und Umsetzung..... | 88 |
| 4.2.5 | Eignung der Methode zur gezielten Reduzierung von Partikelanzahl, Partikelmasse und einzelner Schadstoffklassen..... | 88 |
| 4.2.6 | Quantifizierung der Minderungspotenziale im Rahmen der Methode | 89 |
| 4.2.7 | Zusammenfassung von Schwachstellen und Verbesserungsvorschlägen im Rahmen der UN-GTR..... | 90 |
| 4.3 | Durchführung von Messungen als Beitrag zur Entwicklung oder Validierung einer Methode zur Bestimmung von Reifenabrieb..... | 92 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.3.1 | Prüfumgebung und Messtechnik..... | 92 |
| 4.3.1.1 | Messsysteme PMP ILS TF3 an der TU Ilmenau | 93 |
| 4.3.1.2 | Messsysteme Marktvergleich | 94 |
| 4.3.2 | Fahrzeuge und Bremssysteme..... | 95 |
| 4.3.2.1 | Simulierte Fahrzeuge und Prüflinge PMP ILS TF3 an der TU Ilmenau | 95 |
| 4.3.2.2 | Simulierte Fahrzeuge und Prüflinge Marktvergleich | 95 |
| 4.3.3 | Messergebnisse | 97 |
| 4.3.3.1 | Ergebnisse PMP ILS TF3 | 97 |
| 4.3.3.2 | Ergebnisse Marktvergleich | 112 |
| 4.3.4 | Zusammenfassung und Einordnung der Messergebnisse | 126 |
| 5 | Organisation und Durchführung von Fachgesprächen sowie Beratung des UBA..... | 128 |
| 5.1 | Fachgespräche und Projektbesprechungen..... | 128 |
| 5.1.1 | Fachgespräche | 128 |
| 5.1.2 | Projektbesprechungen..... | 130 |
| 5.2 | Beratung von UBA/BMUV im Rahmen der Erarbeitung einer deutschen Position im Rahmen der weiteren Arbeiten im Verfahren der Methodenentwicklung..... | 131 |
| 6 | Quellenverzeichnis | 132 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 1: | Emittierte luftgängige Partikelmasse in Abhängigkeit von der Entstehung..... | 31 |
| Abbildung 2: | Das aktuelle EU-Reifenlabel | 36 |
| Abbildung 3: | Zielkonflikte und Bewertungskriterien in der Reifenentwicklung - „Zielspinne“ | 39 |
| Abbildung 4: | Prüfmethode für Reifenverschleiß der TU Ilmenau | 56 |
| Abbildung 5: | Sartorius Massekomparator Cubis® MCM40K3 | 57 |
| Abbildung 6: | Prüfzyklus RDE - Streckenverlauf..... | 59 |
| Abbildung 7: | Prüfzyklus Urban - Streckenverlauf | 60 |
| Abbildung 8: | Prüfzyklus Landstraße - Streckenverlauf | 60 |
| Abbildung 9: | Prüfzyklus Autobahn - Streckenverlauf | 61 |
| Abbildung 10: | Prüfzyklus Track - Streckenverlauf | 62 |
| Abbildung 11: | AR des Referenzreifens..... | 66 |
| Abbildung 12: | AR des Prüfreifens 1 | 67 |
| Abbildung 13: | AR des Prüfreifens 2 | 68 |
| Abbildung 14: | AR des Prüfreifens 3 | 69 |
| Abbildung 15: | AR des Prüfreifens 4 | 69 |
| Abbildung 16: | AR der Prüfzyklen | 70 |
| Abbildung 17: | AR der Prüfreifen | 72 |
| Abbildung 18: | Verlauf der AR im RDE-Prüfzyklus | 73 |
| Abbildung 19: | Vergleich der Ergebnisse mit der Vergleichsstudie | 74 |
| Abbildung 20: | Prüfverfahren WLTP-Bremsenzyklus..... | 78 |
| Abbildung 21: | Hintergrundkonzentrationswerte über den WLTP-Bremsenzyklus..... | 80 |
| Abbildung 22: | PM Probenahmesystem | 81 |
| Abbildung 23: | PN Probenahmesystem | 82 |
| Abbildung 24: | Konstantvolumenprobenahmesystem..... | 92 |
| Abbildung 25: | Temperaturverlauf Ford Focus NAO [Br1b] | 97 |
| Abbildung 26: | Emissionsergebnisse Partikelanzahl - Ford Focus ECE (Br1a)... | 99 |
| Abbildung 27: | Emissionsergebnisse Partikelmasse - Ford Focus ECE (Br1a)... | 99 |
| Abbildung 28: | Emissionsergebnisse Partikelanzahl – Ford Focus NAO (Br1b) | 100 |
| Abbildung 29: | Emissionsergebnisse Partikelmasse – Ford Focus NAO (Br1b) | 100 |
| Abbildung 30: | Emissionsergebnisse Partikelanzahl – Audi S4 (Br2) | 101 |
| Abbildung 31: | Emissionsergebnisse Partikelmasse – Audi S4 (Br2) | 101 |
| Abbildung 32: | Sekundärpartikelemission im WLTP Brake Cycle Sec. 10 Zyklusverlauf – Audi S4 (Br2)..... | 102 |
| Abbildung 33: | Emissionsergebnisse Partikelanzahl – Opel Corsa (Br4)..... | 103 |
| Abbildung 34: | Emissionsergebnisse Partikelmasse – Opel Corsa (Br4) | 103 |
| Abbildung 35: | Vergleich der Partikelanzahl der Bremsen im Hauptemissionstest | 104 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Abbildung 36: | Vergleich der Partikelmasse der Bremsen im Hauptemissionstest | 104 |
| Abbildung 37: | PN Emissionsfaktoren der Ford Focus und Audi S4 Bremsen im Laborvergleich | 105 |
| Abbildung 38: | Max. Partikelanzahlkonzentration am CPC bzw. verdünnungskorrigiert im Kanal | 106 |
| Abbildung 39: | Maximal gemessene und zertifizierte Partikelanzahlkonzentrationen der verwendeten CPC | 106 |
| Abbildung 40: | Emissionsverlauf in Abhängigkeit vom Evakuierungsvolumenstrom | 107 |
| Abbildung 41: | Einhaltung der Luftfeuchtigkeit im Laborvergleich | 108 |
| Abbildung 42: | Streuung der PM-Emissionsfaktoren über alle Bremsen und Labore | 109 |
| Abbildung 43: | PM-Emissionsfaktoren Br1a und zugehörige Verhältnisfaktoren | 110 |
| Abbildung 44: | Ergebnis der Datenfilterung am Beispiel PM10 – Br1a | 111 |
| Abbildung 45: | Übersicht der „Cooling Test“ Temperaturentwicklung | 113 |
| Abbildung 46: | Emissionsfaktoren Vergleich der Bremsbelagqualitäten | 114 |
| Abbildung 47: | Verschleißfaktoren Vergleich der Bremsbelagqualitäten | 115 |
| Abbildung 48: | Temperaturen Vergleich der Bremsbelagqualitäten | 115 |
| Abbildung 49: | Angenommenes Rekuperationskennfeld des VW Golf GTE für den WLTP Brake Cycle | 116 |
| Abbildung 50: | Emissionsfaktoren Vergleich bezüglich Rekuperation | 117 |
| Abbildung 51: | Emissionsfaktoren Vergleich zwischen Vorder- und Hinterachse | 118 |
| Abbildung 52: | Verschleißfaktoren Vergleich zwischen Vorder- und Hinterachse | 119 |
| Abbildung 53: | Emissionsfaktoren Vergleich auf Grundlage der Fahrzeugdimension | 119 |
| Abbildung 54: | Temperaturen Vergleich auf Grundlage der Fahrzeugdimension | 120 |
| Abbildung 55: | Verschleißfaktoren Vergleich auf Grundlage der Fahrzeugdimension | 121 |
| Abbildung 56: | Verschleißfaktoren Vergleich Minderungspotenzial alternativer Reibpaarungen | 122 |
| Abbildung 57: | Emissionsfaktoren Vergleich Minderungspotenzial alternativer Reibpaarungen | 122 |
| Abbildung 58: | Emissionsfaktoren Vergleich Bremssysteme | 124 |
| Abbildung 59: | Verschleißfaktoren Vergleich Bremssysteme | 125 |
| Abbildung 60: | Übersicht der PN- & PM-Emissionsfaktoren aller untersuchten Bremsen | 125 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 1: | Vorgaben für einzustellende Radstellungsgrößen | 45 |
| Tabelle 2: | Vorgaben für einzustellende Fahrzeugmassen und Radlasten | 45 |
| Tabelle 3: | Sartorius Massekomparator Cubis® MCM40K3 – Technische Daten | 57 |
| Tabelle 4: | Prüfdistanzen je Prüfzyklus | 58 |
| Tabelle 5: | Prüfzyklus RDE | 59 |
| Tabelle 6: | Prüfzyklus Urban..... | 60 |
| Tabelle 7: | Prüfzyklus Landstraße..... | 61 |
| Tabelle 8: | Prüfzyklus Autobahn..... | 61 |
| Tabelle 9: | Prüfzyklus Track..... | 62 |
| Tabelle 10: | Radlasten und Gesamtmasse Versuchsfahrzeug..... | 63 |
| Tabelle 11: | Auswahl der Testreifen..... | 64 |
| Tabelle 12: | Einstellung der Kühlluftzufuhr Anhand von Trip #10 (Storch et al., 2023) | 79 |
| Tabelle 13: | Übersicht der untersuchten Bremssysteme - PMP ILS..... | 95 |
| Tabelle 14: | Übersicht der untersuchten Bremssysteme - Marktvergleich . | 96 |
| Tabelle 15: | Randbedingungen und Vorgaben bezüglich der Cooling Tests | 112 |
| Tabelle 16: | Nationales Fachgespräch zu Reifenemissionen | 128 |
| Tabelle 17: | Nationales Fachgespräch zu Bremsenemissionen | 129 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------------|---|
| ADAC | Allgemeiner Deutsche Automobil-Club e.V. |
| AR | Abriebrate |
| ARI | Abriebratenindex (in Literatur auch: Abrasionsratenindex) |
| BMUV | Bundesministerium für Umwelt, Verbraucherschutz und nukleare Sicherheit |
| bzw. | beziehungsweise |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. |
| ECE | Economic Commission for Europe hier: nach ECE R90 konformer Bremsbelag |
| ETRTO | European Tyre and Rim Technical Organisation |
| EU | Europäische Union |
| ggü. | gegenüber |
| GRBP | Working Party on Noise and Tyres |
| GRPE | Working Party on Pollution and Energy |
| GTR | Global Technical Regulation |
| ILS | Internationale Laborstudie (engl.: International Laboratory Study) |
| IWG | Informal Working Group |
| NAO | nicht-asbesthaltig organisch (engl.: Non-Asbestos Organic) |
| NEE | antriebsferne Emissionen (engl.: Non-Exhaust Emissions) |
| PM | Partikelmasse (engl.: particulate matter) |
| PMP | Particle Measurement Programme |
| PN | Partikelanzahl (engl.: particle number) |
| PR-x | Prüfreifen Nr. x |
| ISC | In-Service Conformity |
| RDE | Realfahremissionen (engl.: Real Driving Emissions) |
| RR | Referenzreifen |
| TF | Task Force |
| TFTA | Task Force on Tyre Abrasion |
| u.a. | unter anderem |
| UBA | Umweltbundesamt |
| UN | Vereinte Nationen (engl.: United Nations) |
| UN-GTR | United Nations Global Technical Regulation |
| UNECE | United Nations Economic Commission for Europe |
| UNECE R.x | UNECE Regelung Nr. x |
| wdk | Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e.V. |
| WLTP | Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure |
| WLTP Brake | Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure for Brakes |
| z.B. | zum Beispiel |

Zusammenfassung

Die Verbesserung der Luftqualität hat eine übergeordnete Bedeutung sowohl im globalen Maßstab als auch im Speziellen für Europa. Die Europäische Kommission hat sie zu einem der Ziele des europäischen „Green Deals“ erklärt, der den Übergang zu einer modernen, ressourcen-effizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft schaffen will, die bis 2050 keine Netto-Treibhausgase mehr ausstößt, ihr Wachstum von der Ressourcennutzung abkoppelt, und niemanden, weder Mensch noch Region, im Stich lässt.

Die Luftqualität negativ beeinflussende Partikelemissionen aus dem Straßenverkehr haben hauptsächlich zwei Ursachen: Rückstände im Abgas aus der Verbrennung von Kraftstoff und Abrieb von Fahrzeugkomponenten und Verschleißteilen wie Bremsen und Reifen sowie der Fahrbahnoberfläche in Verbindung mit der Aufwirbelung von Straßenstaub. Die Partikel-Emissionen aus letztgenannten Quellen werden als Nicht-Abgas-Emissionen (engl.: Non-Exhaust Emissions, NEE) bezeichnet.

Während die Grenzwerte für Partikel-Emissionen aus dem Abgas von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (vgl. Euro 6d aus 2020) zunehmend verschärft wurden und in der Folge stark zurückgingen, waren Partikel-Emissionen aus Abrieben bislang nicht reguliert. Als Folge hat sich daher der prozentuale Anteil der Nicht-Abgas-Emissionen in den vergangenen Jahren vergrößert. Der Abrieb von Brems Scheiben und Bremsbelägen gilt als eine der Hauptquellen für Partikel in der Größenordnung von PM_{2,5}. Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung werden diese Partikel als tendenziell gesundheitsgefährdend eingeschätzt. Nimmt man Abrieb von Reifen und Straße mit hinzu, verursachen Bremsen und Reifen bis zu 60 % der gesamten Verkehrs-bezogenen Partikel-Emissionen (PM_{2,5} und PM₁₀) bei weiter steigender Tendenz (Verordnung (EU), 2023/851, 2023; OECD, 2020).

Im September 2021 wurden die WHO Richtlinien zur globalen Luftqualität für die Luft-Schadstoffe Partikel (PM_{2,5} and PM₁₀), Ozon, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und Kohlenmonoxid (2021) aktualisiert. Gesundheitsrisiken treten laut WHO bereits bei deutlich geringeren Konzentrationen von Luftverschmutzung auf als bisher angenommen. Die neuen Grenzwerte der WHO Richtlinien liegen demnach deutlich niedriger als die geltenden nationalen und europäischen Grenzwerte.

Die OECD hat dieses Thema in ihrer Publikation "Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport - An Ignored Environmental Policy Challenge" (2020) adressiert. Der Fokus muss demnach auf einer drastischen Reduktion der Partikel-Emissionen aus Bremse und Reifen liegen.

Regulierungsrahmen für Brems- und Reifenpartikelemissionen

Zum Ende des Jahres 2022 hat die Europäische Kommission einen Vorschlag für eine Euro 7 Regulierung vorgelegt, mit der erstmals Grenzwerte für zukünftige Bremspartikel-Emissionen eingeführt werden: Der Regulierungsvorschlag sieht eine Begrenzung von Bremsstaub auf 7 mg/km für Pkw- und leichte Nutzfahrzeuge (mit Ausnahme von schweren leichten Nutzfahrzeugen – N1 III) ab 2025 und 3 mg/km ab 2035 vor. Begleitend wurde die "Global Technical Regulation" UN-GTR No. 24 veröffentlicht, die die Messung von Bremsabrieb-Partikeln in Masse und Anzahl beschreibt. Diese Regulierung bezieht sich Komponentenprüfungen an Bremsenprüfständen im Labor, die den neu definierten Fahrzyklus "WLTP-Brake" nutzen. Die Messmethode zielt auf die repräsentative Messung von Fahrzeugbremsen mit gegenwärtigen Emissionsniveaus und Bremsprozessen, in denen die Bremsenergie durch Reibungsbremsen in Wärme und Abrieb umgewandelt wird.

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge haben grundsätzlich das Potenzial, die Betätigung der Reibungsbremsen durch die Möglichkeit der regenerativen Bremsung durch Rekuperation zu reduzieren. Allerdings erzeugen Batterie-elektrische Fahrzeuge (engl. Battery Electric Vehicles, BEV) nicht notwendigerweise weniger Partikel-Emissionen. Durch das wegen des schweren Energiespeichers (Batterie) erhöhte Fahrzeuggewicht können im direkten Vergleich mitunter sogar Partikelanzahl und Partikelmasse physikalisch bedingt ansteigen, was allerdings zumeist durch Rekuperation überkompensiert wird.

Auch Reifenpartikelemissionen treten gleichermaßen bzw. aufgrund des steigenden Fahrzeuggewichtes auch verstärkt bei Fahrzeugen mit elektrischen oder alternativen Antriebskonzepten auf. Die Reifenpartikelemissionen tragen zur Verschlechterung der Luftqualität und der Kontamination von Böden und Gewässern bei und stehen im Verdacht negative Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen sowie die Umwelt zu haben. Zudem entstehen insbesondere durch den Reifenabrieb nachhaltige und durch Transportprozesse verlagerte Umweltbelastungen.

Die Regulierung hat sich hier anstelle der schwierig durchzuführenden direkten Messung der Partikel aus Reifenabrieb in einem ersten Schritt für die Hilfsgröße des Masseverlusts ausgedrückt durch die Abriebrate (AR) entschieden. Diese wird unter definierten Randbedingungen mit einer Gesamtstrecke von 8.000 km im Konvoiversuch mit in Kolonne fahrenden Fahrzeugen ermittelt.

Hinsichtlich der gesetzesvorbereitenden Maßnahmen sind zum Zeitpunkt der Projektdurchführung seitens der UNECE Methoden erarbeitet worden, welche die Messung von Reifenabrieb und Bremsenemissionen unter repräsentativen Bedingungen reproduzierbar ermöglichen. Diese Methoden werden in den Abschnitten 3.2 (für Fahrzeugreifen) und 4.2 (für Fahrzeugbremsen) näher beschrieben.

Die zum Zeitpunkt der Fertigstellung des vorliegenden Berichts getroffenen Entscheidungen bzgl. der optimalen Nutzung der in Frage kommenden Instrumente zur Regulierung der Reifen- und Bremsenemissionen ermöglichen zukünftig Maßnahmen, um die Gesamtemissionen von Fahrzeugen zu reduzieren. Hierbei werden sowohl notwendige Voraussetzungen als auch die Möglichkeiten zur technischen Umsetzung und die Skalierbarkeit von bspw. Produktionsanlagen und Prüfeinrichtungen berücksichtigt.

Messungen zu Reifen- und Bremsenabrieb

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden in einem die fortschreitenden Regulierungsaktivitäten begleitenden Prozess am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Ilmenau Messungen zur Feinstaubemission von Bremsen sowie zur Abriebrate von Reifen vorgenommen.

Um die in den Regulierungsaktivitäten vorgestellten Methoden zu validieren und mögliche Verbesserungsvorschläge für die Methoden abzuleiten, wurden hierfür im Vorhaben geeignete Messkampagnen konzipiert, geplant, durchgeführt und ausgewertet. Diese Methoden hatten die Reproduzierbarkeit der Emissionsmessungen unter repräsentativen Bedingungen zu gewährleisten und ermöglichten somit eine realitätsnahe Betrachtung.

Reifen

Zielstellung des durchgeführten Projekts war die Durchführung einer Messkampagne, welche die reproduzierbare Bestimmung von Reifenabrieb, die sogenannte „Abriebrate“ (AR) über einer definierten Wegstrecke ermöglicht. Diese AR war hierbei durch Fahrten auf realen Straßen zu ermitteln, wozu sowohl der öffentliche Straßenverkehr als auch isolierte Teststrecken zählen. Die Versuche sollten ein möglichst genaues Abbild des realen Einsatzgebietes darstellen. Eine Versuchsdurchführung auf Prüfständen jeglicher Art war nicht Teil der Untersuchungen.

Die Bestimmung der AR erfolgte für alle vier Räder/Reifen eines repräsentativen PKWs mit jeweils vier unterschiedlichen Sommerreifen im Vergleich zu einem Referenzreifen. Für die Versuche wurde eine Prüfdistanz je Reifen von ca. 2.700 km im realen Straßenverkehr mit einer Unterteilung in die Abschnitte Autobahn, Landstraße und Stadt vorgesehen. Die entsprechenden Zyklen wurden in Anpassung an lokale Gegebenheiten und die Erfahrungswerte der TU Ilmenau konzipiert.

Auf einer Teststrecke sollte zusätzlich in unterschiedlichen, aber konstanten Geschwindigkeiten gefahren werden, um den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die AR zu bestimmen. Sowohl für die Versuche auf öffentlichen Straßen als auch für die Teststrecke war vorgesehen, einen Messpunkt je Abschnitt aufzunehmen.

40 % der Versuchsfahrten wurden bereits im Sommer des Jahres 2022 durchgeführt und ausgewertet, die weiteren 60 % wurden im Sommer 2023 durchgeführt. Eine ursprünglich angedachte Messung von Winterreifen wurde infolge der hohen Temperaturen im Sommer aufgrund deren hoher Streubreite in entsprechenden Vorversuchen verworfen.

Die Messergebnisse zur Bestimmung der Abriebrate von Reifen belegen, dass im Vergleich der Prüfzyklen der innerstädtische Fahrbetrieb durch eine Vielzahl von Anfahr- und Anhaltenmanövern sowie engen Kurvenfahrten durch Abbiegevorgänge die höchsten Abriebraten aufweist. Gemäß einer Studie der ETRTO beträgt der Anteil der innerstädtischen Fahrprofile im EU-Durchschnitt ca. 31% (ETRTO, 2022). Aufgrund dieser Angabe sowie der erzielten Ergebnisse wird der Anteil der Abriebrate der innerstädtischen Prüfzyklen für einen kombinierten Prüfzyklus aus den Anteilen „urban“, „Landstraße“ und „Autobahn“ als maßgeblich eingestuft.

Die im Bericht dargestellten Messergebnisse zeigen die Niveaus der Abriebraten für die fünf unterschiedlichen Reifen in Abhängigkeit des gefahrenen Prüfzyklus auf, welche im realen Fahrbetrieb mit einem frontangetriebenen Fahrzeug ermittelt wurden.

Beim Vergleich der AR der Prüfreifen untereinander ist die Reihung nicht für alle Prüfzyklen *Stadt/Autobahn/Überland/RDE* gleich: Der bzgl. AR beste Reifen ist demnach nicht für alle Prüfzyklen der beste; der schlechteste in Umkehrung nicht in allen Fällen der schlechteste. Eine „Best Case“ bzw. „Worst Case“ Betrachtung ist folglich nicht zielführend. Die Reihung der Prüfreifen untereinander muss immer differenziert betrachtet werden bzw. müssen - auf das Prüfverfahren bezogen - immer alle Prüfzyklen gefahren werden.

Prüfreifen 3 und 4 liegen mit einem für das Gesamtfahrzeug aufsummierten Gesamtwert von 220 und 239 mg/km innerorts (deckungsgleich mit dem Maximalwert) deutlich über dem Niveau der beiden Prüfreifen 1 und 2 (143 und 126 mg/km) sowie dem Referenzreifen (166 mg/km). In den anderen Prüfzyklen (RDE und Autobahn) gleichen sich auf niedrigerem Niveau die Unterschiede zwischen den Prüfreifen mehr an. Auffallend ist, dass die Prüfreifen 3 und 4 mit den absolut höchsten Abriebraten auch den größten Unterschied zwischen angetriebener Vorderachse und der Hinterachse aufweisen. Dies lässt den Schluss zu, dass Prüfreifen 3 und 4 sensibler auf durch Antriebsmoment hervorgerufene Schlupfwerte reagieren als die anderen Reifen Prüfreifen 1 und 2 sowie Referenzreifen.

Der Referenzreifen weist mit 166 mg/km innerorts sowie 63 mg/km außerorts und 44 mg/km Autobahn sowie 81 mg/km im RDE Langzeittest eine grundsätzlich repräsentative Charakteristik auf. Der Referenzreifen reiht sich damit in die Bandbreite der AR der anderen 4 Prüfreifen etwa im Mittelfeld ein, zeigt ein charakteristisch repräsentatives Niveau in seinem Abriebverhalten und kann daher als Referenz herangezogen werden.

Bezüglich des Einlaufverhaltens lässt sich die allgemeine Tendenz feststellen, dass die Abriebrate mit zunehmender Laufleistung abnimmt. Die in den Ergebnissen zu erkennende Entwicklung bietet wichtige Erkenntnisse, auch wenn sie den Einlaufteffekt womöglich noch nicht vollständig abbildet. Als wesentliche Störgröße ist vor allem der Einfluss schwankender Außentemperaturen auf die Abriebrate zu benennen. Der Anstieg der AR des Referenzreifens während des Einlaufens ist vorrangig durch einen gemessenen Temperaturunterschied von 14°C bedingt. Daraus ergibt sich die Hypothese, dass die AR bei niedrigeren Temperaturen tendenziell höher ausfällt, da der Gummi verhärtet und damit stärker verschleißt. Diese Hypothese bildet einen bedeutenden Ansatzpunkt für weitere Untersuchungen und Forschungsarbeiten und erfordert eine genaue Analyse im Rahmen der Messkampagne der TFTA.

Zusammenfassend wurde mit den durchgeführten Messungen die Sensitivität der Methode zur Bestimmung der AR ermittelt und mögliche Fehlereinflüsse in ihrer jeweiligen Auswirkung untersucht.

Eine zusätzliche Zielstellung der Messkampagne war der qualitative Vergleich der gemessenen Abriebrate zu den Ergebnissen einer Vergleichsstudie, auf deren Basis die Auswahl der Prüfreifen erfolgte. Die Vergleichsstudie bot bislang die einzig zugängliche Datenquelle zum Abrieb verschiedener Reifen und wurde vom ADAC durchgeführt. Der Vergleich kann allerdings aufgrund diverser Unterschiede nur bedingt angestellt werden, weshalb zunächst die notwendigen Eingrenzungen vorgenommen wurden.

Grundsätzlich können lediglich die Ergebnisse des RDE-Prüfzyklus verglichen werden, da die Vergleichsstudie auf einen kombinierten Prüfzyklus zurückgegriffen hat. Dabei sind nur die Ergebnisse der Prüfreifen PR-1, PR-4 sowie RR heranzuziehen, da diese Reifen über den Verlauf der Messkampagne mehrfach im RDE-Prüfzyklus getestet wurden.

Der Vergleichszyklus zeigte reduzierte Anteile in Innenstadtgebieten, dafür erhöhte Anteile auf Autobahnen, da sich der ADAC bei der Auslegung seines Zyklus gegen die Einhaltung der RDE-Vorgaben entschieden hat, um eine Annäherung an reale Verteilungen der Prüfzyklen zu erzielen. Weiterhin beziehen sich die gemessenen Abriebraten auf eine erheblich höhere Gesamtdistanz im Vergleich zur Messkampagne an der TU Ilmenau (15.000 km vs. 3.000 km), die zusätzlich einen größeren Abstand zwischen den Messpunkten aufweisen (2.500 km vs. 270 km).

Zudem wurde die Vergleichsstudie mittels Konvoifahrten durchgeführt, wohingegen in der Messkampagne der TU Ilmenau nur ein singuläres Versuchsfahrzeug eingesetzt wurde. Weiterhin wurden nicht die gleichen Dimensionen der Prüflinge geprüft. Eine weitere Unsicherheit ergibt sich aus unterschiedlichen Produktionszeiträumen der Prüflinge.

Vom ADAC wurde im Sommer 2023 eine weitere Studie vorgestellt, in der die hier verwendeten Prüfreifen ebenfalls erneut getestet wurden. Jedoch wurden Teile der Versuche auf einem Prüfstand durchgeführt und die Ergebnisse für eine Übertragung auf reale Straßenbedingungen berechnet. Diese Vorgehensweise lässt Zweifel an der eindeutigen Interpretation der Ergebnisse aufkommen. Die Abweichung der Ergebnisse der Studien des ADAC untereinander könnten hierdurch begründet sein; als weiterer Einflussfaktor kommen Unterschiede in den getesteten Dimensionen hinzu. Weiterhin ist durch die Durchführung der Messkampagne an der TU

Ilmenau mit nur einem Versuchsfahrzeug ein direkter Vergleich der Messergebnisse nur bedingt möglich, da die Reifen nicht unter identischen Prüfbedingungen getestet werden konnten. Dies wurde jedoch durch die Analyse der Fahrweise sowie der herrschenden Außentemperaturen in der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt.

Dennoch lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die grundsätzlichen Unterschiede der Prüfreifen zueinander als auch im Vergleich mit dem Referenzreifen sowohl in der Messkampagne der TU Ilmenau als auch in der Vergleichsstudie abgebildet werden. Das grundsätzliche Niveau der Abriebraten liegt bei den Ergebnissen der TU Ilmenau geringer als in der Vergleichsstudie; die Abstände zwischen den Reifen sind auch prozentual sehr ähnlich. Auch die Reihung der Reifen wird mit einer Ausnahme gleich abgebildet.

Für einen Vergleich der Messergebnisse mit der Methode der Task Force on Tyre Abrasion (TFTA) ist der RDE-Prüfzyklus am besten geeignet, da dieser von der Zusammensetzung der Streckenanteile annähernd den Vorgaben der TFTA entspricht. Hierbei sind jedoch nur diejenigen Prüfzyklen heranzuziehen, die nach einem möglichen Einlaufeffekt durchgeführt wurden. Da zum Zeitpunkt dieses Berichts für die untersuchten Reifen keine Messergebnisse aus der laufenden TFTA-Testkampagne veröffentlicht waren, kann dieser Vergleich bzgl. der Abriebrate nicht angestellt werden.

Jedoch kann anhand der Ergebnisse aus den separierten Prüfzyklen der Versuchsreihen (Urban, Landstraße, Autobahn) ein Rückschluss auf die maßgeblich treibenden und verstärkenden Faktoren der Abriebrate gezogen werden. Folglich ist anzuzweifeln, dass der urbane Prüfzyklus durch eine Anpassung der Beschleunigungswerte auf der Landstraße repräsentativ nachgefahren werden kann wie es im aktuellen Entwurf der TFTA-Methode beschrieben ist.

Bremse

Auch für die Bremse wurde eine Messkampagne durchgeführt, die einen Überblick über das Emissionsverhalten von handelsüblichen Radbremsen und Reibpaarungen liefert. Die Feinstaubuntersuchungen wurden dabei am Beispiel unterschiedlicher Fahrzeugklassen, Bremsenkonzepte (Scheibenbremsen mit Festsattel und Faustsattel, Trommelbremse), Fahrzeugachsen (Vorder- und Hinterachse) sowie alternativer Reibmaterialien (hartmetallbeschichtete Bremscheibe) exemplarisch dargestellt. Alle Untersuchungen wurden unter Berücksichtigung des GRPE PMP Brake Emissions Protocol durchgeführt.

Zusätzlich hat sich die TU Ilmenau in einem zeitlich vorgelagerten Teil der Messkampagne am Ringversuch der PMP (Interlaboratory Study (ILS) – Taskforce 3 (TF3)) zur Beurteilung der entwickelten Messmethode im Laborvergleich beteiligt. Dabei wurden im Herbst 2021 die gleichen Bremskonfigurationen in 16 teilnehmenden Laboren gemäß des GRPE PMP Brake Emissions Protocol untersucht.

Die Ergebnisse der im Rahmen dieses Vorhabens am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Ilmenau durchgeführten Messungen zur Feinstaubemission von Reibungsbremsen liefern zunächst einen stichprobenartigen Überblick zur Einordnung des Emissionsniveaus typischer Bremssysteme des deutschen Fahrzeugmarktes. Aus den Ergebnissen kann eine grundsätzliche Korrelation zwischen der Gesamtemission und dem Fahrzeuggewicht abgeleitet werden, da ein höherer Energieumsatz mit einem höheren Verschleiß der Reibpartner einhergeht.

Die Übersicht aller in der Messkampagne „Marktvergleich“ untersuchten Bremsen bezüglich der PN- und PM-Emissionsfaktoren zeigt, wie stark die emittierte Partikelmasse mit den Einflussgrößen Fahrzeuggewicht bzw. Bremsendimension korreliert.

Während die Vorderachsbremse des kleinsten und leichtesten Fahrzeugs VW Polo 4,0 mg/km PM10 und 2,0 mg/km PM2,5 emittiert, liegen die korrespondierenden Werte des VW Golf bereits bei 5,3 mg/km PM10 und 2,8 mg/km PM2,5. Die deutlich größer dimensionierte und schwerere Bremse des Porsche Macan weist dagegen 7,6 mg/km PM10 und 3,4 mg/km PM2,5 auf.

Die Ergebnisse der Partikelanzahl sind dagegen schwieriger einzuordnen. Unterschiede bei der chemischen Zusammensetzung der Bremsbeläge, dem Temperaturverhalten der Bremse und bei der Tragbilddausprägung zwischen den Reibpartnern führen zu einer hohen Variation der PN-Emissionsfaktoren.

Aufgrund höherer dynamischer Radlasten der Vorderachse während eines Bremsmanövers ist für dort eingesetzte Bremssysteme im Vergleich zur hinteren Fahrzeugachse ebenfalls grundsätzlich eine signifikant stärkere Feinstaubfreisetzung auszumachen.

Um die Partikelemission von Hinterachsbremsen weiter zu reduzieren, wird u.a. der Einsatz von Trommelbremsen bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicle, BEV) als vielversprechend betrachtet. Anzustreben ist dafür allerdings eine gezielte Abdichtung des in sich gekapselten Bremssystems. Der in der Messkampagne durchgeführte Vergleich zwischen der Scheibenbremse einer VW Golf Hinterachse und der von der Hinterachse des VW ID3 stammenden Trommelbremse zeigt, dass die Trommelbremse tatsächlich weniger PM10 emittiert. Die Masseemission im Bereich von Partikeln kleiner 2,5µm (PM2,5) liegt dagegen auf dem von der Scheibenbremse bekannten Niveau.

Für die vorliegende Trommelbremse scheint die Abdichtung bezüglich Feinstaub noch nicht optimal gelungen, was sich zunächst durch den Emissionsfaktor der PM2,5 Fraktion äußert und durch die im Vergleich zur Scheibenbremse deutlich erhöhte PN-Emission bestätigt. Der zu 2.79×10^9 #/km pro Bremse ermittelte Emissionsfaktor der Trommelbremse liegt damit gar im

Bereich der getesteten Vorderachsscheibenbremse des VW Golf. Eines der größten Bremsstaubreduktionspotenziale für elektrisch angetriebene Fahrzeuge geht aktuell von der Technologie des rekuperativen Bremsens aus. Indem die Nutzung der Reibungsbremse minimiert und durch elektrisches Bremsen ersetzt wird, entstehen deutlich weniger Verschleißpartikel. Gleichzeitig verschieben sich dadurch die Anforderungen an Bremssysteme im Allgemeinen. Eine weitere Maßnahme zur Bremsstaubreduktion sind beschichtete Bremscheiben, die neben ihrer enormen Verschleißbeständigkeit, die einen massiven Rückgang der Feinstaubemissionen bewirkt, auch die Eigenschaft besitzen, Korrosion in Folge der selteneren Verwendung der Reibungsbremse zu vermeiden.

Der Vergleich der Emissionsfaktoren zwischen konventioneller (ICE) und rekuperativer (PHEV) Betriebsweise zeigt, dass bei idealer Rekuperation eines aktuell marktüblichen PHEV unter WLTP-Brake Vergleichsbedingungen eine Reduktion der Partikelmasse um ca. 60 % erreicht werden kann. Das Einsparpotenzial von ca. 40 % bei der Partikelanzahl fällt zwar etwas geringer aus, zeigt aber dennoch einen signifikanten Ansatz zur Bremsstaubreduktion durch Rekuperation auf. Einige der beschriebenen Ansätze zur Emissionsreduktion können erst durch die Neuentwicklung von Fahrzeugen und Bremssystemen verwirklicht werden, weshalb neben Langfristmaßnahmen auch kurzfristige Lösungswege aufzuzeigen sind. Ein Beispiel in diesem Sinne stellt die Verwendung in Bezug auf Feinstaub optimierter Bremsbeläge dar. Das Potenzial zur Verringerung der Partikelemission von in internationalen Märkten eingesetzten NAO-Belägen (nicht-asbesthaltig organisch; engl.: Non-Asbestos Organic, NAO) kann durch die durchgeführten Messungen bestätigt werden. Ebenso bieten einige Hybrid-Bremsbeläge (z.B. auf Keramikbasis) vielversprechende Minderungspotenziale.

In der Messkampagne waren Emissionsreduktionspotenziale sowohl bei PM als auch PN durch die Verwendung von NAO-Bremsbelägen gegenüber der ECE-Referenz messbar. Diese ursprünglich zur Komfortoptimierung (Verringerung von Geräuschen und Felgenverschmutzung) entwickelten Beläge bewirken einen geringeren Scheibenverschleiß, sind allerdings selbst weniger verschleißbeständig. Aus diesem Grund übersteigt der Gesamtverschleiß dieses Reibsystems letztlich die ECE-Referenz. Trotz ähnlichem Verschleißniveau äußert sich der Masseverlust der NAO-Reibpaarung allerdings messbar weniger feinstaubrelevant.

Die Verwendung hartmetallbeschichteter Bremscheiben und deren niedrigerem Gesamtverschleiß lässt auch das zugehörige Emissionsniveau deutlich absinken. Gemessen werden konnte eine PN-Einsparung von über 60 % in Bezug auf die GG-Referenz; bei der Partikelmasse sogar von über 70 %.

Unabhängig von der Materialwahl ist darüber hinaus anzustreben, den auch ohne Betätigung der Bremse vorliegenden Restkontakt zwischen Bremsbelägen und -scheibe zu minimieren bzw. gänzlich zu vermeiden. Durch die Vermeidung der sogenannten Restbremsmomente können nicht nur Bremspartikel reduziert, sondern letztlich auch der Energieverbrauch zum Antreiben des Fahrzeugs minimiert werden. Eine Möglichkeit zur Realisierung des dafür benötigten Lüftspiels zwischen Belägen und Scheibe bieten passive Rückstellelemente (z.B. Federanordnungen aus Blech), die vergleichsweise einfach für viele Bremssysteme eingesetzt werden können.

Darüber hinaus sind aus den laborübergreifenden Messungen im Rahmen der PMP Interlaboratory Study Erkenntnisse ableitbar, die Anlass zur Konkretisierung der Messmethode geben. Anhand der Streuung insbesondere der PM-Emissionsfaktoren zwischen den einzelnen Laboren wird deutlich, dass Anpassungen der protokollseitigen Definitionen und der Qualitätskriterien nötig sind, um stabile und vergleichbare Ergebnisse erzielen zu können. Einige Ansätze mit Blick auf eine Vereinheitlichung des Messaufbaus wurden bereits in der aktuellen Fassung der Methodik umgesetzt bzw. weiter konkretisiert (Bremsenposition und -umhausung,

Kanalordnung, Sampling-Position, ...). Zudem wurde für die Messung der Partikelmasse die Verwendung von separaten Filterhaltern mit vorgeschalteten Zyklonen für den jeweiligen Trenndurchmesser vorgeschrieben. In-Stack-Messungen mittels kalibrierter Kaskadenimpaktoren sind dadurch nicht länger GTR-konform.

Um an der Zählereinheit vorliegende Partikelanzahlkonzentrationen oberhalb des für das jeweilige Messgerät zertifizierten Bereichs zu vermeiden, sollte für zukünftige Untersuchungen eine Vorverdünnung des Aerosols vorgesehen werden.

Gleichzeitig sind möglichst konstante Luft- und Umgebungsbedingungen anzustreben, um zum einen Einflüsse durch eine Variation der Lufttemperatur – oder feuchte zu vermeiden und zum anderen die Partikelhintergrundkonzentration generell auf einem geringen Niveau zu halten.

Mit dem Ziel der Einsparung von Prüfstandszeiten wurde ferner der eigentliche Hauptemissionstest, der sich zur Bestimmung der ausgewiesenen Emissionsfaktoren an die fünf Wiederholungen des WLTP Brake Cycle des Beddings anschließt, von drei weiteren Zyklen auf einen einzigen reduziert. Vor dem Hintergrund toleranzbehafteter und statistisch schwankender tribologischer Prozesse bzw. Messsysteme muss diese Entscheidung kritisch betrachtet werden. Liefert eine mehrfache Wiederholung mit anschließender Mittelwertbildung zwar eine bessere statistische Absicherung, so erhöht sich dadurch allerdings auch die simulierte Kilometerleistung der jeweiligen Bremse. Letzteres kann zur Folge haben, dass ein nach fünf Zyklen des WLTP Brake Cycle (ca. 961 km) noch nicht abgeschlossener Einlaufprozess (Bedding) über die folgenden Zyklen zu einem weiteren Emissionsrückgang führt. In diesem Sinne gewährleistet die Methode zwar nicht automatisch eine Aussage zum konstanten Emissionsverhalten einer vollständig eingelaufenen Reibpaarung, bildet aber aufgrund der über den Einlaufprozess sinkenden Emissionsfaktoren bei einer verfrühten Messung in der Regel ein worst-case Szenario ab, was letztlich zu größerem Abstand von zu erwartenden Grenzwerten der EU7-Regulierung führen sollte.

Der Gedanke an einen unvollständigen Einlaufprozess kommt insbesondere auch bei Messungen beschichteter Scheiben auf. Sehr verschleißbeständige Reibpartner benötigen entsprechend mehr Zeit, um einen stabilen eingelaufenen Zustand zu erreichen.

Ebenfalls werden hohe Bedding-Laufzeiten bei gering belasteten Trommelbremsen benötigt. Die Ausbildung des für einen eingelaufenen Zustand typischerweise vorliegenden 90 % Traganteils wird mitunter erst deutlich nach der fünffachen Durchführung des WLTP-Brake Cycles erreicht. Eine speziell für diese Reibsysteme angedachte Methodik existiert zu diesem Zeitpunkt nicht, wodurch grundsätzlich auch auf das Ziel einer worst-case Beschreibung zurückgegriffen wird.

Ein zusätzlicher und sicherlich aufgrund der vielfältigen Einflussmöglichkeiten auf das Emissionsergebnis nicht minder wichtiger Aspekt besteht weiterhin in der Berücksichtigung Rekuperations-fähiger Fahrzeuge innerhalb der Messmethode. Da bereits in naher Zukunft der Großteil der neu- und weiterentwickelten Fahrzeuge auf unterschiedliche Art und Weise elektrifiziert sein werden, ergibt sich bereits jetzt der Bedarf, den methodischen Rahmen zur Bewertung des Emissionsverhaltens der in diesen Fahrzeugen verwendeten Bremsen festzulegen. Die Berücksichtigung über einen reinen Korrekturfaktor hat hier zu stark vereinfachenden Charakter.

Abschließend bleibt festzustellen, dass die Messung von Feinstäuben vielfältigen Einflussfaktoren unterliegt und nur mittels eng gefasster Anforderungen und präziser Versuchsdurchführung in einen methodisch und für die Grenzwertgesetzgebung geeigneten Rahmen gebracht werden kann.

Summary

Improving air quality is a top priority globally and especially for the European Commission. It is part of the objectives of the European Green Deal, which also aims to achieve sustainable mobility, a zero-pollution target for a pollution-free environment, clean industry and a circular economy that will emit no net greenhouse gases by 2050, decouple its growth from resource use, and leave no one behind, neither people nor regions.

Particulate emissions from motor vehicles with negative effects on air quality come from two main sources: the combustion of fuels emitted via exhaust pipes and the wear of vehicle components such as brakes and tires and road surfaces, as well as the swirling up of road dust. The particulate emissions generated by the latter processes are referred to as non-exhaust emissions (NEE).

While the emission standards for exhaust particles from motor vehicles (e.g. Euro 6d 2020) are rather strict, particulate emissions from other sources (non-exhaust vehicle emissions) were largely unregulated in the past. As a result, the percentage of non-exhaust vehicle emissions has risen significantly in recent years. Brakes and the abrasion of brake discs and brake linings are considered to be one of the main sources of particulate matter in the order of PM_{2,5} and are expected to contain chemical substances hazardous to health. Together with tire and road abrasion, brakes today cause up to 60 percent of total traffic-related particulate matter emissions (PM_{2,5} and PM₁₀) - and the trend is rising (Verordnung (EU), 2023/851, 2023; OECD, 2020).

In September 2021, the WHO global air quality guidelines have been updated: particulate matter (PM_{2,5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulphur dioxide and carbon monoxide (World Health Organization, 2021). It states, that health is already at risk at significantly lower concentrations of air pollution than previously assumed. The new WHO guideline values are significantly lower than the current national and European limit values.

The OECD has specifically addressed this issue in its publication "Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport - An Ignored Environmental Policy Challenge" (OECD, 2020). The focus therefore has to be on drastically reducing tire and brake emissions.

Regulatory framework for brake and tire particle emissions

At the end of 2022, the European Commission proposed an Update of the Euro 7 regulation, including limit values for upcoming and future brake particle emissions. The regulatory proposal stipulates a brake dust limit of 7 mg/km for passenger cars and light commercial vehicles (except heavy light commercial vehicles – N1 III) from 2025 and 3 mg/km from 2035. The "Global Technical Regulation" UN-GTR No. 24 was published alongside it, which describes the measurement of brake wear particles in mass and number. This regulation refers to component tests on laboratory brake test benches using the newly defined "WLTP-Brake" driving cycle. The measurement method aims to provide representative measurements of vehicle brakes with current emission levels and braking processes where the brake energy is dissipated by the friction brakes.

Electrified vehicles have the potential to reduce the application of the friction brakes due to regenerative braking via recuperation. However, battery electric vehicles (BEV) do not

necessarily produce fewer particulate emissions. Due to the increased vehicle weight as a result of the heavy energy storage (High voltage battery), the number of particles and particle mass can sometimes even increase for physical reasons in direct comparison, although this is usually overcompensated by recuperation.

Tire particle emissions also occur to the same extent or, due to the increasing vehicle weight, to an increased extent in vehicles with electric or alternative drive concepts. Tire particle emissions contribute to the deterioration of air quality and can have negative effects on human health and the environment. In addition, tire wear in particular creates sustainable environmental pollution that is shifted through transport processes.

Instead of the difficult-to-carry direct measurement of particles from tire abrasion, the regulation has opted for the auxiliary quantity of mass loss expressed by the abrasion rate AR. This is determined on a given profile with a total distance of 8,000 km in a convoy test with successive vehicles.

With regard to the legislative preparatory measures, the UNECE had developed methods at the time of project implementation that would enable the reproducible measurement of tire wear and brake emissions under representative conditions.

As part of this project, measurements of particulate matter emissions from brakes and the abrasion rate of tires were carried out at the Department of Vehicle Technology at Ilmenau University of Technology in a process that accompanied the ongoing regulatory activities. These methods are described in chapter 3.2 (for tires) and 4.2 (for brakes).

The decisions made at the time of completion of this report regarding the optimal use of the relevant instruments for regulating tire and brake emissions will enable future measures to reduce overall vehicle emissions. These decisions take into account both the necessary prerequisites and the possibilities for technical implementation and the scalability of, for example, production facilities and testing facilities.

Measurements of tire and brake wear

As part of this project, measurements of particulate matter emissions from brakes and tire wear rates were conducted at the Department of Automotive Engineering at Ilmenau University of Technology as part of a process accompanying ongoing regulatory activities.

To validate the methods presented in the regulatory activities and derive possible methodological improvements, suitable measurement campaigns were designed, planned, implemented, and evaluated within the project. These methods were designed to ensure the reproducibility of the emission measurements under representative conditions, thus enabling a realistic assessment.

Tires

The objective of the project was to conduct a measurement campaign that would enable the reproducible determination of tire wear, the so-called "wear rate" (AR), over a defined distance. This AR was to be determined by driving on real roads, including both public roads and isolated test tracks. The tests were intended to represent the real-world application as accurately as possible. Conducting tests on test benches of any kind was not part of the investigation.

The AR was determined for all four wheels/tires of a representative passenger car, each fitted with four different summer tires, compared to a reference tire. For the tests, a test distance of approximately 2,700 km per tire was planned in real-world road traffic, divided into highway, country road, and urban sections. The corresponding cycles were designed to reflect local conditions and the experience of Ilmenau University of Technology.

Additionally, driving on a test track at varying but constant speeds was planned to determine the influence of driving speed on the AR. For both the tests on public roads and the test track, one measuring point was planned for each section. 40% of the test drives were already conducted and evaluated in the summer of 2022, and the remaining 60% were conducted in the summer of 2023. An originally planned measurement of winter tires was discarded due to the high temperatures in summer and the wide range of their dispersion in corresponding preliminary tests.

The measurements to determine the abrasion rate of tires show that the abrasion rate AR is highest on the front axle of a front-wheel drive and front-steered vehicle. In this context, it was found that the AR on the front axle accounts for approximately 75% of the AR of the entire vehicle or is approximately 3 times the AR on the rear axle.

Furthermore, it was proven that inner-city driving has the highest AR in a comparison of the test cycles due to a large number of starting and stopping manoeuvres as well as tight curves due to turning operations. According to a study by the ETRTO, the share of inner-city driving profiles is around 31% on average in the EU (ETRTO, 2022). Based on this information and the results achieved, the share of AR in the inner-city test cycles is classified as relevant for a combined test cycle consisting of the "urban", "country road" and "motorway" parts.

The measurement results presented in the report show the wear rates for the five different tires depending on the test cycle, which were determined under real-world driving conditions with a front-wheel drive vehicle.

Comparing the wear rates of the test tires with each other, it is evident that the ranking is not the same for all test cycles (city/highway/country/RDE): The tire with the best wear rate is therefore not the best for all test cycles; conversely, the worst tire is not the worst in all cases. A "best case" or "worst case" analysis is therefore not useful. The ranking of the test tires must always be considered in a differentiated manner, and – with regard to the test procedure – all test cycles must always be run.

Test tires 3 and 4, with a total value for the entire vehicle of 220 and 239 mg/km in urban driving (which coincides with the maximum value), are significantly higher than the two test tires 1 and 2 (143 and 126 mg/km) and the reference tire (166 mg/km). In the other test cycles (RDE and highway), the differences between the test tires are more similar at a lower level. It is striking that test tires 3 and 4, with the absolute highest wear rates, also exhibit the greatest difference between the driven front axle and the rear axle. This allows the conclusion that test tires 3 and 4 react more sensitively to slip values induced by drive torque than the other tires, test tires 1 and 2, and the reference tire.

The reference tire shows generally representative characteristics, with 166 mg/km in urban driving, 63 mg/km in extra-urban driving, 44 mg/km on the highway, and 81 mg/km in the RDE

long-term test. The reference tire thus ranks roughly in the middle of the range of AR values for the other four test tires, exhibiting a characteristically representative level of wear behaviour and can therefore be used as a reference.

Regarding the running-in behaviour, a general trend can be observed that the wear rate decreases with increasing mileage. The trend evident in the results provides important insights, even if it may not yet fully reflect the running-in effect. The influence of fluctuating outside temperatures on the wear rate is a key confounding factor. The increase in the AR of the reference tire during running-in is primarily due to a measured temperature difference of 14°C. This leads to the hypothesis that the AR tends to be higher at lower temperatures because the rubber hardens and thus wears more rapidly. This hypothesis represents an important starting point for further investigations and research and requires detailed analysis as part of the TFTA measurement campaign.

In summary, the measurements conducted were used to determine the sensitivity of the method for determining the AR and to investigate the respective impact of potential errors.

An additional objective of the measurement campaign was to qualitatively compare the measured wear rate with the results of a comparative study, which was used as the basis for selecting the test tires. This comparative study, which was previously the only accessible source of data on the wear of various tires, was conducted by the ADAC (German Automobile Club). However, due to various differences, the comparison can only be made to a limited extent, which is why the necessary limitations were first established.

In principle, only the results of the RDE test cycle can be compared, as the comparative study used a combined test cycle. Only the results of the test tires PR-1, PR-4, and RR are considered, as these tires were tested multiple times in the RDE test cycle over the course of the measurement campaign.

The comparison cycle showed reduced rates in inner-city areas, but increased rates on highways, as the ADAC opted not to comply with the RDE specifications when designing its cycle in order to achieve an approximation of the real-world test cycle distributions. Furthermore, the measured wear rates refer to a significantly higher total distance compared to the measurement campaign at the TU Ilmenau (15,000 km vs. 3,000 km), which also featured a greater distance between the measurement points (2,500 km vs. 270 km).

Furthermore, the comparative study was conducted using convoy driving, whereas the measurement campaign at TU Ilmenau used only a single test vehicle. Furthermore, the test specimens were not tested using the same dimensions. A further uncertainty arises from the different production periods of the test specimens.

The ADAC presented another study in the summer of 2023, in which the test tires used here were also retested. However, parts of the tests were conducted on a test bench, and the results were calculated for transfer to real-world road conditions. This approach raises doubts about the unambiguous interpretation of the results. The discrepancies between the results of the ADAC studies could be due to this; differences in the tested dimensions are another influencing factor. Furthermore, the measurement campaign at TU Ilmenau was conducted with only one test vehicle, which means that a direct comparison of the measurement results is only possible to a limited extent, as the tires could not be tested under identical test conditions. However, this was taken into account in the evaluation of the results by analysing the driving style and the prevailing outside temperatures.

Nevertheless, it can be summarized that the fundamental differences between the test tires and the reference tire are reflected in both the measurement campaign at TU Ilmenau and the

comparative study. The general level of wear rates is lower in the results from TU Ilmenau than in the comparative study; the distances between the tires are also very similar in percentage terms. The ranking of the tires is also represented in the same way, with one exception.

The RDE test cycle is best suited for a comparison of the measurement results with the method of the Task Force on Tire Abrasion (TFTA), as the composition of the route components almost corresponds to the specifications of the TFTA. However, only those test cycles that were carried out after a possible run-in effect should be used. Since at the time of this report no measurement results from the ongoing TFTA test campaign were published for the tires examined, this comparison cannot be made with regard to the AR.

However, based on the results from the separate test cycles (urban, country road, motorway), a conclusion can be drawn about the key driving factors of AR. For example, it is doubtful that the urban test cycle can be representatively simulated by adjusting the acceleration values on country roads, as described in the current draft of the TFTA method.

Brakes

A measurement campaign was also conducted for the brakes, providing an overview of the emission behavior of commercially available wheel brakes and friction pairings. The particulate matter investigations were presented using examples from different vehicle classes, brake concepts (disc brakes with fixed and floating calipers, drum brakes), vehicle axles (front and rear axles), and alternative friction materials (carbide-coated brake discs). All investigations were conducted in accordance with the GRPE PMP Brake Emissions Protocol. In addition, in a prior part of the measurement campaign, TU Ilmenau participated in the PMP round robin test (Interlaboratory Study (ILS) – Taskforce 3 (TF3)) to evaluate the developed measurement method in a laboratory comparison. In the fall of 2021, the same brake configurations were tested in 16 participating laboratories in accordance with the GRPE PMP Brake Emissions Protocol.

The results of the measurements on fine dust emissions from friction brakes carried out as part of this project at the Vehicle Technology Department at Ilmenau University of Technology initially provide a random overview of the classification of the emission levels of typical brake systems on the German vehicle market. From this, a correlation can be derived between the total emissions and the vehicle weight, since higher energy consumption is associated with higher wear on the friction partners.

Due to higher dynamic wheel loads on the front axle during a braking manoeuvre, there is also a significantly greater release of fine dust for the braking systems used there compared to the rear vehicle axle.

The overview of all brakes tested in the "Market Comparison" measurement campaign with regard to their PN and PM emission factors shows how strongly the emitted particulate mass correlates with the influencing factors of vehicle weight and brake size. While the front axle brake of the smallest and lightest vehicle, the VW Polo, emits 4.0 mg/km PM₁₀ and 2.0 mg/km PM_{2.5}, the corresponding values for the VW Golf are already 5.3 mg/km PM₁₀ and 2.8 mg/km PM_{2.5}. The significantly larger and heavier brake of the Porsche Macan, in contrast, emits 7.6 mg/km PM₁₀ and 3.4 mg/km PM_{2.5}.

The particle number results, however, are more difficult to classify. Differences in the chemical composition of the brake pads, the temperature behavior of the brake, and the contact pattern characteristics between the friction partners lead to a significant variation in the particulate matter emission factors. Due to the higher dynamic wheel loads on the front axle during a braking maneuver, braking systems used there generally also emit significantly more particulate matter than those used on the rear vehicle axle.

In order to further reduce particle emissions from the rear axle brakes, the use of drum brakes in electrically powered vehicles (Battery Electric Vehicle, BEV) is considered promising. However, the aim is to specifically seal the encapsulated brake system. The comparison conducted during the measurement campaign between the disc brake of a VW Golf rear axle and the drum brake from the rear axle of the VW ID3 shows that the drum brake does indeed emit less PM₁₀. Mass emissions in the range of particles smaller than 2.5 µm (PM_{2.5}), however, are at the same level as those of the disc brake.

For the drum brake in question, the sealing with regard to particulate matter appears to be less than optimal, which is evident initially in the emission factor for the PM_{2.5} fraction and confirmed by the significantly higher PN emissions compared to the disc brake. The emission

factor of the drum brake, determined at $2.79\text{E}+09$ #/km per brake, is thus even in the range of the tested front axle disc brake of the VW Golf.

One of the greatest brake dust reduction potentials for electrically powered vehicles currently comes from the technology of recuperative braking. By minimizing the use of the friction brake and replacing it with electric braking, significantly fewer wear particles are created. At the same time, the requirements for braking systems in general are shifting. Another measure to reduce brake dust are coated brake discs, which, in addition to their enormous wear resistance, which causes a massive reduction in fine dust emissions, also have the property of preventing corrosion as a result of the infrequent use of the friction brake.

A comparison of the emission factors between conventional (ICE) and recuperative (PHEV) operation shows that, with ideal recuperation of a currently commercially available PHEV under WLTP-Brake comparison conditions, a reduction in particulate matter of approximately 60% can be achieved. Although the potential savings of approximately 40% in particle count are somewhat lower, they nevertheless demonstrate a significant approach to brake dust reduction through recuperation.

Some of the described emission reduction approaches can only be realized through the development of new vehicles and braking systems, which is why, in addition to long-term measures, short-term solutions must also be demonstrated. One example in this sense is the use of brake pads optimized for particulate matter. The potential for reducing particulate emissions of NAO pads (non-asbestos organic, NAO) used in international markets can be confirmed by the measurements conducted. Likewise, some hybrid brake pads (e.g. ceramic-based) offer promising reduction potential.

During the measurement campaign, emission reduction potential for both PM and PN was measurable through the use of NAO brake pads compared to the ECE reference. These pads, originally developed to optimize comfort (reduce noise and rim contamination), result in lower disc wear, but are themselves less wear-resistant. For this reason, the overall wear of this friction system ultimately exceeds the ECE reference. Despite a similar level of wear, the mass loss of the NAO friction pair is measurably less relevant to particulate matter.

The use of hard metal-coated brake discs and their lower overall wear also significantly reduces the associated emission level. A PN reduction of over 60% compared to the GG reference was measured; in terms of particle mass, even more than 70%.

Regardless of the choice of material, the aim should also be to minimize or completely avoid the residual contact between the brake pads and disc, even without the brake being actuated. By avoiding the so-called residual braking torque, not only can brake particles be reduced, but ultimately the energy consumption for driving the vehicle can also be minimized. One way to achieve the required clearance between the pads and the disc is through passive restoring force elements (e.g. spring systems made of sheet metal), which can be used comparatively easily for many brake systems.

In addition, findings can be derived from the cross-laboratory measurements as part of the PMP ILS, which give rise to the specification of the measurement method. The variation in PM emission factors in particular between the individual laboratories makes it clear that adjustments to the protocol definitions and quality criteria are necessary in order to achieve stable and comparable results. Some approaches with a view to standardizing the measurement setup have already been implemented or further specified in the current version of the methodology (brake position and housing, channel arrangement, sampling position, ...). In

addition, the use of separate filter holders with upstream cyclones for the respective separation diameter was required to measure the particle mass. As a result, in-stack measurements using calibrated cascade impactors are no longer GTR-compliant.

In order to avoid particle number concentrations present at the counting unit above the range certified for the respective measuring device, pre-dilution of the aerosol should be planned for future investigations. At the same time, air and environmental conditions should be as constant as possible in order to avoid influences caused by variations in air temperature or humidity and to generally keep the particle background concentration at a low level.

With the aim of saving test bench time, the actual main emissions test, which follows the five repetitions of the Bedding's WLTP Brake Cycle to determine the specified emission factors, was reduced from three additional cycles to a single one. Against the background of tolerance-based and statistically fluctuating tribological processes and measurement systems, this decision can certainly be viewed critically. Although repeated repetition with subsequent averaging provides better statistical assurance, this also increases the simulated mileage of the respective brake. The latter can result in a running-in process (bedding) that has not yet been completed after five cycles of the WLTP Brake Cycle (approx. 961 km) leading to a further reduction in emissions over the following cycles. In this sense, the method does not automatically guarantee a statement about the constant emission behaviour of a completely run-in friction pairing. But due to the emission factors decreasing over the running-in process, it usually represents a worst-case scenario if the measurement is carried out prematurely, which ultimately leads to a greater distance from the expected limit values of the EU7 regulation. The thought of an incomplete running-in process arises particularly when measuring surface coated brake discs. Very wear-resistant friction partners require a long time to reach a stable, ran-in condition.

The idea of an incomplete running-in process is particularly relevant when measuring coated discs. Highly wear-resistant friction partners require correspondingly longer time to reach a stable, run-in state.

Long bedding running times are also required for drum brakes with low loads. The formation of the 90% load that is typically present for a broken-in condition is sometimes only achieved well after the WLTP brake cycle has been carried out five times. A methodology specifically designed for these friction systems does not exist at this point in time, which means that the goal of a worst-case description is fundamentally used.

An additional and certainly no less important aspect due to the diverse possibilities for influencing the emissions result is the consideration of vehicles capable of recuperation within the measurement method. Since the majority of new and further developed vehicles will be electrified in different ways in the near future, there is already a need to define the methodological framework for evaluating the emission behaviour of the brakes used in these vehicles. The consideration here using a pure correction factor is overly simplistic.

Finally, it should be noted that the measurement of fine dust is subject to a variety of influencing factors and can only be brought into a framework that is suitable in terms of methodology and limit value legislation by means of narrowly defined requirements and precise testing.

1 Aufgabenstellung

Unter dem zu Beginn des Projektes gewählten Arbeitstitel „Unterstützung und Entwicklung einer Erhebung und/oder Grenzwertgesetzgebung bezüglich Reifen- und Bremsenabrieb bei Straßenfahrzeugen“ war der Regulierungsprozess für Feinstaub aus Reifen- und Bremsenabrieb von PKW durch ein wissenschaftliches Forschungsvorhaben zu begleiten und unterstützen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens waren zunächst der gesetzliche Rahmen für eine mögliche Regulierung von Abrieb aus Reifen und Bremsen zu analysieren und hinsichtlich der Möglichkeiten zur Implementierung eines Grenzwertes für diese Emissionen zu bewerten. Die Aussagen zum Regulierungsprozess im vorliegenden Bericht beziehen sich grundsätzlich auf den Bearbeitungszeitraum des Projektes bis Ende Januar 2023 und damit nicht auf den Stand zur Veröffentlichung des Abschlussberichts.

Weiterhin war jeweils für die Emissionen von Fahrzeugreifen und –bremsen die jeweilige Methode zur Bestimmung und Messung dieser Emissionen aus dem jeweiligen Gremium zu analysieren. Dazu war an den entsprechenden Gremiensitzungen teilzunehmen, um die Prozesse stetig und konstruktiv zu begleiten. Geeignete Messkampagnen waren zu planen, durchzuführen und auszuwerten, um die vorgestellten Methoden zu validieren und ggf. Verbesserungsvorschläge abzuleiten, um die Emissionsmessungen unter repräsentativen Bedingungen reproduzierbar durchführen zu können und somit eine realitätsnahe Betrachtung zu ermöglichen.

Darüber hinaus wurden zwei Fachgespräche, eines für Reifen- und eines für Bremsenabrieb, auf nationaler Ebene durchgeführt, um einen Diskurs zwischen Ministerien, Behörden, Verbänden, sowie Vertreterinnen*Vertretern aus Industrie und Wissenschaft zu ermöglichen, aus welchem sich eine gesamtheitliche Position zur Regulierung des Abriebs aus Reifen und Bremsen ableiten lässt.

Die zu bearbeitenden Zielstellungen lauten demnach:

- ▶ Analyse des Regulierungsrahmens für die Beschränkung von Reifen- und Bremsenabrieb
- ▶ Analyse der vorliegenden Methoden zur Messung von Reifen- und Bremsenabrieb
- ▶ Durchführung von Messkampagnen als Beitrag zur Entwicklung oder Validierung einer Methode zur Bestimmung von Reifen- und Bremsenabrieb
- ▶ Organisation und Durchführung von Fachgesprächen und Beratung des UBA/BMUV

2 Analyse des Regulierungsrahmens für die Beschränkung von Reifen- und Bremsenabrieb

Die Regulierung von Fahrzeugemissionen erfolgte erstmals im Jahr 1970 durch die EU-Kommission mit der Richtlinie 70/220/EWG, welche die durch Fahrzeuge ausgestoßenen Abgasemissionen (Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe) auf europäischer Ebene beschränkte. Seitdem wird die Regulierungen von Fahrzeugemissionen konsequent weiterentwickelt bzw. an technologische Fortschritte angepasst. Die zum Zeitpunkt dieses Berichts gültige Verordnung zur Regulierung von Luftschadstoffemissionen im Rahmen der Typgenehmigung von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen ist die (EG) 715/2007 (zuletzt geändert durch Verordnung (EU) 2018/858) (2007).

Die bisherigen Vorschriften für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und das geplante Verbot ihrer Neuzulassung ab 2035 haben das Minderungspotenzial der Emissionen in diesem Bereich weitgehend ausgeschöpft. Angesichts der zunehmenden Verbreitung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten wie Hybridantrieben oder batterieelektrischen Fahrzeugen und der damit verbundenen Zunahme der Fahrzeugmasse rücken nun verstärkt die partikelförmigen Nicht-Abgasemissionen (engl.: „non-exhaust emissions“ - NEE) in den Fokus der Gesetzgeber. Zu diesen NEE gehören Emissionen durch Reifenverschleiß, Bremspartikelemissionen, aufgewirbelte Partikel von der Straße, Straßenverschleiß und Emissionen aus den Reibbelägen von Kupplungseinrichtungen in Achs-, Verteiler- und Antriebsgetrieben. In diesem Forschungsprojekt wurde der Fokus dabei auf die Emissionen mit den größten Anteilen der NEE gelegt, welche aus den tribologischen Prozessen in Form von Reibung und Verschleiß von Reifen und Bremsen entstehen.

Der Vorschlag der EU-Kommission zur geplanten Euro-7 Abgasnorm sieht erstmals eine Limitierung von Nicht-Abgasemissionen vor, sodass fortan von einer Norm für Gesamtfahrzeugemissionen gesprochen werden kann (EU-COM, 2022).

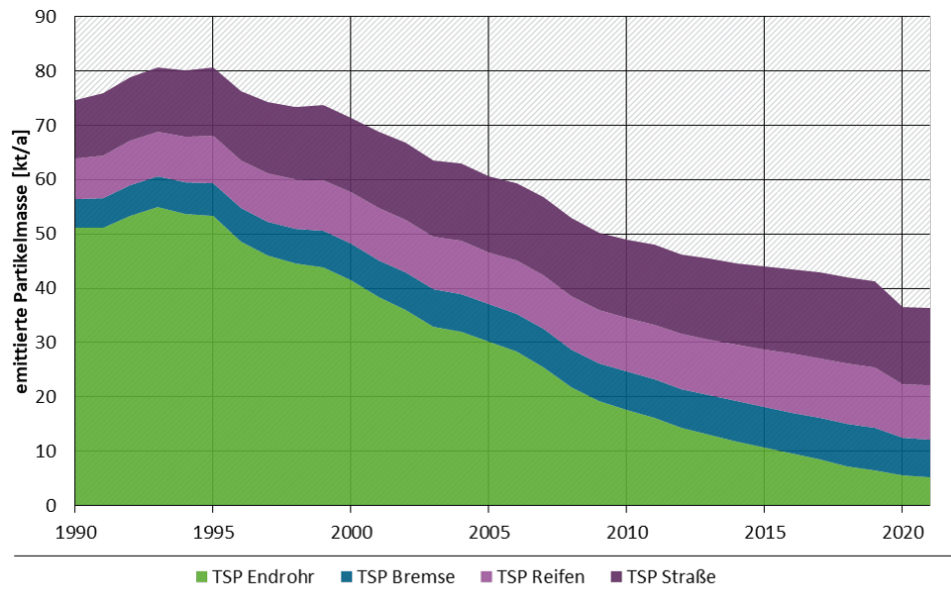
Die UNECE als übergeordnetes Gremium beschäftigt sich mit der Erarbeitung und Harmonisierung von Regulierungen. Im Rahmen einer möglichen UN-Vorschrift zur Regulierung von NEE haben dementsprechend auch alle Vertragsparteien die Verpflichtung, diese Verordnung(en) umzusetzen. Sollten die Ansätze zur Regulierung von NEE jedoch nur auf nationaler oder z.B. auf der Ebene der EU entwickelt werden, so können sie nicht zwangsläufig in anderen Staatenbündnissen oder Nationen Anwendung finden. Da sich jedoch die internationalen Regelungen durch die Globalisierung und die daraus folgende globale Entwicklung von Fahrzeugen häufig überschneiden, Produkte global vertrieben werden und die gesundheitliche sowie die Umweltbelastung durch Fahrzeuge ein globales Problem darstellt, haben die Hersteller und gesetzgebenden Organe ein Interesse u. a. Methoden zur Bestimmung von Schadstoffen harmonisiert auf UN-Ebene zu entwickeln.

Die Bestrebungen zur Reduzierung fahrzeugbedingter Emissionen aus dem Straßenverkehr sind in den vergangenen Jahren international intensiviert worden (Rexeis, 2009). Die bisherige Regulierung von Fahrzeugen hinsichtlich verbrennungsmotorisch verursachter Abgasemissionen wurde - insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Elektrifizierung von Fahrzeugen - um antriebsferne Emissionen NEE erweitert. Diese entstehen überwiegend durch Abrieb an den Fahrzeugbremsen und den Fahrzeugreifen, aber auch durch den Abrieb der Fahrbahnoberfläche.

Während die verkehrsbedingt emittierten Partikel in den 1990er Jahren zu zwei Dritteln durch motorische Emissionen verursacht wurden, sind die antriebsfernen Emissionen seit dem Jahr 2005 der mittlerweile dominante Anteil. Dies ist der Abbildung 1: Emittierte luftgängige

Partikelmasse in Abhängigkeit von der Entstehung zu entnehmen, in welcher die verkehrsbedingten Emissionen der luftgängigen Festkörperpartikel (engl: Total Suspended Particles – TSP) in Kilotonnen pro Jahr dargestellt sind. Hieraus werden sowohl der bisherige Erfolg der Regulierung und Minimierung der Abgasemissionen als auch der Handlungsbedarf für NEE ersichtlich.

Abbildung 1: Emittierte luftgängige Partikelmasse in Abhängigkeit von der Entstehung



Quelle: eigene Darstellung

Datenquelle: (Umweltbundesamt, 2025)

Die Größenverteilung von Abriebpartikeln erstreckt sich dabei, abweichend von Abgasemissionspartikeln, über die Größenklassen des Feinstaubs (aerodynamischer Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$) und des Mikroplastiks ($< 5 \text{ mm}$) hinaus und stellt eine Gefahr für Gesundheit und Umwelt dar. Lange Zeit fanden diese Emissionen kaum Beachtung; stattdessen wurden die Abgasemissionen immer strenger reguliert und kontinuierlich verringert. Aktuell werden im Bereich der Emissionen von Bremsen und Reifen viele Forschungsarbeiten durchgeführt und gesetzesvorbereitende Maßnahmen von verschiedenen Institutionen ergriffen (Giechaskiel, 2022).

Nachfolgend wird ein grundlegender Überblick über die aktuellen Instrumente zur Regulierung von Fahrzeugen gegeben, der sowohl den globalen als auch den europäischen Bereich abdeckt.

2.1 Internationale Richtlinien zur Regulierung von Fahrzeugen der UN

Auf der Ebene der UN existiert das UNECE-Weltforum für die Harmonisierung der Regelungen für Kraftfahrzeuge (WP.29), welches als ein weltweites Regulierungsforum innerhalb des institutionellen Rahmens des UNECE-Binnenverkehrsausschusses für die Regulierung von Fahrzeugen verantwortlich ist.

Drei UN-Übereinkommen, die 1958, 1997 und 1998 angenommen wurden, bilden den rechtlichen Rahmen, der es den Vertragsparteien (Mitgliedsländern), die an den WP.29-Sitzungen teilnehmen, ermöglicht, Regelungsinstrumente für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeugausrüstungen zu schaffen:

Arten von UN-Regelungsinstrumenten für Kraftfahrzeuge

- ▶ UN-Regelungen, die dem Übereinkommen von 1958 beigelegt sind
- ▶ Globale Technische Regelungen der Vereinten Nationen (UN-GTR), die mit dem Übereinkommen von 1998 verbunden sind
- ▶ UN-Regeln, die dem Übereinkommen von 1997 beigelegt sind

▶ UN-R: UN-Regelungen

Die UN-Regelungen (UN-R) enthalten Bestimmungen für Fahrzeuge, ihre Systeme, Teile und Ausrüstungen in Bezug auf Sicherheits- und Umweltaspekte. Sie umfassen sowohl leistungsorientierte Prüfanforderungen als auch Verwaltungsverfahren. Letztere betreffen die Typgenehmigung, die Konformität der Produktion und die gegenseitige Anerkennung der von den Vertragsparteien erteilten Typgenehmigungen.

Die Typgenehmigungen werden für Fahrzeugsysteme, -teile und -ausrüstungen erteilt. Die Konformität der Produktion beschreibt die Mittel, mit denen die Hersteller nachweisen können, dass sie in der Lage sind, eine Reihe von Produkten herzustellen, die genau den Spezifikationen der Typgenehmigung entsprechen.

Eine UN-R ist eine spezifische Vorschrift, die von der Weltorganisation für Kraftfahrzeuge (WP.29) entwickelt wird, einem Gremium innerhalb der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE). UN-Rs legen technische Anforderungen für bestimmte Fahrzeugkomponenten oder -systeme fest, wie beispielsweise Bremsen, Beleuchtung oder Crashtests.

Diese Vorschriften sind oft auf spezifische Arten von Fahrzeugen oder Fahrzeugkategorien zugeschnitten und werden durch nationale Gesetzgebungen in den Mitgliedsstaaten der UNECE umgesetzt (UNECE, o.J.).

▶ UN-GTR: UN Global Technical Regulation

UN-GTRs enthalten weltweit harmonisierte leistungsbezogene Anforderungen und Prüfverfahren. Sie bieten einen vorhersehbaren Rechtsrahmen für die weltweite Automobilindustrie, die Verbraucher und ihre Verbände. Sie enthalten keine Verwaltungsvorschriften für Typgenehmigungen und deren gegenseitige Anerkennung.

Bei einer UN-GTR handelt es sich um einen globalen technischen Regulierungsstandard, der von der UNECE WP.29 für einen bestimmten Aspekt der Fahrzeugtechnologie entwickelt wurde. UN-GTRs sind breiter gefasst und können auf verschiedene Fahrzeugtypen oder Technologien anwendbar sein, nicht nur auf spezifische Bauteile. Sie sind darauf ausgerichtet, globale Harmonisierung zu fördern und Handelshemmnisse zu reduzieren, indem sie einheitliche technische Standards für bestimmte Aspekte von Fahrzeugen festlegen (UNECE, o.J.).

Wichtig hervorzuheben ist, dass eine UN-GTR kein Verfahren zur Typgenehmigung ist, sondern die der Typgenehmigung zu Grunde liegende Methode definiert.

▶ UN-Regeln

Die UN-Regeln betreffen die regelmäßige technische Überwachung von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen. Die Vertragsparteien erkennen dabei (unter bestimmten Bedingungen) die nach den UN-Regeln ausgestellten internationalen Prüfbescheinigungen gegenseitig an.

Hinsichtlich der Regulierung von Fahrzeugemissionen kann zusammengefasst werden, dass UN-Rs spezifische, detaillierte Vorschriften für bestimmte Fahrzeugkomponenten darstellen, so z.B. auch definierte Grenzwerte. UN-GTRs sind allgemeiner formulierte, global anwendbare technische Regulierungen für verschiedene Aspekte der Fahrzeugtechnologie, sodass die Definition von Grenzwerten der jeweiligen Regulierungsbehörde obliegt.

2.1.1 Ziele des WP.29

Insgesamt ermöglicht der vom WP.29 entwickelte Rechtsrahmen die Markteinführung innovativer Fahrzeugtechnologien bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verbesserung der weltweiten Fahrzeugsicherheit. Der Rahmen ermöglicht die Verringerung der Umweltverschmutzung und des Energieverbrauchs sowie die Verbesserung der Diebstahlsicherung.

Der gleiche Rechtsrahmen ist auch für die Förderung und Erleichterung des grenzüberschreitenden Handels von Bedeutung, da die Bestimmungen des Übereinkommens von 1958 die gegenseitige Anerkennung von Genehmigungen für Fahrzeugsysteme, -teile und -ausrüstungen vorsehen, die von anderen Vertragsparteien erteilt wurden. Die gegenseitige Anerkennung des gesamten Fahrzeugs ist im Rahmen des Übereinkommens von 1958 noch nicht möglich, auch wenn in den EU-Mitgliedstaaten Verfahren für die Typgenehmigung von Fahrzeugen für das gesamte Fahrzeug eingeführt wurden. Um diese Frage zu klären, hat die WP. 29 im März 2010 das Projekt Internationale Gesamtfahrzeug-Typgenehmigung (IWVTA) gestartet.

2.1.2 Organisation der WP.29

Das WP.29 hat sechs ständige Arbeitsgruppen (GR) eingerichtet, die sich mit speziellen Aufgaben befassen und aus Personen mit spezifischem Fachwissen bestehen:

Arbeitsgruppen (GRs) der WP.29

- ▶ GRBP: Working Party on Noise and Tyres
Arbeitsgruppe für Lärm und Reifen
- ▶ GRE: Working Party on Lighting and Light-Signalling
Arbeitsgruppe für Beleuchtung und Lichtsignalisierung
- ▶ GRPE: Working Party on Pollution and Energy
Arbeitsgruppe für Umweltverschmutzung und Energie
- ▶ GRVA: Working Party on Automated and Connected Vehicles
Arbeitsgruppe für Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge
- ▶ GRSG: Working Party on General Safety Provisions
Arbeitsgruppe für Allgemeine Sicherheitsbestimmungen
- ▶ GRSP: Working Party on Passive Safety
Arbeitsgruppe für passive Sicherheit

Innerhalb des WP.29 sowie der einzelnen GRs können zudem informelle Arbeitsgruppen (IWGs) mit einem zeitlich begrenzten Mandat eingerichtet werden, die sich gezielt mit bestimmten technischen Fragen befassen. Je nach Fall und Aufgabenstellung berichten diese Gruppen ihre Arbeit an eine der GR oder direkt an das WP.29. Informelle Arbeitsgruppen können in Untergruppen gegliedert sein, die detaillierte Aufgaben im Rahmen des Hauptmandats wahrnehmen.

Das WP.29 tritt im Rahmen sogenannter Sessions dreimal im Jahr zusammen (WP.29-Sitzungen finden normalerweise im März, Juni und November statt). Jede der WP.29-Arbeitsgruppen hält wiederum zwei Sitzungen pro Jahr ab, während die Sitzungen der informellen Arbeitsgruppen nach Regeln anberaumt werden, die in jeder von ihnen je nach ihren besonderen Bedürfnissen aufgestellt werden.

2.1.3 Regulierungsprozess und Dokumentation

► Regulierungsprozess

Im Allgemeinen werden Vorschläge an die WP.29 für neue Regelungsinstrumente wie UN-Regelungen, UN-GTR und UN-Vorschriften (oder die Änderung bestehender) von den Vertragsparteien eines der von der WP.29 verwalteten UN-Übereinkommen in den informellen Arbeitsgruppen (und ihren Untergruppen) ausgearbeitet und dann von den Gremien, denen sie Bericht erstatten, erörtert (in der Regel von den GR während einer ihrer Sitzungen und manchmal direkt von der WP.29). Schließlich werden die Vorschläge auf den Sitzungen der WP.29 (je nach UN-Übereinkommen durch den entsprechenden Ausschuss) zur endgültigen Genehmigung geprüft.

► Dokumente im Zusammenhang mit dem Regelungsprozess

Im Allgemeinen werden Regelungsvorschläge zunächst mit Hilfe von Dokumenten erörtert, die in den informellen Gruppen verteilt werden, und dann als informelle Dokumente dem zuständigen Gremium (den GR oder der WP.29 direkt) vorgelegt. Nach diesem Schritt werden die Vorschläge als offizielle Arbeitsdokumente (manchmal auch als offizielle Dokumente oder Arbeitsdokumente bezeichnet) von demselben Gremium geprüft und schließlich, wiederum als offizielle Arbeitsdokumente, der WP.29 zur Prüfung und Annahme vorgelegt.

Etwa drei Monate vor jeder Sitzung der WP.29 und ihrer Arbeitsgruppen wird eine Tagesordnung verteilt. Darin sind alle offiziellen Dokumente, die erörtert werden sollen, sowie andere relevante Punkte, die in Betracht gezogen werden, aufgeführt. Das Sekretariat der UNECE erstellt einen Bericht über die Beschlüsse und Ereignisse während der Sitzung, in dem auch die Aktualisierungen der Tagesordnung berücksichtigt werden, und verteilt diesen nach Abschluss der Sitzung.

► Andere informelle Dokumente

Zusätzliche informelle Dokumente wie Präsentationen und Broschüren, die Informationen zu den während der Sitzungen geführten Diskussionen enthalten, sowie Informationen über Sitzungen informeller Gruppen, die in Verbindung mit den Hauptsitzungen abgehalten werden, können der WP.29 und ihren Arbeitsgruppen vorgelegt werden.

2.2 Regulierung von Fahrzeugen in der EU

Die Regulierung von Fahrzeugen in der Europäischen Union (EU) erfolgt durch einen umfassenden rechtlichen Rahmen, der verschiedene Aspekte der Fahrzeugleistung, Sicherheit, Umweltauswirkungen und Verbraucherschutz abdeckt und durch die nachfolgend beschriebenen Instrumente umgesetzt wird. Aktuell gültig ist dazu die EU-Verordnung (EU) 2019/1020 (2019).

► EU-Typgenehmigungsbehörden:

Jeder Mitgliedsstaat hat eine oder mehrere Typgenehmigungsbehörden, die für die Überwachung der Einhaltung der Standards verantwortlich sind. Sie führen Prüfungen durch und stellen sicher, dass Fahrzeuge den erforderlichen Anforderungen entsprechen.

► Typgenehmigung:

Fahrzeuge müssen eine Typgenehmigung erhalten, bevor sie in der EU verkauft werden dürfen. Dieser Prozess stellt sicher, dass Fahrzeuge die EU-Vorschriften für Sicherheit, Umweltschutz und andere relevante Standards erfüllen. In Deutschland erfolgt die Erteilung einer Typgenehmigung durch das Kraftfahrtbundesamt (Kraftfahrt-Bundesamt, o.J. a).

► EU-Fahrzeugrichtlinien:

Es gibt verschiedene EU-Richtlinien, die spezifische Aspekte von Fahrzeugen vorschreiben, einschließlich der Sicherheitsanforderungen, Emissionsstandards und des Verbraucherschutzes. Diese Richtlinien sind durch die Mitgliedsstaaten in das nationale Recht zu integrieren.

► Emissionsstandards:

Die EU legt strenge Emissionsstandards für Fahrzeuge fest, um die Gefährdung von Lebewesen und der Umwelt zu reduzieren. Dies betrifft insbesondere Abgasemissionen von Verbrennungsmotoren, aber auch antriebsferne Emissionen, wie dem Abrieb aus Reifen und Bremsen.

► CO₂-Standards:

Die EU setzt CO₂-Standards für Fahrzeuge, um den Treibhausgasausstoß zu reduzieren und die Gesamteffizienz des Fahrzeugbestands zu verbessern. Hersteller müssen sicherstellen, dass der durchschnittliche CO₂-Ausstoß ihrer Flotte bestimmten Zielen entspricht.

► Verbraucherschutz:

Es gibt Vorschriften, die den Verbraucherschutz in Bezug auf Fahrzeugverkauf und -reparatur regeln. Dazu gehören auch Richtlinien zu Garantien und Rückrufen bei Sicherheitsproblemen.

► Europäisches Netzwerk für Marktüberwachung:

Es gibt ein Netzwerk für Marktüberwachung, das sicherstellt, dass bereits in Verkehr gebrachte Fahrzeuge weiterhin den Standards entsprechen. Hierzu gehören regelmäßige Prüfungen der Fahrzeuge, aber auch Rückrufe und die Möglichkeit der Sanktionierung (Kraftfahrt-Bundesamt, o.J. b).

In Deutschland wird diese sogenannte „In-Service Conformity“ (ISC), also die fortbestehende Konformität zugelassener Fahrzeuge nach einem gewissen Alter oder einer bestimmten Laufleistung wird durch das KBA durchgeführt, welches dazu jährliche Ergebnisberichte veröffentlicht.

Weiterhin sind Technische Dienste befähigt und befugt, einen weiteren Teil der ISC prüfen, wie z.B. die regelmäßige Abgasuntersuchung bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.

► Wiederkehrende Untersuchung:

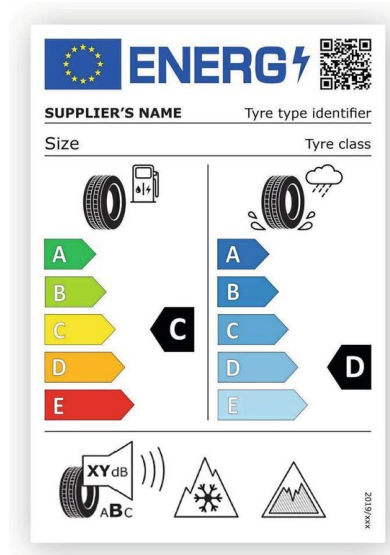
Als womöglich bekanntestes Instrument zur Fahrzeugregulierung auf EU-Ebene besteht die Pflicht der wiederkehrenden Untersuchung aller im Verkehr befindlicher Fahrzeuge, der sogenannten „Periodical Technical Inspection“ (PTI). In Deutschland werden diese durch die Technischen Dienste abgewickelt und umfassen die regelmäßige Durchführung der Haupt- und Abgasuntersuchungen bei Fahrzeugen (DEKRA Automobil GmbH, 2018).

Der Gesetzgebungsprozess und die Überwachung der Einhaltung sind kontinuierliche Prozesse, die von verschiedenen EU-Institutionen und den Mitgliedsstaaten gemeinsam verwaltet werden, um sicherzustellen, dass Fahrzeuge in der EU den höchsten Standards in Bezug auf Sicherheit, Umweltschutz und Verbraucherschutz entsprechen.

2.3 EU-Reifenlabel

Seit dem Jahr 2012 ist es in der EU gesetzlich vorgeschrieben, dass PKW-Reifen, ähnlich wie bspw. Elektrogeräte, für Endverbraucherinnen*Endverbraucher mit einem speziellen Label versehen werden. Dieses Reifenlabel soll es Endverbraucherinnen*Endverbraucher ermöglichen, die wichtigsten Eigenschaften der Reifen bewertend zu erfassen. Neben Basisinformationen zur Produktbezeichnung und der Dimension des Reifens waren dabei zunächst nur Informationen zur Kraftstoffeffizienz, der Nasshaftung (konkret dem Bremsweg bei Nässe) und dem Abrollgeräusch angegeben. Die entsprechende EU-Verordnung wurde inzwischen überarbeitet und durch die EU-Verordnung (EU) 2020/740 (2020) ersetzt. Mit dieser Verordnung enthält das Reifenlabel weitere Informationen mit Symbolen, welche über einen Link weitere Informationen zur Verfügung stellen und angeben, ob der entsprechende Reifen für die Nutzung im Winter zugelassen ist.

Abbildung 2: Das aktuelle EU-Reifenlabel



Quelle: Verordnung (EU) 2020/740

Die Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für das aktuelle Reifenlabel, auf dem alle Informationen dargestellt sind. Sommerreifen weisen im unteren Bereich des Labels lediglich auf die Angaben zum Abrollgeräusch hin.

Nachfolgend sind die auf dem Reifenlabel verfügbaren Informationen zusammengefasst:

Angaben auf dem aktuellen EU-Reifenlabel

Angaben für Endverbraucherinnen*Endverbraucher zur Bewertung der:

- ▶ Kraftstoffeffizienz: in Bewertungsklassen A–E
- ▶ Nasshaftung: in Bewertungsklassen A–E
- ▶ Abrollgeräusch: in Bewertungsklassen A–C

weitere Angaben:

- ▶ QR-Code mit Link zur EU-Produktdatenbank EPREL
- ▶ ggf. Schneeflockensymbol zur Kennzeichnung von Winter- und Ganzjahresreifen und Eissymbol zur Kennzeichnung von Reifen mit erhöhter Eisgriffigkeit

2.4 Voraussichtlicher Regulierungsrahmen für die Beschränkung von Reifen- und Bremsenabrieb

Entsprechend der aufgezeigten Strukturen und Instrumente für die Regulierung von Fahrzeugen sind für die Entwicklung einer zukünftigen Regulierung der Emissionen aus Fahrzeugreifen und –bremsen die Arbeitsgruppen GRBP und GRPE des WP.29 der UNECE zuständig.

Bezüglich der Reifenemissionen wurde von der GRBP und GRPE eine gemeinsame Task Force gegründet, welche sich mit dem Abriebverhalten von Reifen auseinandersetzt. Diese „Task Force on Tyre Abrasion“ (TFTA) nahm im Frühjahr 2022 ihre Arbeit auf und hat inzwischen einen finalen Stand des Regulierungsrahmens vorgelegt. Die nachfolgenden Aussagen zum Regulierungsprozess beziehen sich gemäß Kap. 1 Aufgabenstellung grundsätzlich auf den Bearbeitungszeitraum des Projektes bis Ende Januar 2023 und damit nicht auf den Stand zur Veröffentlichung des Abschlussberichts.

▶ Regulierungsrahmen für Reifenabrieb

Die Methode zur Messung von Reifenabrieb wird als Anhang der UNECE-R.117 verfasst werden, sodass der bisherige Gültigkeitsbereich dieser Regelung bzgl. der einheitlichen Genehmigung von Fahrzeugreifen hinsichtlich der Geräuschemissionen, der Haftung bei Nässe sowie des Rollwiderstandes um die Abriebeigenschaften der Reifen erweitert wird. Diese werden als Abriebrate (AR) durch den Abrieb in [mg] pro gefahrenen Kilometer beschrieben. Somit wird der Masseverlust des Reifens charakterisiert.

Durch die Erweiterung der UNECE-R.117 erfolgt demnach ein Genehmigungsverfahren von Fahrzeugreifen auf der Komponentenebene und findet somit auch für den Verbrauchermarkt (nachfolgend: Aftermarket) unmittelbare Anwendung.

Ursprünglich sollte zusätzlich das EU-Reifenlabel um eine Kennzeichnung für die AR eines Reifens erweitert werden. Zum Stand dieses Berichts ist dies jedoch nicht final definiert worden; hingegen wird eine indirekte Kennzeichnung der AR durch die Angabe einer zu erwartenden Lebensdauer des Reifens diskutiert. Hierfür spricht, dass es im Gegensatz zur Abriebrate eine verständlichere Angabe darstellt. Zu diskutieren bleibt dennoch, ob eine Klassifizierung der AR anhand einer bereits etablierten Bewertungsskala von A–E ggf. zielführender hinsichtlich des Interesses und der Akzeptanz der Endverbraucherinnen*Endverbraucher ist.

Für die gesetzestvorbereitenden Maßnahmen von Bremsenemissionen wurde innerhalb der UNECE GRPE eine informelle Arbeitsgruppe des „Particle Measurement Programs“ gegründet, welche fortan als UNECE GRPE PMP IWG bezeichnet wird. Zwischenzeitlich konnte der gesetzliche Rahmen für die Regulierung von Bremsenemissionen durch die PMP final definiert werden.

► Regulierungsrahmen für Bremsenemissionen

Die Methode zur Messung von Bremsenemissionen ist als UN-GTR verfasst worden, sodass sie als Referenz bzw. Ausgangsbasis für eine entsprechende Erweiterung einer Euro-Norm herangezogen werden kann, um die Gesamtemissionen von Fahrzeugen zu regulieren und damit schlussendlich zu minimieren. Somit erfolgt ein Genehmigungsverfahren von Fahrzeugen hinsichtlich der Bremsenemissionen auf der Fahrzeugebene.

Durch diese Herangehensweise ist eine Teilabdeckung des Aftermarkets derart gegeben, dass diese auf Fahrzeugebene erfolgen kann. Eine Aftermarket-Lösung auf der Komponentenebene besteht zum Stand dieses Berichts noch nicht.

2.5 Analyse und Bewertung des Regulierungsrahmens und Ausblick

Die Beschreibung der Regulierungsansätze macht deutlich, dass kein gemeinsamer Ansatz für Brems- und Reifenemissionen gefunden wurde, der eine Regulierung auf Gesamtfahrzeugebene vs. Komponentenebene den Vorzug gibt. Während der Reifen als Einzelkomponente mit einem Grenzwert für die Hilfsgröße Abriebrate (AR) durch Masseverlust in [mg] pro gefahrenem Kilometer reguliert wird, gilt für die Bremse ein Regulierungsgrenzwert auf Gesamtfahrzeugebene durch rechnerische Summation von Messungen auf einem Komponentenprüfstand.

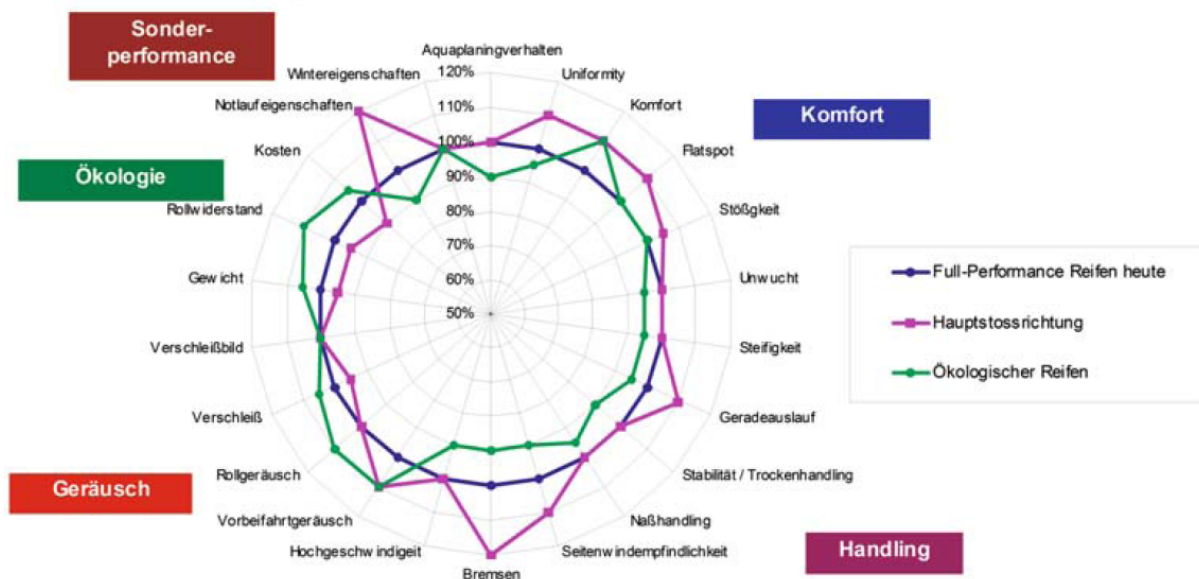
Grundsätzlich ist für jede Form eines Regulierungsrahmens ein geeigneter Kompromiss zu finden zwischen Genauigkeit, Reproduzierbarkeit, Eliminierung von externen Fehlereinflüssen, und einem damit einhergehenden Abstraktionsgrad und andererseits der Realitätsnähe der Untersuchungsbedingungen. Dies trifft nicht nur auf Mobilitätsthemen zu; ist aber aufgrund der Diskussionen im Bereich der Verbrennungsmotorischen Abgasemissionen vor dem Hintergrund der RDE (Real Driving Emissions) besonders zu beachten. Während für den Bremsenabrieb der Weg über eine Prüfstandsmessung unter stark abstrahierten Bedingungen zugunsten hoher Vergleichbarkeit, Reproduzierbarkeit und Übertragbarkeit für eine Einzelbremse gegangen wird (vgl. Kap. 4.2), wird für die Bestimmung der Abriebrate eines Reifens die Hilfsgröße Masseverlust aus einem Prüfzyklus im Konvoiversuch mit Ausmittlung störender Nebeneinflüsse (vgl. Kap 3.2) gewählt.

Das übergeordnete Ziel einer NEE Regulierung muss die Verringerung der Eintragung von Partikelemissionen in die Luft und die Reduzierung von Umweltbelastungen sein. Ferner sollte eine Regulierung auch immer ein Anreizsystem für Technologieweiterentwicklungen und im besten Fall sogar Technologiesprünge sein.

Für den Bremsenabrieb können einzelne Maßnahmen wie beschichtete Scheiben, veränderte Beläge, stärkerer Anteil des regenerativen Bremsens an der Gesamtverzögerung oder auch durch Filterung aktiv/passiv reproduzierbar Verbesserungen bzgl. Emissionsminimierung darstellen. Ebenso lässt sich – wenn auch mit Aufwand verbunden – durch Untersuchungsreihen aufzeigen und bewerten, ab welcher Fahrzeugklasse in Verbindung mit dem Gesamtgewicht oben genannte Maßnahmen erforderlich sind, um den Grenzwert zu erreichen und ggf. zu unterbieten. Gegenläufig sind in nahezu allen Fällen die Kosten, so dass sich selbstverständlich Kosten-/Nutzen-Überlegungen der Fahrzeughersteller OEM's in Verbindung mit den Lieferanten der Bremssysteme (Tier 1 / 2) anschließen werden. Auf mögliche zukünftige Verschärfungen der Grenzwerte wird in dieser Weise reagiert werden können bzw. müssen.

Komplexer stellt sich diese Abhängigkeit für den Reifen dar, weil unterschiedliche Reifeneigenschaften aufgrund physikalischer und chemischer Wechselwirkungen immer im Zielkonflikt zueinanderstehen. So sind Zielkonflikte zwischen den Reifeneigenschaften Lärm, Rollwiderstand und Nassgriff bekannt und lassen sich im Normalfall nicht vollständig auflösen. Diese Zielkonflikte werden in der Regel in einer sogenannten Zielspinne dargestellt (Abbildung 3). Damit kann in der Entwicklung des Reifenherstellers in der Regel nicht eine Eigenschaft isoliert betont werden, sondern immer eine Balancierung der sich physikalisch infolge der tribologischen Prozesse zwischen Gummireifen und rauer Asphalt-/Beton-Fahrbahn Eigenschaften gefunden werden. Die gegenläufige Tendenz zur Kostensteigerung ist auch für den Reifen feststellbar.

Abbildung 3: Zielkonflikte und Bewertungskriterien in der Reifenentwicklung - „Zielspinne“



Quelle: Leister, 2015

Folglich ist aller Voraussicht nach nicht damit zu rechnen, dass die Regulierung von Reifenabrieb zu einer Familie von Abriebraten-optimierten Reifen führen wird, weil die einhergehende Verschlechterung der Eigenschaften wie Reifen-/Fahrbahn-Geräusch, Rollwiderstand und Nassgriff nicht akzeptabel sein wird. Ein Technologiesprung wie er in den neunziger Jahren in die Reifentechnik Einzug hielt, als durch die Einführung von Silica der Füllstoff Ruß ersetzt wurde und insbesondere die Nassgriffeigenschaften erhöht wurden (Bachmann, 1998), ist aktuell nicht zu erwarten.

Auch stehen aus heutiger Sicht – ohne detaillierte Kenntnis der Gummimischungsparameter in der Lauffläche eines modernen Pkw-Reifens – keine bekannten technischen Maßnahmen zur Verfügung, die eine sprunghafte Minimierung des Masseverlusts eines Reifens erwarten lassen. Durch den „Market Survey“ (vgl. Kap 3.2) wird zudem ein Niveau vergleichbar mit einer Klasse von Reifen definiert werden, um das einzelne Reifen je nach Hersteller / Reifentyp / Entwicklungsrichtungen in einer gewissen Bandbreite nach oben und unten streuen werden. Gleichwohl lässt die Regulierung der Abriebraten zumindest eine Reduktion der Emissionen durch Reifenabrieb über mehrere Reifengenerationen hinweg erwarten. In Abbildung 3 ist mit der Bezeichnung „Ökologischer Reifen“ unter der Rubrik „Verschleiß“ eine Stoßrichtung angegeben; die einhergehenden Verschlechterungen anderer Eigenschaften ist ebenfalls ablesbar.

3 Reifenabrieb

3.1 Aktivitäten der UNECE GRBP/GRPE TFTA

Im Folgenden wird der Terminus Reifenabrieb verwendet. Häufig wird auch in der Übersetzung des englischen Begriffs „Tire wear“ das Wort Reifenverschleiß verwendet; dennoch wird hier aus Vereinheitlichungsgründen Reifenabrieb benutzt.

Nachfolgend sind die bisherigen Aktivitäten der UNECE GRBP/GRPE TFTA zusammengefasst, die im Februar 2022 ihre Arbeit aufgenommen hat. Zum hier berichteten Stand zum Ende des Projekts haben 18 Sitzungen (Sessions) stattgefunden, in denen eine Methode zur Messung von Reifenabrieb im realen Fahrbetrieb von PKW erarbeitet wurde. In einem parallelen Prozess wird an der repräsentativen Messung des Reifenabriebs in stationären Prüfumgebungen gearbeitet, um sowohl die Umweltbelastungen durch die Abriebtests als auch den Gesamtaufwand der Methode zu reduzieren.

Einige Stakeholder haben im Rahmen der ersten Sessions ihre jeweiligen Methoden zur Messung von Reifenabrieb unter Realbedingungen als auch in Prüfstandsumgebungen vorgestellt, u.a. der ADAC e.V., die „European Tyre and Rim Technical Organisation“ (ETRTO), Applus IDIADA und die JATMA/JASIC. Innerhalb des Gremiums wurden die darin vorgestellten Ansätze diskutiert, um eine einheitliche und umfassende Methode zu generieren. Dazu zählen die Definition notwendiger Randbedingungen, Vorgaben zur Durchführung der Testkampagnen sowie der Verarbeitung der gewonnenen Daten (ETRTO 2022).

Innerhalb der TFTA wurden weitere Arbeitsgruppen, sogenannte „Subgroups“ gegründet, um einzelne spezifische Aufgaben in kleineren Gremien zu erfüllen:

► Small Group

Die „Small Group“ wurde im September 2022 gegründet, um die Inhalte der von Stakeholdern vorgestellten Methoden durch Experten qualitativ zu bewerten und ggf. geeignete Ansätze zu einer gesamtheitlichen Methode zu kombinieren. Weiterhin wurde sie mit der Entwicklung einer geeigneten Testkampagne beauftragt, welche zum Zeitpunkt dieses Berichts durchgeführt wird und noch nicht abgeschlossen ist.

► Drafting Groups

Ende März / Anfang April 2023 wurde eine „Drafting Group“ zur Weiterführung der Erarbeitung eines Dokumentes gegründet, in welchem die erarbeitete Methode zur Messung von Reifenabrieb unter Realbedingungen inkl. aller Randbedingungen zusammengefasst ist. Der erste Entwurf dieses Dokumentes wurde der TFTA im Juli 2023 vorgestellt und wird seitdem konsequent weiterentwickelt. Das Ziel war es, dem übergeordneten Gremium (GRBP) im 1. Quartal 2024 ein vollständig ausgearbeitetes Dokument vorzustellen und dort anzunehmen.

Parallel zur dieser „Drafting Group“ wurde eine weitere Gruppe gegründet, welche sich mit der Erarbeitung eines Dokuments zur Messung von Reifenabrieb unter Laborbedingungen beschäftigt.

► Post Processing Group

Die „Post Processing Group“ wurde im Juni 2023 gegründet und beschäftigt sich mit der Verarbeitung und Auswertung der innerhalb der Testkampagnen gewonnen Messdaten. Ziele der Gruppe sind vorwiegend die Validierung der Testkampagnen sowie die Entwicklung geeigneter Verfahren und Randbedingungen, um die nach den Vorgaben der Methode

aufgezeichneten Messdaten einheitlich und korrekt auszuwerten. Die Ergebnisse dieser Gruppe fließen wiederum in die Drafting Group ein, um innerhalb der Methode zu definieren, wie die gewonnenen Messdaten zu behandeln und verarbeiten sind.

3.2 Analyse des Entwurfs der Methode zur Bestimmung von Reifenabrieb der UNECE GRPE/GRBP TFTA

Der zum Stand zum Ende des Projekts vorliegende Entwurf entspricht dem in der 18. Session der TFTA vorgestellten „Working Document“. Dieser soll die UNECE R.117 als Anhang Nr. 10 erweitern.

Der Entwurf beinhaltet zunächst formale Aspekte sowie den Anwendungsbereich der beschriebenen Methode. Unter den Formalitäten werden Vorschläge für Anpassungen und Ergänzungen der Definitionen und Begrifflichkeiten in der übergeordneten UNECE R.117 beschrieben. Der Anwendungsbereich des Entwurfs umfasst zunächst nur die Reifen für PKW, der sogenannten C1-Klasse.

Ein besonders relevanter Punkt ist die ab Juli 2025 vorgesehene verpflichtende Angabe des Abriebverhaltens von Reifen seitens der Hersteller für im Rahmen der UNECE R.117 geprüfte und konforme Reifen.

Der Hauptteil des Entwurfs besteht aus der Beschreibung der Prüfmethoden zur Bestimmung des Abriebverhaltens von Reifen. Dabei werden zwei wesentliche Ansätze unterschieden: Zum einen die Durchführung von Fahrzeugtests im öffentlichen Straßenverkehr, zum anderen die Durchführung von Komponententests der Reifen auf stationären Trommelprüfständen. Beide Methoden werden nachfolgend zusammengefasst beschrieben und analysiert, um das Abriebverhalten von Reifen gemäß den Bestimmungen der UNECE R.117 präzise und aussagekräftig bewerten zu können.

3.2.1 Abriebratenbestimmung im realen Straßenverkehr

Der erste Teil des Entwurfs befasst sich mit der Durchführung von Abriebmessungen im realen Straßenverkehr. Zur qualitativen Bewertung des Abriebverhaltens wird die Nutzung und zeitgleiche Messung eines Referenzreifens vorgeschrieben. Der Referenzreifen dient zur Egalisierung von „äußeren“ Einflüssen. Das Ergebnis der Abriebmessung wird als Mittelwert über alle vier Reifen eines Fahrzeugs gebildet. Die Methode unterscheidet grundsätzlich zwischen „Normal use“, „Snow“ und „Special use“ Reifen und gibt vor, dass je ein Referenzreifen für diese Kategorien zu nutzen ist.

Zunächst wurden die nachfolgend genannten Messgrößen als Zielwerte definiert:

Grundlegende Messgrößen der Methode

Angaben zu einem Referenzreifen beziehen sich jeweils auf den Referenzreifen für Sommer- und Winterreifen.

Angaben zu einem Reifen beziehen sich sowohl auf Prüf- als auch auf Referenzreifen.

- | | |
|---|-----------------|
| ► Masse eines Reifens zu Beginn und nach der Messkampagne | in [g] |
| ► Sensitivität des Referenzreifens auf die Außentemperatur | in [mg/km/t/°C] |
| ► min. und max. AR des Referenzreifens während der Messkampagne bei jeweils 10°C und 20°C | in [mg/km/t] |
| ► Gesamtprüfdistanz eines Reifens | in [km] |

| | |
|--|--------------|
| ► AR eines Reifens unter Prüfbedingungen | in [mg/km] |
| ► AR eines Reifens unter Prüfbedingungen normalisiert auf die Fahrzeugmasse in Tonnen | in [mg/km/t] |

3.2.1.1 Allgemeine Vorgaben

Im Rahmen der Methode werden zur Durchführung der Messungen Fahrzeuge aller Antriebsarten in Betracht gezogen, wobei sowohl die Unterschiede der Antriebsart (Verbrenner, Hybrid- oder reines Elektrofahrzeug) als auch Kraftübertragung (Frontantrieb, Heckantrieb, Allradantrieb) berücksichtigt werden. Die Durchführung der Versuchs- und Messfahrten findet in Konvois statt, die aus 2 bis 4 Fahrzeugen bestehen dürfen. Innerhalb eines Konvois müssen die Fahrzeuge mind. ein einheitliches Antriebskonzept vorweisen und, falls es die Auswahl der zu prüfenden Reifen (-dimensionen) ermöglicht, dem gleichen Modell entsprechen. Wenn unterschiedliche Fahrzeugmodelle eingesetzt werden, gilt es definierte Vorgaben bezüglich der Luftwiderstandskoeffizienten der Fahrzeuge zu berücksichtigen.

Dabei wird stets ein nachfolgend "Referenzfahrzeug" genanntes Fahrzeug mit dem jeweiligen Referenzreifen (Sommer- oder Winterreifen) ausgestattet, um äußere Einflüsse auf die Messung, wie z.B. durch Schwankungen der Außentemperatur oder der Fahrbahnoberfläche, innerhalb des Konvois bewerten zu können. Um eine gleichmäßige Belastung der Reifen innerhalb des Konvois zu gewährleisten, erfolgt eine Rotation der Fahrzeugpositionen und der Fahrerinnen* Fahrer in regelmäßigen Abständen. Diese soll möglichst gleichverteilt sein, wobei eine Abweichung von 10% zulässig ist.

Die zu testenden Reifen dürfen ausschließlich auf für die jeweilige Dimension zugelassenen Felgen montiert werden. Für die Referenzreifen (17") ist eine Felgenbreite von 7,5" vorgeschrieben. Die genutzten Felgendimensionen sind ebenso wie sämtliche Details zu den Reifen zu protokollieren.

Die Prüfdistanz beträgt gemäß dem aktuellen Stand 8.000 km mit einer zulässigen Abweichung von +/- 300 km. Prüfdistanzen außerhalb dieses Bereichs gelten als ungültig. Es existieren klar definierte Regelungen für den Umgang mit Unfällen und Streckenänderungen während der Prüfung, um sicherzustellen, dass solche Ereignisse ordnungsgemäß behandelt werden und keinen Einfluss auf die Messergebnisse haben.

3.2.1.2 Messgeräte und Instrumentierung

Für die zu verwendenden Messgeräte und die Instrumentierung der Fahrzeuge sowie die zur Erhebung von Messdaten geltenden Randbedingungen und Verfahrensweisen sind die nachfolgenden Vorgaben definiert worden.

Massebestimmung der Reifen (mit und ohne Felge)

Zur Wägung der Reifen ist eine Gewichtswaage mit einer Genauigkeit von mind. +/- 2 g vorgeschrieben.

Nachfolgend ist ein überschlägiges Beispiel zum Fehlereinfluss dieser Genauigkeitsvorgabe dargestellt:

Beispiel des Fehlereinflusses

Überschlägige Abschätzung des Fehlereinflusses einer Gewichtswaage auf die Bestimmung der AR eines Reifens

Annahmen:

| | |
|--|-------------------|
| ► Masse eines Reifens der Dimension 205/55R16 | 9.000 g |
| inkl. Felge (luftleer) | 17.000 g |
| ► Auflösung der Gewichtswaage | +/- 2 g |
| ➔ Systematischer Messfehler bei Massebestimmung des Reifens: | <u>ca. 0,022%</u> |

Annahmen:

| | |
|---|------------------|
| ► AR eines Reifens der Dimension 205/55R16 | 30 mg/km |
| ➔ Systematischer Messfehler bei AR-Bestimmung nach 2.500 km | <u>ca. 2,51%</u> |
| nach 8.000 km | <u>ca. 0,8%</u> |

Die Prüflinge sind vor einer Wägung stets sorgfältig zu trocknen und zu reinigen, um Fehler- einflüsse durch bspw. in den Profilblöcken eingeklemmte Steine oder Verschmutzungen auf der Felge zu vermeiden. Für die Bestimmung der Abriebmasse des Reifens vor und nach der Gesamt- distanz wird lediglich der Reifen ohne Felge gewogen.

Für Messungen während der Testdistanz wird im Unterschied dazu das komplette Rad ver- wogen. Für die Wägung eines auf einer Felge montierten Reifens (inkl. der montierten Wucht- gewichte) ist der Ventilstift zu entfernen, um einen Druckausgleich sicherzustellen. Das zu protokollierende Ergebnis einer Wägung wird aus drei Wiederholungsmessungen gemittelt.

Vorgaben zu den Randbedingungen dieser Mittelwertbildung existieren (bisher) nicht, sodass grobe Messfehler das Ergebnis stark verfälschen können. Verschärft wird dieses Risiko dadurch, dass die Einzelergebnisse der Wiederholungsmessungen oder die Standardabweichung der Messwerte nicht protokolliert werden müssen.

Fahrwerks- und Fahrzeugeinstellungen

Die Prüfeinrichtung zur Einstellung der Radstellungsgrößen (Spur- und Sturzwinkel) des zur Messung verwendeten Fahrzeugs müssen eine Genauigkeit von +/- 0,033° aufweisen.

In Abhängigkeit der Antriebsart des jeweiligen Fahrzeuges sind unterschiedliche Zielwerte oder -korridore einzuhalten. Diese sind spezifisch für verschiedene Antriebsarten achsweise definiert und in der

Tabelle 1 zusammengefasst. Falls Fahrzeuge mit Allradantrieb zur Vervollständigung eines Konvois mit nur einer angetriebenen Achse genutzt werden, sind die entsprechenden Werte der achsweisen Antriebe zu nutzen. Sollten die vorgegebenen Wertebereiche außerhalb der für das jeweilige Fahrzeug zulässigen Wertebereiche liegen, sind Ausnahmeregelungen definiert (UNECE GRBP/GRPE TFTA, 2023).

Tabelle 1: Vorgaben für einzustellende Radstellungsgrößen

| Antriebsart | Spurwinkel [°] | | Sturzwinkel [°] | |
|-------------|---------------------------------------|------------|-----------------|------------|
| | VA | HA | VA | HA |
| FWD | $0 \pm 0,1^{1)}$ $0 \pm 0,05^{2)}$ | 0,05..0,15 | -1,2..0 | -1,9..-0,6 |
| RWD & AWD | $0 \pm 0,1^{1)}$ $0 \pm 0,05^{2)}$ | 0..0,1 | 0..0,1 | 0..0,1 |

¹⁾ Werte für mit Prüfreifen ausgerüstete Fahrzeuge

²⁾ Werte für mit Referenzreifen ausgerüstete Fahrzeuge

Die Messungen müssen innerhalb von jeweils 50 km nach Beginn sowie nach Beendigung der Messkampagne erfolgen. Eine Zwischenmessung nach der Hälfte der zu absolvierenden Prüf-
distanz ist freiwillig möglich. Die Grenzen für zulässige Abweichungen von den ursprünglichen,
bzw. vor Beginn einer Prüfprozedur gemessenen Werten sind ebenfalls definiert.

Weiterhin muss die Wägeeinrichtung zur Bestimmung der Fahrzeugmasse eine Genauigkeit von
+/- 0,1% des Messwertes aufweisen.

Das für eine Prüfprozedur einzusetzende Fahrzeug muss hins. der zu prüfenden Reifen defin-
ierte Vorgaben zur statischen Radlast, der Massenverteilung zwischen VA und HA sowie der
Gesamtmasse erfüllen. Diese sind in Abhängigkeit des für den jeweiligen Reifen angegebenen
Traglastindex innerhalb eines vorgegebenen Korridors einzustellen, bspw. durch Zusatzmassen
in Form von Personendummys oder Sandsäcken. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Fahrzeu-
gmasse inkl. der Berücksichtigung des Gewichtes von 1,5 Personen einen Anteil von 85% der
max. zulässigen Beladung des Fahrzeugs nicht übersteigt.

Sowohl für die Messung der Fahrwerkseinstellungen als auch der Fahrzeugmasse ist das Fahr-
zeug stets vollzutanken und hat die für die montierten Reifen vorgeschriebenen Radlasten (s.
Tabelle 2) vorzuweisen.

Tabelle 2: Vorgaben für einzustellende Fahrzeugmassen und Radlasten

| Antriebsart | Masse Fzg. ¹⁾ | Radlast VA ²⁾ | Radlast HA ²⁾ |
|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| FWD | 67 ± 7 | 56 ± 7 | 44 ± 7 |
| RWD & AWD | 67 ± 7 | 50 ± 7 | 50 ± 7 |

¹⁾ Werte in Prozent der aufsummierten zul. Traglast aller 4 Reifen

²⁾ Werte in Prozent der Gesamtfahrzeugmasse

Zudem muss die mittlere Masse der Fahrerinnen*Fahrer des Fahrzeugs während der
Prüfprozedur appliziert werden.

Fahrdynamische Größen

Zur Messung der fahrdynamischen Größen (Fahrzeuggeschwindigkeit, Längs- und Quer-
beschleunigung) sind GNSS-basierte Messgeräte zu verwenden, welche mind. eine Auf-
zeichnungsrate von 10 Hz vorweisen. Die Nutzung von Beschleunigungssensoren ist nicht
vorgesehen.

Reifendruckprüfung

Die Referenzreifen sowie Reifen mit erhöhter Traglast (HL, XL) sind stets mit einem Reifenfüll-
druck von 290 kPa zu beaufschlagen, Prüfreifen unabhängig von der Dimension mit 250 kPa. In

Ausnahmefällen ist der Reifenfülldruck gemäß geltender Standards in Abhängigkeit der nominalen Traglast einzustellen (UNECE GRBP/GRPE TFTA 2023).

Die Geräte zur Einstellung und Überprüfung des Reifenfülldrucks müssen eine Genauigkeit von ± 3 kPa aufweisen. Für die in der Methode festgelegten Fülldrücke von 250 kPa und 290 kPa ergibt sich demnach ein systematischer Messfehler von 1,03 – 1,2%.

Messung der klimatischen und aktuellen Witterungsbedingungen

Zur Messung der Außentemperatur während der Prüfprozedur ist das Bordinstrument des Fahrzeugs zu verwenden, wobei auch die Nutzung externer Thermometer erlaubt ist, solange das Thermometer eine Genauigkeit von mind. $\pm 1^\circ\text{C}$ vorweist.

Nur Erfassung der Außentemperaturen vor Beginn und nach Beendigung einer Messfahrt sind geeichte Thermometer zu nutzen. Die Außentemperatur muss bei den Messfahrten einen vorgegebenen Rahmen einhaltenden, sonst darf diese Fahrt nicht im Ergebnis berücksichtigt werden.

Zur Erfassung der Witterungsbedingungen ist im Falle von regennasser Fahrbahn die Einsatzdauer der Scheibenwischer zu erfassen und zu protokollieren. Ein Anteil der während der gesamten Prüfdistanz auf nassen Strecken gefahrenen Distanz von max. 20% ist zulässig. Bisher wird jedoch nicht berücksichtigt, dass die Nutzung des Scheibenwischers zum einen eine gewisse subjektive Entscheidungsfreiheit erlaubt, zum anderen ist die Fahrt auf nassen Fahrbahnen ohne zus. Regeneinfluss möglich, sodass das Abriebverhalten des Reifens zwar beeinflusst, dies aber nicht dokumentiert wird. Des Weiteren besteht hierbei durch aufgewirbelte Feuchtigkeit des jeweils vorausfahrenden Fahrzeugs innerhalb des Konvois ggf. eine Diskrepanz in der Nutzung des Scheibenwischers. Das Führungsfahrzeug muss bspw. bei einer Fahrt auf nasser Fahrbahn nicht zwingend den Scheibenwischer einschalten, die nachfahrenden Fahrzeuge jedoch schon. Für diesen Fall ist nicht definiert, wie der Einfluss der nassen Fahrbahn auf das Abriebverhalten dokumentiert oder bewertet wird.

Die Fahrt auf schneebedeckter oder vereister Fahrbahn ist nicht zulässig.

3.2.1.3 Prüfzyklus

Grundsätzlich ist die Methode auf allen öffentlichen Straßen anwendbar. Hinsichtlich der zu befahrenden Prüfstrecke gibt es jedoch definierte Vorgaben.

Strecke

Der Zyklus, der stets als geschlossene Schleife zu gestalten ist, muss sich mindestens über eine Distanz von 300 km erstrecken und ist innerhalb einer Schicht zu befahren. Diese Distanz kann auch durch entsprechende Wiederholungen einer kürzeren Schleife erzielt werden, welche dann wiederum in beide Richtungen befahren werden darf, solange diese gleich gewichtet sind.

Die Qualifikation eines Zyklus erfordert vorab eine Validierung unter der Verwendung der Referenzreifen. Falls der Zyklus ausschließlich für eine Reifenart (Sommer- oder Winterreifen) genutzt wird, ist die Validierung des Zyklus für die andere Art nicht notwendig.

Das sogenannte "Circuit Abrasion Level" zur Qualifikation des Zyklus wird innerhalb eines festgelegten Rahmens bei 20°C für Sommerreifen und 10°C für Winterreifen gemessen. Hierbei sind je Referenzreifen mindestens drei Messungen erforderlich, die bei Temperaturen durchgeführt werden, welche um mindestens 5°C voneinander abweichen. Für Sommerreifen ist mindestens eine Messung zwischen 15 - 25°C erforderlich, während für Winterreifen mindestens eine Messung zwischen 5 - 15°C erfolgt. Anschließend erfolgt eine lineare Regression der Messwerte auf 20°C (für Sommerreifen) bzw. 10°C (für Winterreifen), um während der eigentlichen Prüfkampagne den Einfluss der Temperatur auf das Abriebverhalten innerhalb eines Konvois zu berücksichtigen.

Die Gesamtdistanz des Zyklus darf innerhalb eines festgelegten Rahmens von maximal 10 km verändert werden. Diese Veränderung darf in bis zu 8 Einzelfahrten erfolgen, wobei der maximale Distanzunterschied je Einzelfahrt auf 30 km begrenzt ist.

Prüfzyklen und Fahrstil

Der zu gestaltende Zyklus muss über die bereits genannten Anforderungen die spezifischen Prüfzyklen "urban", "Landstraße" und „Autobahn“ umfassen. Dabei ist festgelegt, dass mindestens 35% der Gesamtdistanz auf Autobahnen zurückgelegt werden müssen, während sowohl „Landstraße“ als auch „urban“ jeweils mindestens 25% der Gesamtdistanz zurückzulegen sind, um eine möglichst realitätsnahe und somit durchschnittlich repräsentative Fahrweise abzubilden.

Die Bewertung des Fahrstils erfolgt anhand der Berechnung und Bewertung von Längs- und Querbeschleunigungen während einer Fahrt. Hierbei gibt es zunächst unterschiedliche Vorgaben für maximal zulässige Beschleunigungen für die jeweiligen Prüfzyklen. Nach einer Messfahrt erfolgt jeweils die Berechnung der Standardabweichung der gemessenen Längs- und Querbeschleunigungen je Prüfzyklus, welche ebenfalls innerhalb eines definierten Bereichs liegen muss. Eine Vorgehensweise um die einzelnen Streckenabschnitte einem Prüfzyklus zuzuordnen, existiert zum derzeitigen Stand des Dokuments noch nicht. Da Prüfzyklen jedoch nicht notwendigerweise von der befahrenen Straßenkategorie abhängen (so darf derzeit beispielsweise der Stadtstil auf der Landstraße simuliert werden), ist derzeit noch unklar, wie diese letztendlich zugeordnet werden können.

Des Weiteren existiert eine zulässige Höchstgeschwindigkeit, die während des Zyklus nicht überschritten werden darf. Diese Geschwindigkeitsbeschränkung auf 140 km/h trägt dazu bei, dass der Zyklus realitätsnahe Fahrsituationen widerspiegelt und die Messung des Reifenabriebs unter realistischen Bedingungen erfolgt.

Der Verschleiß wird nicht ausschließlich durch das Beschleunigungsprofil beeinflusst, sondern ebenfalls durch die Art der Fahrmanöver, bei denen diese Beschleunigungen auftreten. Der Nachweis der Übertragbarkeit der innerstädtischen Fahrweise auf Landstraßen steht noch aus, sodass die Repräsentativität der bisher definierten „Stadtfahrt“ anzuzweifeln ist. Es ist folglich eher als Ersatzverfahren anzusehen.

3.2.1.4 Prüfbericht

Für jeden geprüften Reifen ist ein Prüfbericht anzufertigen, der spezifische Angaben enthalten muss, von denen besonders wichtige nachfolgend aufgeführt sind.

► Angaben zum Prüfzyklus:

Hier sind spezifische Details zum Prüfzyklus anzugeben, einschließlich der anteiligen Länge je nach Fahrstil (Urban, Landstraße, Autobahn) sowie dem geografischen Ort des Zyklus.

► Beginn und Ende des Tests (Prüfzeitraum):

Der Zeitrahmen, in dem der Reifentest durchgeführt wurde, mit eindeutigen Angaben zum Beginn und Ende der gesamten Prüfprozedur.

► Eingesetzte Fahrzeuge:

Informationen zu den genutzten Fahrzeugen sowohl für den Prüfreifen als auch den zugehörigen Referenzreifen, einschließlich Fahrwerkseinstellungen, Felgengröße, Reifenfülldruck, Fahrzeugmasse und Radlasten.

► Detaillierte Angaben zum Reifen:

Spezifische Details zu jedem getesteten Reifen, wie Art (Sommer- oder Winterreifen), Hersteller, Modell, Dimension, Traglast, Nominalfülldruck und Seriennummer.

► Gesamtprüfdistanz je Reifen:

Die spezifische Angabe, welche Distanz für die Prüfung des Reifens insgesamt zurückgelegt wurde.

Zusätzlich ist der Anteil der Gesamtdistanz zu dokumentieren, der bei nasser Fahrbahn zurückgelegt wurde.

► Außentemperaturen:

Dokumentation der minimalen, maximalen und durchschnittlichen Temperaturen während des gesamten Testverlaufs.

► Angaben zu Längs- und Querschleunigungen

Hierbei sind sowohl die Nachweise zur Einhaltung der max. Beschleunigungslimits als auch die berechneten Standardabweichungen der Längs- und Querschleunigungen während der Fahrten als Maß für den Fahrstil zu dokumentieren.

Weiterhin ist der Anteil der Gesamtdistanz anzugeben, der unter der jeweils maximal gemessenen Längs- und Querschleunigung zurückgelegt wurde.

► Abriebrate

Die Angabe der gemessenen und auf das Fahrzeuggewicht normierten Abriebrate (AR) in [mg/km/t] für Prüf- und Referenzreifen bei der jeweils gemessenen mittleren Außentemperatur.

Zusätzlich werden Informationen zur Masse der Reifen zu Beginn und nach der zurückgelegten Prüfdistanz erfasst.

3.2.1.5 Datenverarbeitung

Hinsichtlich der Verarbeitung der aufgezeichneten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten gibt es ebenfalls definierte Vorgaben, um den Einfluss von Messfehlern in der Auswertung zu vermeiden.

Die gemessenen Rohdaten sind zunächst hinsichtlich möglicher Sprünge im Geschwindigkeitssignal zu filtern. Diese können sich bspw. aus der Fahrt durch Tunnel oder dicht bewaldete Straßen ergeben, in denen das Satellitensignal kurzzeitig unterbrochen ist. Anschließend werden die Daten mittels eines Butterworth-Filters gefiltert, um nicht plausible Werte zu eliminieren. Anschließend werden Beschleunigungswerte unterhalb einer Geschwindigkeit von 7 km/h aus der Auswertung eliminiert, da die bei diesen Geschwindigkeiten zurückgelegten Distanzen außerhalb der Genauigkeitstoleranzen liegen. Daraus ergibt sich die Problematik, dass fehlerhafte Beschleunigungen einen verhältnismäßig hohen Fehlereinfluss auf die Auswertung haben können, sodass sie entsprechend vorher eliminiert werden sollen. Abschließend werden die verbliebenen Längsbeschleunigungen nochmals mittels einer gleitenden Mittelwertbildung über 1s geglättet, die Daten der Querschleunigung entsprechend über 2s.

Zur Auswertung existieren innerhalb des aktuellen Stands der Methode einige vorgefertigte Bausteine zur Implementierung bzw. Auswertung mittels der Software „MathWorks MATLAB“, welche jedoch nur eingeschränkt verständlich sind. Dies ist vorrangig durch die inkonsistente, bzw. nicht eindeutige Variablenbezeichnung sowie der Nutzung vorgefertigter MATLAB-

Funktionen gegeben, aus der keine eindeutige Berechnungsvorschrift ersichtlich ist (UNECE GRBP/GRPE TFTA, 2023)

3.2.1.6 Zusammenfassung und kritische Punkte

Die beschriebene Methode der TFTA zur Bestimmung von Reifenverschleiß unter realen Bedingungen umfasst grundlegende Anforderungen an die Prüflinge (Reifen und Fahrzeuge), die Strecke und die Umgebungsbedingungen sowie Messeinrichtungen. Hierzu zählt eine detaillierte Beschreibung des Prüfablaufs sowie dabei einzuhaltender Rand- und Prüfbedingungen.

Die vorgeschlagene Normierung der Abriebrate (AR) auf die Gesamtmasse der Fahrzeuge (Normierung auf die jeweilige Radlast oder Gesamtmasse des Fahrzeugs) durch die Metrik [mg/km/t] soll gewährleisten, dass die AR eines Reifens unabhängig vom genutzten Prüffahrzeuges und seiner Masse bewertet werden kann. Die jeweilige Radlast, welche während der Fahrt auf den Reifen einwirkt, ist jedoch ein maßgeblicher Einflussfaktor auf den Abrieb, sodass schwerere Fahrzeuge unter vergleichbaren Bedingungen, also mit jeweils angepasstem Fülldruck, einen höheren Reifenabrieb erzeugen als leichtere Fahrzeuge. Durch die Normierung auf die Fahrzeugmasse wird dieser Effekt berücksichtigt, sodass die anzugebende AR eines Reifens für größere und schwerere Fahrzeuge wie bspw. SUVs oder Elektrofahrzeuge sich nur geringfügig von der eines Kleinwagens unterscheiden kann. Ein möglicher Ansatz, dem zu begegnen, wäre die AR anstelle des Bezugs auf die Gesamtmasse auf die zulässige Zuladung zu normieren. Diese Anpassung gewährleistet möglicherweise eine angemessene Korrektur für größere Fahrzeuge, ohne diese systematisch gleichzustellen oder zu bevorteilen. Zudem wäre ein positiver Effekt für die Reifen leichter Nutzfahrzeuge gegeben.

Bezüglich der Validierung einer Prüfstrecke wird das sogenannte „Circuit Abrasion Level“ (CAL) für die jeweiligen Referenzreifen ermittelt. Die Rahmenbedingungen für das CAL sind derzeit teilweise noch mit Platzhaltern versehen, was eine umfassende Bewertung der Methodik erschwert. Eine detaillierte Ausarbeitung dieser Bedingungen ist erforderlich, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten. Für eventuelle Abweichungen der Strecke, z.B. durch temporäre Baustellen, sind ebenfalls Randbedingungen formuliert worden. Weitere Auswirkungen auf den Zyklus werden jedoch zum jetzigen Stand nicht berücksichtigt, sodass Einflussfaktoren der gewählten Prüfstrecke, wie z.B. die Abnutzung oder Erneuerung der Fahrbahnoberfläche nicht quantifizierbar sind. Derartige Umstände werden durch die Konvoifahrt nicht abgedeckt. Daher wurde in der Methode ergänzt, dass das CAL 1x jährlich validiert wird, bzw. neu bewertet wird, um Einflüsse des Zyklus auf die AR auszuschließen.

Der Verzicht auf vorgeschriebene Zwischenmessungen der AR wird aufgrund des erhöhten Aufwands bezogen auf den potenziellen Informationsgewinn noch teilweise diskutiert. Hierbei sollte eine sorgfältige Abwägung erfolgen, um bspw. die zu absolvierende Prüfdistanz von 8.000 km hinsichtlich der Notwendigkeit der Länge durch Zwischenmessungen qualitativ und quantitativ bewertet werden kann.

Die Entscheidung, dass dedizierte Beschleunigungsmessgeräte für die Fahrversuche nicht zugelassen sind, ist insbesondere mit Blick auf die Auswertemethodik und den darin vorgesehenen Cut-Off von Beschleunigungswerten bei Geschwindigkeiten unter 7 km/h fragwürdig und bedarf einer begründeten Erklärung. Eine transparente Darlegung der Gründe für diesen Ausschluss ist notwendig, um die Validität der Studie sowie der generellen Methode sicherzustellen.

Die Durchführung einer repräsentativen Methode wird hinsichtlich der Vorgaben zu den Anteilen der Prüfzyklen kritisch bewertet, da insbesondere der innerstädtische Prüfzyklus nicht

ausreichend berücksichtigt wird, obwohl hier die maßgeblichen Anteile der AR einer repräsentativen Fahrweise generiert werden. Die Aussagekraft einer lediglich hinsichtlich der Beschleunigungsgrenzen definierten Fahrweise spiegelt nicht automatisch die Anhalte- und Anfahrmanöver sowie enge Kurvenfahrten bei niedrigen Geschwindigkeiten wider. Eine umfassende Analyse der laufenden Testkampagne sollte sicherstellen, dass die Testbedingungen realitätsnah sind und die unterschiedlichen Anforderungen urbaner Fahrumgebungen angemessen repräsentiert werden.

Die Verwendung des Scheibenwischersignals als Indikator für den Nassanteil ermöglicht nur eine geringfügig aussagekräftige Bewertung der Nassanteile der Fahrstrecke. Hierfür muss eine valide Vorgehensweise definiert werden, bspw. über zusätzliche Sensorik, um sicherzustellen, dass die Fahranteile auf nassen Fahrbahnen qualitativ und quantitativ bewertet werden können. Mit der aktuellen Vorgehensweise kann u.a. nicht unterschieden werden, ob die Fahrbahn lediglich feucht war oder starker Regen herrschte. Weiterhin ist das Management der Daten hinsichtlich möglicher Unterschiede innerhalb des Konvois nicht definiert.

Abschließend ist hervorzuheben, dass die Methodik zur Auswertung zum jetzigen Stand nicht eindeutig definiert ist. Die Empfehlung zur Nutzung lizenziierter Software sollte mit klaren Argumenten und Vorteilen untermauert werden, ansonsten ist der Einsatz von Open-Source-Software zu empfehlen. Weiterhin ist bei der Verwendung vorgefertigter Systemfunktionen eine entsprechende Beschreibung notwendig, um die darin hinterlegten mathematischen Funktionen auch mithilfe anderer Software abbilden zu können. Hierbei ist weiterhin die eindeutige Definition von Variablen zu empfehlen.

3.2.2 Verschleißbestimmung in einer Prüfstandsumgebung

Parallel zur Realfahrmethode wurde durch die TFTA eine Prüfstandsmethode entwickelt, welche die langfristige Verlagerung der Prüfprozeduren in stationäre Umgebungen zum Ziel hat, um die Umweltbelastung durch die Prüfverfahren und den Gesamtaufwand zu reduzieren. Die maßgebliche Zielstellung liegt darin, die Realfahrmethode zu größtmöglichen Anteilen auf die Prüfstands-umgebung zu übertragen, bzw. die höchstmögliche Korrelation zwischen den Ergebnissen zu erreichen.

An der TU Ilmenau als Auftragnehmer der Studie bestehen keine Möglichkeiten zur Validierung dieser Methode, sodass eine kritische Bewertung der Methode nur auf allgemeiner Basis vorgenommen werden kann und die kritischen Aspekte der Methode nachfolgend lediglich zusammengefasst wiedergegeben werden können.

3.2.2.1 Allgemeine Vorgaben

Die Messung der AR wird auf Außentrommelprüfständen durchgeführt. Dabei besteht die Option der Nutzung eines Einzelradprüfstandes oder empfehlenswerterweise eines Prüfstandes, der die zeitgleiche Messung zweier Räder im Abstand von 180° auf der Rolle erlaubt. Die Prüfstands-rolle muss in jedem Fall einen Durchmesser von mindestens 1,7 m aufweisen und spezifische Vorgaben zum Material sowie der Profiltiefe des Belags gemäß ISO 13473-3 berücksichtigen. Die Profiltiefe der Prüfstandstrommel ist regelmäßig zu kontrollieren.

Der Prüfstand muss weiterhin über ein System zur Radaufhängung verfügen, welches in der Lage ist, Querkräfte und Schräglaufwinkel zu erzeugen, Antriebs- und Verzögerungskräfte für den Längsschlupf aufzubringen sowie eine spezifische Radaufstandskraft zu erzeugen.

Zur Vermeidung des Verklebens von Abriebpartikel auf der Oberfläche des Reifens oder der Prüfstandsrolle ist ein "adhesion prevention system" einzusetzen. Dieses System beinhaltet die Verwendung von Pulver (Talg), welches in Form von Spray nahe der Kontaktfläche eingebracht

wird. Die vorgeschriebene Partikelgröße des Pulvers liegt dabei im Bereich von 0,1 bis 100 Mikrometern. Weiterhin existieren Vorgaben zur Positionierung einer oder mehrerer Düsen zur Einbringung des Pulvers nahe der Kontaktfläche. Alternativ kann eine gleichmäßige (homogene) Verteilung des Pulvers innerhalb der Prüfkammer (Dispersion) erfolgen.

3.2.2.2 Messgeräte und Instrumentierung

Zur Messung des Abriebs gelten für die Prüfstandsmethode grundsätzlich die gleichen Bedingungen und Vorgaben wie für die Realfahrmethode. Geringe und durch den Wechsel der Prüfumgebung bedingte Anpassungen sind nachfolgend beschrieben.

Radlasteinstellung

Die am Prüfstand einzustellende Radlast auf den Reifen ist in Abhängigkeit seiner zulässigen Traglast zu berechnen. Hierzu lautet die Vorgabe für sämtliche Reifen, dass die wirkende Radlast 80% der zul. Traglast betragen muss.

Fahrdynamische Größen

Die Abbildung fahrdynamischer Größen erfolgt am Prüfstand durch die Aufbringung von Längs- und Querkräften während des Prüfbetriebs. Die Messung zur Validierung und Einhaltung der eingestellten Werte erfolgt anhand definierter Rahmenbedingungen für jeden einzelnen Prüflauf.

Reifenfülldruck

Die Prüfreifen sind unabhängig von der Dimension mit 250 kPa zu beaufschlagen, die Referenzreifen sowie Reifen mit erhöhter Traglast (HL, XL) sind stets mit einem Reifenfülldruck von 250 kPa zu beaufschlagen. Die Abweichung im Reifenfülldruck bezieht sich überwiegend auf die festgelegte und nachfolgend beschriebene Temperaturanforderung.

Die Geräte zur Einstellung und Überprüfung des Reifenfülldrucks müssen die in Abschnitt 3.2.1.2 genannten Bedingungen analog zur Realfahrmethode erfüllen.

Klimatische Bedingungen

Zur Sicherstellung konsistenter Testbedingungen unterliegen die Prüflinge einer thermischen Konditionierung in einer Prüfkammer für einen Zeitraum von 3 Stunden. Nach dieser Phase wird der Fülldruck auf die spezifizierten Werte eingestellt. Die zulässige Umgebungstemperatur während einer Messung beträgt $25 \pm 5^\circ\text{C}$. Weiterhin dürfen die gemessenen Temperaturen von Messungen eines Prüf- und des zugehörigen Referenzreifens nicht um mehr als 2°C voneinander abweichen.

Diese vorbereitenden Maßnahmen sollen sicherstellen, dass die Reifen unter standardisierten Bedingungen getestet werden und die Ergebnisse vergleichbar und reproduzierbar sind.

3.2.2.3 Prüfzyklus und Prüfablauf

Prüfzyklus

Die zu absolvierende Prüfdistanz beträgt 5.000 km und ist durch die Wiederholung eines vorgegebenen Prüflaufs definiert. Dieser Prüflauf beschreibt eine 250 km lange Strecke, bestehend aus einer Beschleunigung auf 100 km/h, einer Verzögerung auf 60 km/h und einer Verzögerung auf 0 km/h anhand einer vorgegebenen Datentabelle. Zur Aufbringung von Längs- und Querkräften (Schlupf) werden Beschleunigungskoeffizienten vorgegeben, die mit der für den zu prüfenden Reifen einzustellenden Radlast die entsprechenden Längs- und Querkräfte ergeben. Die Repräsentativität dieses Prüfzyklus für das Verschleißverhalten unter realen Einsatzbedingungen ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Prüfablauf

Der Prüfablauf setzt sich zusätzlich aus weiteren Bausteinen zusammen.

Nach der generellen Vorbereitung einer Messung, welche die initiale Wägung der Reifen beinhaltet, sind die für den Prüflauf einzustellenden Kräfte entsprechend der beschriebenen Vorgaben zu berechnen, um sicherzustellen, dass die Prüfbedingungen den definierten Parametern entsprechen.

Anschließend ist der zu prüfende Reifen (das Rad) zur thermischen Konditionierung vor dem Beginn der Messung für 3h in der Prüfkammer zu lagern und anschließend mit dem korrekten Fülldruck zu beaufschlagen.

Bei der Nutzung eines Einzelradprüfstands existieren spezifische Vorgaben zur abwechselnden Fahrt des Prüf- und Referenzreifens. Diese sind in definierten Intervallen für ebenfalls definierte Prüfdistanzen entsprechend zu befolgen.

Bei der Nutzung eines Zweiradprüfstands (180°-Prüfstand) können der Prüf- und Referenzreifen zeitgleich untersucht werden, was einen enormen Zeitvorteil bringt. Hierbei erfolgt lediglich ein Positionswechsel der Prüflinge nach der Hälfte der zu absolvierenden Distanz (2.500 km).

3.2.2.4 Prüfbericht

Die für den Prüfbericht geforderten und zu protokollierenden Angaben entsprechen weitestgehend den im Abschnitt 3.2.1.4 erläuterten Punkten der Realfahrmethode.

Ergänzend bzw. ersetzend sind hierbei spezifische Angaben zum Prüfstand erforderlich, ebenso zu den entsprechend eingestellten und gemessenen Kräften, die auf die Prüflinge eingewirkt haben.

3.2.2.5 Datenverarbeitung

Bei der Messung der auf den Prüfreifen ausgeübten Kraft oder des auf ihn ausgeübten Drehmoments kann ein gleitender Mittelwert über eine Radumdrehung verwendet werden, um die erste und/oder zweite harmonische Schwingung des Reifens zu eliminieren. Weiterhin kann ein Tiefpassfilter genutzt werden, um die erste und/oder zweite harmonische Schwingung des Reifens zu eliminieren.

3.2.2.6 Zusammenfassung und kritische Punkte

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelte die TFTA parallel zur Realfahrmethode eine Prüfstandsmethode. Das Ziel besteht darin, die Prüfprozeduren langfristig in stationäre Umgebungen zu verlagern, um die Umweltbelastung und den Gesamtaufwand zu reduzieren. Die Hauptzielsetzung liegt in der weitreichenden Übertragbarkeit der Realfahrmethode auf die Prüfstandsumgebung und der maximalen Korrelation zwischen den Ergebnissen.

Die Messung der AR erfordert die Nutzung von Außentrommelprüfständen. Hierzu sind spezifische Vorgaben definiert, welche die grundlegenden Anforderungen an eine stationäre Prüfumgebung beschreiben. Dazu zählen ein System zur Radaufhängung mit verschiedenen Funktionen sowie der Installation eines Systems zur Minimierung des Reifenabriebs auf der Trommel.

Die Bedingungen für die Messung des Abriebs sind grundsätzlich ähnlich zu der Realfahrmethode. Erforderliche Anpassungen betreffen die Radlasteinstellung, fahrdynamische Größen, Reifenfülldruck und klimatische Bedingungen. Die Prüfdistanz beträgt 5.000 km, welche durch die entsprechende Wiederholung eines definierten Zyklus mit einer Distanz von 250 km zu absolvieren ist. Der Prüfablauf beinhaltet die Vorbereitung, die Berechnung der einzustellenden Kräfte, thermische Konditionierung der Reifen und spezifische Anforderungen je nach Einzelrad- oder Zweiradprüfstand.

Der Prüfbericht entspricht weitgehend den Anforderungen der Realfahrmethode, jedoch mit zusätzlichen Angaben zum Prüfstand und den gemessenen Kräften. Bei der Messung von Kräften oder Drehmomenten auf den Prüfreifen können gleitende Mittelwerte oder Tiefpassfilter verwendet werden, um harmonische Schwingungen zu eliminieren.

Diese Methode soll eine ökologischere und effizientere Durchführung von Prüfverfahren im Vergleich zur herkömmlichen Realfahrmethode ermöglichen, jedoch ist die entsprechende Validierung noch ausstehend.

3.3 Durchführung von Messungen als Beitrag zur Entwicklung oder Validierung einer Methode zur Bestimmung von Reifenabrieb

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sind Fahrversuche im praktischen Betrieb auf der Straße zur Messung von Reifenabrieb durchzuführen, um den Prozess der Methodenentwicklung in der TFTA anhand eigener Ergebnisse zu unterstützen und aktiv mitzugestalten. Da zum Zeitpunkt der Definition dieses Arbeitspaketes noch kein konkreter Methodenvorschlag vorlag, wurden die darin definierten Ziele anhand der bisherigen Erfahrungswerte der TU Ilmenau sowie des im Jahr 2022 begonnen Entwicklungsprozesses der TFTA angepasst und daraus eine Versuchsmatrix abgeleitet, welche auf die Abbildung möglichst realer Verschleißszenarien abzielt (Kunze et al., 2022).

3.3.1 Zielstellungen

Die konkrete und übergeordnete Zielstellung des Arbeitspaketes ist die Durchführung einer Messkampagne, welche die reproduzierbare Bestimmung von Reifenabrieb, die sogenannte „Abriebrate“ AR über einer definierten Wegstrecke ermöglicht. Diese AR ist hierbei durch Fahrten auf realen Straßen zu ermitteln, wozu sowohl der öffentliche Straßenverkehr als auch isolierte Teststrecken zählen. Damit wird sichergestellt, dass die Versuche ein möglichst genaues Abbild des realen Einsatzgebietes erstellen. Eine Versuchsdurchführung auf Prüfständen jeglicher Art ist explizit nicht Teil der Untersuchungen.

Die Bestimmung der AR erfolgt für alle vier Reifen eines Fahrzeugs.

Laut Leistungsbeschreibung sollte mit einem repräsentativen PKW die AR von jeweils vier unterschiedlichen Sommer- und Winterreifen ermittelt werden. Für die Versuche im realen Straßenverkehr war eine Prüfdistanz je Reifen von 1.000 km und eine Unterteilung in die Abschnitte Autobahn, Landstraße und Stadt vorgesehen. Auf einer Teststrecke sollten ebenfalls insgesamt 1.000 km je Reifen in unterschiedlichen, konstanten Geschwindigkeiten gefahren werden, um den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die AR zu bestimmen. Sowohl für die Versuche auf öffentlichen Straßen als auch für die Teststrecke war vorgesehen, einen Messpunkt je Abschnitt aufzunehmen.

In enger Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden diese Rahmenbedingungen an die lokalen Gegebenheiten, die Erfahrungswerte der TU Ilmenau sowie die Erkenntnisse aus den ersten Meetings der TFTA angepasst. In der TFTA wurde bereits zu einem frühen Zeitpunkt diskutiert, dass eine Prüfdistanz von mind. 8.000 km je Reifen erforderlich sei und die Möglichkeit eines Einlaufeffektes auf die AR innerhalb der ersten 1.000-2.000 km bestünde, sodass für die Messkampagne die Anzahl der zu prüfenden Reifen reduziert und die vorgesehene Prüfdistanz je Reifen sowie die Anzahl der Messpunkte erhöht wurde. Zudem hat sich innerhalb der TFTA schnell gezeigt, dass die Messung der AR anhand beschleunigter Prüfzyklen auf Teststrecken weder mit einer ausreichenden Wiederholbarkeit noch einer entsprechenden Übertragbarkeit auf das Verschleißverhalten unter realen Einsatzbedingungen erfolgen kann. Daher wurde der Umfang der Prüfdistanz für die Versuche auf öffentlichen Straßen verhältnismäßig höher gewichtet als für die Versuche auf einer Teststrecke.

Der Test von Winterreifen wurde verworfen, da in den ersten Sessions der bisher in der TFTA vorgestellten Messergebnisse die AR von Winterreifen stets höhere Streubreiten aufgewiesen haben. Dies ist vorwiegend durch die wechselhafteren Witterungsbedingungen im Winter als auch an einem stark veränderten Verschleißverhalten von Winterreifen bei sommerlichen Witterungsbedingungen zu begründen. Dieses Verhalten von Winterreifen konnte auch anhand bisheriger Erfahrungswerte der TU Ilmenau bestätigt werden, sodass für die Messkampagne

ausschließlich Sommerreifen genutzt werden sollten, um die Methode möglichst robust prüfen zu können.

Für die Durchführung der Messkampagne wurden 40 % der Versuchsfahrten bereits im Jahr 2022 durchgeführt und ausgewertet, die weiteren 60 % wurden im Sommer 2023 durchgeführt.

3.3.2 Prüfmethode

Die an der TU Ilmenau entwickelte Prüfmethode zur Bestimmung von Reifenverschleiß unter realen Bedingungen unterteilt sich zunächst in vorbereitende Maßnahmen, die Durchführung und die Nachbereitung der Messkampagne, (Kunze et al., 2022). Sie entspricht dem in der Abbildung 4 dargestellten Ablaufplan.

Die zu testenden Reifen, nachfolgend Prüflinge genannt, sind im fabrikneuen Zustand zunächst von möglichen Etikettierungen und Verschmutzungen zu befreien. Anschließend sind sie eindeutig zu kennzeichnen, vorwiegend entsprechend der vorgesehenen Radposition am Fahrzeug. Danach wird die Masse eines Reifens entsprechend dem in Abschnitt 3.3.3.2 beschriebenen Vorgehen bestimmt. Darauf folgt die Montage des Reifens auf der vorgesehenen Felge. Das Rad ist anschließend ordnungsgemäß auszuwuchten. Nachfolgend ist es erneut zu reinigen und einer erneuten Massebestimmung zu unterziehen. Zuletzt wird das Rad bzw. der Reifen mit dem erforderlichen Fülldruck versehen und anschließend einer weiteren Massebestimmung unterzogen, sodass es fortan für die Messkampagne genutzt werden kann.

Die Bestimmung der jeweiligen Massen ermöglicht eine nachträgliche Bewertung der während der Messkampagne aufgenommenen Abriebraten.

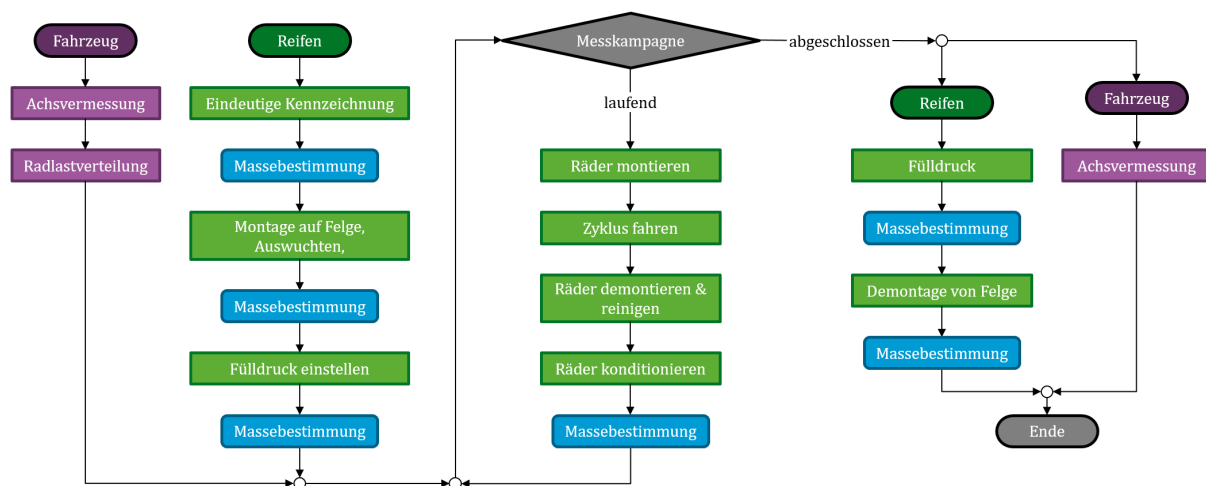
Die vorbereitenden Maßnahmen betreffen nachfolgend das Versuchsfahrzeug, auf welchem die einsatzfähigen Prüflinge zu montieren sind. Das Fahrzeug ist anschließend einer Achsvermessung zu unterziehen. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Radstellungsgrößen innerhalb der für das Fahrzeug zulässigen Toleranzen befinden, sodass Sondereffekte auf das Verschleißverhalten vorab ausgeschlossen werden können. Anschließend sind die jeweils auf die Räder wirkenden Radlasten zu bestimmen, wobei das Fahrzeug vollgetankt ist und sich eine zu einer durchschnittlichen Person (hier: ca. 75 kg) äquivalente Masse auf dem Fahrersitz befindet. Eine zusätzliche Beladung erfolgt hierbei nicht, da die Messfahrten lediglich mit einem spezifischen Fahrzeug durchgeführt werden und keine Angleichung erzielt werden muss.

Nach den abgeschlossenen Vorbereitungen beginnt die Messkampagne, wobei die zuletzt aufgenommene Masse eines Rades den ersten Ausgangswert darstellt. Nach einer absolvierten Messfahrt sind die Räder erneut von Verunreinigungen (z.B. Steine zwischen den Profilblöcken oder Bremsstaub auf den Felgen) zu befreien, sodass eine ordnungsgemäße Bestimmung der Masse erfolgen kann, aus der nachfolgend die Abriebrate bestimmt wird.

Dieser Prozess wird entsprechend der zu erzielenden Gesamtprüfdistanz wiederholt. Ist die Messkampagne abgeschlossen, so erfolgt eine erneute Achsvermessung des Fahrzeugs, um mögliche Abweichungen im Vergleich zum Beginn der Messkampagne festzustellen.

Anschließend sind die vorbereitenden Maßnahmen für die Prüflinge in umgekehrter Reifenfolge durchzuführen. Sämtliche aufgezeichneten Werte sind zu protokollieren und für eine Bewertung der gemessenen Abriebraten heranzuziehen.

Abbildung 4: Prüfmethode für Reifenverschleiß der TU Ilmenau



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

3.3.3 Prüfumgebung und Messtechnik

In diesem Abschnitt werden die Prüfumgebung, die Messtechnik sowie die allgemeinen Anforderungen und Rahmenbedingungen zur Versuchsdurchführung beschrieben.

3.3.3.1 Allgemeine Anforderungen und Randbedingungen

Für die Durchführung der Versuchsfahrten zur reproduzierbaren Bestimmung der AR ist es zwingend notwendig, die nachfolgend beschriebenen Arbeitsabläufe strikt einzuhalten. Aus den bisherigen Erfahrungen der TU Ilmenau hat sich gezeigt, dass bereits geringe Einflüsse im Handling der Prüflinge zur Vorbereitung oder während der Wägung einen Messfehler erzeugen können, der das tatsächliche Verschleißergebnis massiv beeinflusst.

Um diese Einflüsse zu reduzieren, sind die Prüflinge vor jeder Wägung stets penibel und sorgsam zu reinigen, um sowohl grobe als auch feine Verschmutzungen, wie z.B. zwischen den Profilblöcken eingeklemmte Steine oder auf der Felge abgelagerte Bremsstaubemissionen, vollständig von den Prüflingen zu entfernen. Weiterhin sollte der Reifenfülldruck regelmäßig kontrolliert und ggf. korrigiert werden, um Einflüsse des durch einen veränderten Fülldruck abweichenden Auftriebs des Prüflings über mehrere Wägungen zu minimieren. In Abhängigkeit der absoluten Verschleißmasse einer Versuchsfahrt können z.B. eine Fülldruckabweichung von 0,5 bar und eine geringfügige Verschmutzung des Prüflings die Verschleißmasse derart beeinflussen, dass eine Zunahme der Masse des Prüflings gemessen wird. Im Rahmen dieser Messkampagne wurde lediglich beim Befüllen und vor der Demontage der Fülldruck gemessen. Hierzu hat sich an der TU Ilmenau etabliert, dass die Prüfdistanz des Prüfzyklus stets so auszulegen ist, dass eine Mindestverschleißmasse von 2 g generiert werden kann, um die Fehlerinflüsse im Wägeprozess zu minimieren. Dieser Wert hat sich unter Verwendung der nachfolgend beschriebenen Messtechnik aus Vergleichsmessungen ergeben, welche für unterschiedliche Reifenfülldrücke durchgeführt wurden.

3.3.3.2 Messtechnik

Für das Verwiegen der Reifen zur Messung der AR wird ein manueller Massekomparator Cubis® MCM40K3 der Firma Sartorius verwendet. Dieser ist aufgrund seiner integrierten Klimasensoren zur Erfassung von Temperatur, Luftdruck und -feuchtigkeit sowie der Kalibrier-Workflows besonders geeignet, um zuverlässig reproduzierbare Ergebnisse zu liefern und eine Bestimmung der Messunsicherheiten relevanter Daten zu erfassen.

Abbildung 5: Sartorius Massekomparator Cubis® MCM40K3



Quelle: Sartorius AG

Die wichtigsten technischen Daten des Massekomparators sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Sartorius Massekomparator Cubis® MCM40K3 – Technische Daten

Technische Daten (Auszug)

| Parameter | Wert |
|-------------------------------|-----------|
| Lastbereich | 0 - 41 kg |
| Ablesbarkeit | 1 mg |
| Wiederholbarkeit (optimal) | 2 mg |
| Wiederholbarkeit (Standard F) | 6 mg |
| Linearität | 20 mg |
| Ecklastfehler | 3,5 mg/mm |

Quelle: Sartorius AG

Die Ablesegenauigkeit des Massekomparators beträgt 1 mg bei einer zulässigen Maximallast von 41 kg. Zur Massebestimmung eines Reifens wird dieser auf einem Podest auf dem Massekomparator platziert, dessen Masse vor der Wägung zu tarieren ist. Bei einem Ecklastfehler von 3,5 mg/mm ist es notwendig, dass Podest in Abhängigkeit der Dimension des zu wiegenden Reifens möglichst mittig auszurichten. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit des Gerätes ist dieses nur in geschlossenen Räumen einzusetzen, da bereits geringfügige Verwirbelungen der Raumluft, z.B. durch ein eingeschaltetes Belüftungssystem oder hektische Bewegungen, das Trieren und das Wägen negativ beeinflussen oder gar unmöglich machen können. Dementsprechend ist vor der Wägung sicherzustellen, dass die Raumbelüftung ausgeschaltet ist und die Wägung nicht gestört wird.

Im Falle der Reifendifferenzmassenbestimmung wird im sog. vorkalibrierten ABA-Zyklus gewogen, bei dem A einen Wägevorgang des Referenzgewichtes und B den des Prüfgewichtes beschreibt. Dafür ist für den Bedienenden jeweils ein Zeitfenster von 10 Sekunden zum Auflegen und Abnehmen des Gewichtes vorgesehen. Nach dem Auflegen des Gewichtes folgt eine Stabilisierungszeit von 30 Sekunden zur Wägung. Während dieser Stabilisierungszeit sollte im Raum so wenig wie möglich Bewegung von den Bedienenden erfolgen, welche sich im Idealfall ca. 2 Meter von der Waage entfernen sollten. Zudem muss die Tür geschlossen bleiben und die Lüftung sowie Klimatisierung des Messraumes über die Dauer der Wägung deaktiviert sein.

Damit sollen Luftbewegungen, welche das Ergebnis verfälschen können, indem keine ausreichende Stabilisierung stattfinden kann, vermieden werden. Vor einer Wägung ist darauf zu achten, dass die Waage nivelliert ist. Dies erfolgt mittels einer Libelle auf der Rückseite des Massekomparators. Neben der Verschmutzungsfreiheit ist zu überprüfen, dass das Podest zum Abstellen der Räder sauber ist, mittig auf dem Massekomparator steht und dieser vor der Wägung tariert wird. Verschmutzungen am Rad sind mittels einer weichen Bürste oder eines Mikrofasertuches zu entfernen. Für die Reifenflanken und die Felge kann zusätzlich Isopropanol verwendet werden, um die für das Aufziehen des Reifens erforderliche Montagepaste zu entfernen.

3.3.3.3 Prüfungsumgebung

Die Durchführung der Fahrversuche erfolgt in Ilmenau und der Umgebung im Süden Thüringens. Für die Versuchsstrecken wurden ein etablierter und RDE-konformer Zyklus ausgewählt sowie neue Prüfzyklen für die Fahrt im innerstädtischen Bereich, auf Landstraßen und der Autobahn entwickelt. Zuletzt wurde ein Prüfzyklus mit innerstädtischen und Landstraßenanteilen auf einem Flugplatz in Alkersleben genutzt, um die Versuchsfahrten auf einer Teststrecke abzubilden.

Aus der zuvor beschriebenen, mindestens zu erzielenden Verschleißmasse von 2 g je Reifen und der Anforderung, dass ein Messpunkt je Versuchsfahrt & -tag aufzunehmen ist, ergeben sich die in der Tabelle 4 dargelegten Prüfdistanzen und Wiederholungen je Prüfzyklus pro Versuchsfahrt.

Tabelle 4: Prüfdistanzen je Prüfzyklus

| Prüfzyklus | Distanz je Zyklus | #Wdh. | Prüfdistanz je Messpunkt |
|-------------------|-------------------|-------|--------------------------|
| RDE | 90 km | 3 | 270 km |
| Urban | 25 km | 6 | 150 km |
| Landstraße | 70 km | 5 | 350 km |
| Autobahn | 170 km | 3 | 510 km |
| Flugplatz | 20 km | 1 | 75 km |
| + An- & Rückfahrt | 27,5 km | 2 | |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die Fahrversuche wurden entsprechend der Abfolge in der Tabelle 4 durchgeführt, wobei für jeden Prüfzyklus zwei Messfahrten durchgeführt werden, sodass sich je Reifen eine Prüfdistanz von insgesamt ca. 2.700 km ergibt. Daraus können zusätzliche Informationen über den Einfluss äußerer Größen auf die AR sowie die Stabilität des Niveaus der AR eines Reifens in Abhängigkeit des Prüfzyklus gewonnen werden. Diese Prüfzyklen sind nachfolgend detailliert beschrieben.

Prüfzyklus „RDE“

Der RDE-konforme Prüfzyklus ist in der Abbildung 6 dargestellt und führt über eine Distanz von ca. 90 km vom Gelände der TU Ilmenau über Arnstadt, Stadtilm und Langewiesen in einer Schleife zurück zum Startpunkt. Für einen Messpunkt der AR werden 3 Schleifen des Zyklus gefahren, sodass sich eine Gesamtdistanz je Messpunkt von 270 km ergibt. Der Zyklus beinhaltet gemäß den Anforderungen an einen RDE-Zyklus Anteile aus innerstädtischen, Landstraßen- und Autobahnprofilen.

Abbildung 6: Prüfzyklus RDE - Streckenverlauf



Verlauf: Ilmenau – Arnstadt – Stadtilm – Langewiesen – Ilmenau

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die konkreten Eckdaten des Zyklus sind der Tabelle 5 zu entnehmen. Für die genannten Parameter sind auszugsweise die Mindestanforderungen an einen RDE-Zyklus als Referenz aufgeführt.

Tabelle 5: Prüfzyklus RDE

| Parameter | Wert | Soll (RDE-Anforderung) |
|------------------------------|----------|------------------------|
| Dauer gesamt | 100 Min. | 90 - 120 Min. |
| Distanz gesamt (absolut) | 90 km | ≥ 42 km |
| Distanz Urban (relativ) | 38 % | 29 - 44 % |
| Distanz Landstraße (relativ) | 37 % | 23 - 43 % |
| Distanz Autobahn (relativ) | 25 % | 23 - 43 % |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Prüfzyklus „Urban“

Dieser Prüfzyklus bildet überwiegend die innerstädtische Fahrweise ab, welche durch enge Kurvenfahrten bei Abbiegevorgängen, häufige Anhalte- und Anfahrmanöver sowie eine niedrige Höchstgeschwindigkeit geprägt ist. Durch die häufigen Beschleunigungen und Verzögerungen ist der Reifen in diesem Prüfzyklus dem höchsten Stress ausgesetzt, da häufige und hohe Schlupfwerte sowohl in Längs- als auch in Querrichtung auftreten. Aufgrund einer zwischenzeitlichen Baumaßnahme beinhaltet der Zyklus standardmäßig einen kurzen Landstraßenabschnitt, dessen Einfluss auf die AR angesichts einer vergleichweisen kurzen und geraden Strecke als gering eingeschätzt wird.

Abbildung 7: Prüfzyklus Urban - Streckenverlauf



Verlauf: Ilmenau – Langewiesen – Ilmenau

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die konkreten Eckdaten des Zyklus sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Prüfzyklus Urban

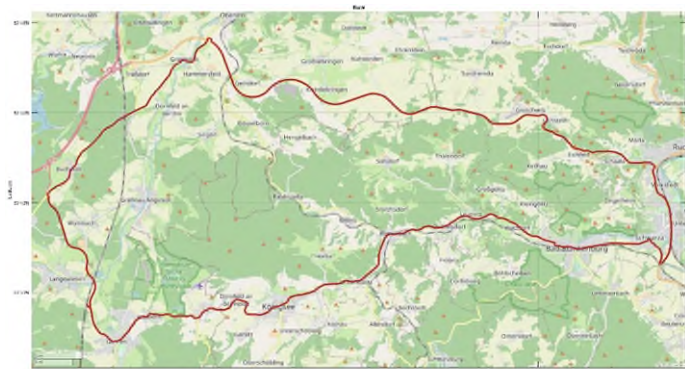
| Parameter | Wert |
|------------------------------|---------|
| Dauer gesamt | 45 Min. |
| Distanz gesamt (absolut) | 25 km |
| Distanz Urban (relativ) | 85 % |
| Distanz Landstraße (relativ) | 15 % |
| Distanz Autobahn (relativ) | 0 % |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Prüfzyklus „Landstraße“

Dieser Prüfzyklus bildet vorwiegend eine Fahrweise auf der Landstraße außerorts ab mit abwechselnd gerader und kurviger Streckenführungen bei moderaten Geschwindigkeiten bis 100 km/h und beinhaltet durch einige Ortsdurchfahrten auch urbane Anteile.

Abbildung 8: Prüfzyklus Landstraße - Streckenverlauf



Verlauf: Ilmenau – Gehren – Königsee – Bad Blankenburg – Rudolstadt – Griesheim – Bücheloh – Ilmenau

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die konkreten Eckdaten des Zyklus sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Prüfzyklus Landstraße

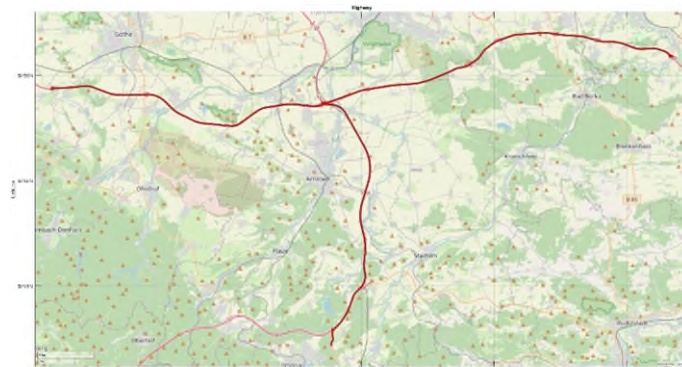
| Parameter | Wert |
|------------------------------|---------|
| Dauer gesamt | 75 Min. |
| Distanz gesamt (absolut) | 70 km |
| Distanz Urban (relativ) | 10 % |
| Distanz Landstraße (relativ) | 90 % |
| Distanz Autobahn (relativ) | 0 % |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Prüfzyklus „Autobahn“

Dieser Prüfzyklus verläuft überwiegend über Autobahnen, wobei geringe urbane Anteile durch die An- & Rückfahrt sowie im Bereich der Auf- & Zufahrten enthalten sind. Die Fahrt auf der Autobahn ist durch höhere und konstante Geschwindigkeiten geprägt, wobei etwaige Kurvenfahrten einen großen Radius aufweisen. Gelegentliche Änderungen der Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie Überholmanöver sind die Haupttreiber von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen, welche im Vergleich zur urbanen Fahrweise oder im Landstraßenbetrieb jedoch deutlich seltener und, aufgrund der höheren Geschwindigkeit, i.d.R. mit niedrigerem Schlupf einhergehen. Auf unbeschränkten Streckenanteilen wurde die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h bei den Fahrversuchen eingehalten.

Abbildung 9: Prüfzyklus Autobahn - Streckenverlauf



Verlauf: Ilmenau – Kreuz Erfurt – Gotha Boxberg – Apolda – Kreuz Erfurt – Ilmenau

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die konkreten Eckdaten des Zyklus sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Prüfzyklus Autobahn

| Parameter | Wert |
|------------------------------|---------|
| Dauer gesamt | 95 Min. |
| Distanz gesamt (absolut) | 170 km |
| Distanz Urban (relativ) | ≤ 5 % |
| Distanz Landstraße (relativ) | ≤ 5 % |
| Distanz Autobahn (relativ) | 90 % |

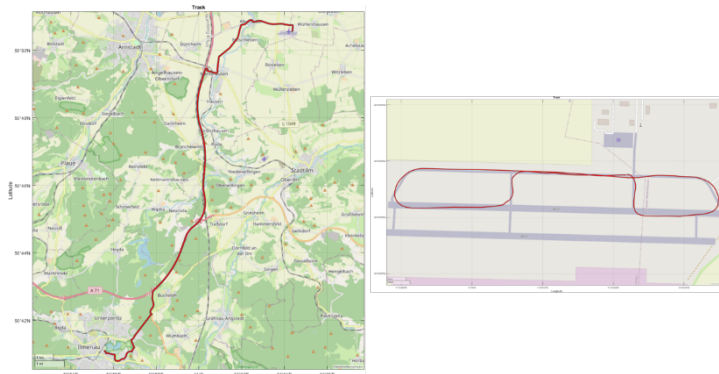
Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Prüfzyklus „Track“

Dieser Prüfzyklus soll hauptsächlich ein beschleunigtes Testverfahren abbilden, welches sich durch eine vergleichsweise hohe Belastung auf kürzerer Distanz auszeichnet. Zusätzlich wird durch die veränderte Fahrbahnoberfläche eine Erhöhung der AR erwartet. Die Prüfprozedur auf einem Flugplatzgelände in Alkersleben umfasst ein innerstädtisches und ein Landstraßenprofil. Für die innerstädtische Fahrweise wird eine Schleife, welche aus jeweils vier Links- und Rechtskurven sowie zwei Geradeausfahrten und einem Haltemanöver besteht, mit moderaten Beschleunigungen und einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h in 10-facher Wiederholung absolviert. Anschließend wird diese Fahrt für die Landstraßenprozedur mit höheren Beschleunigungen und einer Höchstgeschwindigkeit von 90 km/h wiederholt.

Eine Besonderheit dieses Zyklus ist die in Dauer und Distanz mitberücksichtigte An- und Rückfahrt, welche in das Messergebnis einfließen und es beeinflussen. Der Grund liegt in der die Bestimmung der Verschleißmasse unter den in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Bedingungen - wie für alle anderen Prüfzyklen auch - an der TU Ilmenau. Dies ist dadurch bedingt, dass die messtechnische Ausrüstung auf dem Gelände des Flugplatzes nicht unter den geforderten gleichbleibend konstanten Bedingungen aufgebaut werden kann.

Abbildung 10: Prüfzyklus Track - Streckenverlauf



Verlauf: Ilmenau – Arnstadt – Stadtilm – Langewiesen – Ilmenau

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die konkreten Eckdaten des Zyklus inkl. An- und Abfahrt sind der Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Prüfzyklus Track

| Parameter | Wert |
|------------------------------|---------|
| Dauer gesamt | 95 Min. |
| Distanz gesamt (absolut) | 170 km |
| Distanz Urban (relativ) | ≤ 5 % |
| Distanz Landstraße (relativ) | ≤ 5 % |
| Distanz Autobahn (relativ) | 90 % |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

3.3.4 Versuchsfahrzeug und Versuchsreifen

3.3.4.1 Versuchsfahrzeug

Für die Versuchsfahrten wurde ein Ford Mondeo MK4 Turnier eingesetzt. Das Fahrzeug ist mit einem quer eingebauten 2.2 TDCi-Motor und Frontantrieb ausgestattet. Das Gesamtgewicht von 1.660,5 kg ergibt sich aus den der Tabelle 10: Radlasten und Gesamtmasse Versuchsfahrzeug zu entnehmenden Radlasten. Das Fahrzeug weist eine Standardbereifung der Dimension 215/55R16 auf.

Die im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Prüfreifen der Dimension 215/55R16 weisen einen Lastindex von 93 auf, was einer Traglast von 650 kg entspricht. Der Referenzreifen hat in der Dimension 225/45R17 einen Lastindex von 94, was einer Traglast von 670 kg entspricht. Anhand dieser Werte werden die gemessenen Radlasten des Versuchsfahrzeugs in der nachfolgenden Tabelle mit den Anforderungen der TFTA-Methode (vgl. Kap. 3.1) verglichen.

Tabelle 10: Radlasten und Gesamtmasse Versuchsfahrzeug

| Position | Radlast [kg] | Soll (LI 93) [kg] | Soll (LI 94) |
|------------------------|--------------|-------------------|-----------------|
| Linkes Vorderrad (VL) | 499,0 | 453,62 – 521,90 | 467,57 – 537,96 |
| Rechtes Vorderrad (VR) | 502,0 | | |
| Linkes Hinterrad (HL) | 328,5 | 356,41 – 410,07 | 367,38 – 422,68 |
| Rechts Hinterrad (HR) | 331,0 | | |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Da die Messkampagne gestartet wurde, bevor der erste Entwurf der Methode der TFTA vorgestellt wurde, konnten die Zielvorgaben der TFTA-Methode nicht vollständig eingehalten werden, da die am Versuchsfahrzeug gemessenen Radlasten an der Hinterachse für die Prüfreifen um mind. 25-28 kg und für den Referenzreifen um mind. 36-39 kg abweichen. Um die Vergleichbarkeit der Messkampagne zu gewährleisten, wurden die Radlasten für die Fortführung der Messkampagne nicht an die Zielwerte der TFTA-Methode angepasst.

3.3.4.2 Versuchsreifen

Die Versuchsreifen, nachfolgend Prüflinge genannt, wurden anhand mehrerer Kriterien ausgewählt. Bei der Auswahl geeigneter Kandidaten lag der Fokus darauf, einen qualitativen Vergleich der Prüflinge innerhalb der Messkampagne zu ermöglichen. Für die Messkampagne sollten daher zwei Reifenfabrikate mit niedriger AR, zwei Reifen mit hoher AR sowie ein Kandidat für den Referenzreifen ausgewählt werden.

Als Referenzreifen dieser Messkampagne wurde der ebenfalls in der TFTA verwendete Referenzreifen „BF Goodrich Advantage XL“ in der Dimension 225/45R17 eingesetzt. Er wird im Rahmen der Messkampagne als Referenzreifen bezeichnet, jedoch wie die übrigen Prüfreifen als solcher untersucht. Die weiteren Prüflinge wurden auf Basis der Ergebnisse einer in der TFTA vorgestellten Studie des ADAC e.V. ausgewählt, in welcher die AR für mehrere Reifenfabrikate, -dimensionen sowie der Kategorien Sommer- & Winterreifen untersucht wurden (Silvestro, 2022). Die im Vergleich zur Studie des ADAC e.V. kürzere Prüfdistanz sowie die unterschiedliche Prüfumgebung lässt einen qualitativen Vergleich der AR der Prüflinge zu. Mit dieser Referenz kann eine Aussage zur Übertragbarkeit von Prüfmethoden auf unterschiedliche Prüfumgebungen getroffen werden, was ein Ziel der Aktivitäten der TFTA ist. Aus den im vorherigen Abschnitt genannten Gründen wurden nur Sommerreifen zur Auswahl der Prüflinge

herangezogen. Aus den Ergebnissen der Studie des ADAC e.V. wurden die in Tabelle 11 aufgezählten Prüflinge für die Messkampagne ausgewählt.

Nach dem Beginn der hier beschriebenen Messkampagne hat der ADAC e.V. im Sommer 2023 eine weitere Studie präsentiert, nach welcher die ausgewählten Reifen eine qualitativ andere Performance der AR ergeben haben (ADAC, 2023). Es ist festzuhalten, dass die beiden Studien des ADAC e.V. nicht unter vergleichbaren Bedingungen und in der gleichen Prüfumgebung durchgeführt wurden, weshalb diese Unterschiede möglicherweise die Varianz der Prüfbedingungen und nicht zwangsläufig die der Prüfreifen aufzeigen. In der Studie aus dem Jahr 2023 wurden 2/3 der Prüfreifen auf einem Prüfstand getestet und anhand einer Vergleichsbasis von vier Prüflingen, welche auf realen Straßen und dem Prüfstand getestet wurden, mittels eines Korrelationsfaktors an die Ergebnisse des Straßentests angepasst.

Weiterhin sind die in der Studie ermittelten AR in Abhängigkeit der Fahrzeugmasse in [mg/km/ton] angegeben. Zu Vergleichszwecken wurden sie daher mit einer geschätzten Fahrzeugmasse von 1.600 kg verrechnet und dieser Wert in der Tabelle 11: Auswahl der berücksichtigt. Dennoch sind die Ergebnisse zu Vergleichszwecken nützlich, da die schlussendliche Methode der TFTA genau diese Varianz berücksichtigen muss, um eine Basis für eine Regulierung legen zu können.

Tabelle 11: Auswahl der Testreifen

| Marke und Modell | Kürzel | Dimension | AR [mg/km] |
|--------------------------------------|--------|-----------------------|------------|
| BF Goodrich Advantage | RR | 205/55R16 | 102 |
| Goodyear EfficientGrip Performance 2 | PR-1 | 205/55R16 | 82 |
| Fulda EcoControl HP2 | PR-2 | 205/55R16 | 98 |
| Vredestein Ultrac | PR-3 | 185/65R15 & 225/40R18 | 124 |
| Nokian Wetproof | PR-4 | 205/55R16 | 151 |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau
Datenquelle: Silvestro, 2022

3.3.5 Messergebnisse

Aus der an der TU Ilmenau durchgeführten Messkampagne konnten grundsätzlich repräsentative und reproduzierbare AR im realen Fahrbetrieb ermittelt werden, die nachfolgend beschrieben sind. Allerdings sind aufgrund der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Abweichung der Radlasten an der Hinterachse des Versuchsfahrzeugs die innerhalb dieser Messkampagne gemessenen AR im Vergleich zur TFTA-Methode leicht unterschätzend einzuordnen. Der Grund ist die Fahrzeugmasse an der Hinterachse, die in dieser Messkampagne unterhalb des Niveaus der Zielvorgaben der TFTA-Methode lag.

3.3.5.1 Auswertung der Einzelergebnisse der Prüflinge

Die Auswertung der Messergebnisse hinsichtlich der für die einzelnen Reifen charakteristischen AR erfolgt separat für jeden gefahrenen Prüfzyklus. Dabei werden insbesondere die Unterschiede zwischen den einzelnen Radpositionen (VL – vorne links, VR – vorne rechts, HL – hinten links, HR – hinten rechts), aufsummiert für die jeweiligen Achsen (VA – Vorderachse, HA – Hinterachse) sowie für das Gesamtfahrzeug betrachtet. In den nachfolgenden Diagrammen sind die Mittelwerte aus den Messungen für jede Radposition dargestellt. Daraus werden wiederum die Mittelwerte der AR für die Vorder- und Hinterachse sowie für das Gesamtfahrzeug zusammengefasst. Zusätzlich wird mithilfe der sekundären Y-Achse die aufsummierte AR des Gesamtfahrzeugs dargestellt. Anhand dieser Darstellung kann sowohl die AR des Gesamtfahrzeugs als auch deren Zusammensetzung nachvollzogen werden.

Die Durchführung der Messungen der jeweiligen Prüfzyklen erfolgte entsprechend der Tabelle 4 in jeweils doppelter Ausführung. Daraus ergibt sich je Prüfzyklus eine mittlere AR inkl. der Streubreiten je Radposition (Balken), eine mittlere AR je Achse (Dreieck bzw. Raute in grün), je Fahrzeug (violetter Kreis) sowie die aufsummierte AR des Gesamtfahrzeugs auf der sekundären y-Achse (gelbes Viereck). Die aufsummierte AR je Fahrzeug muss nicht zwangsläufig dem 4-fachen Mittelwert der AR je Fahrzeug entsprechen, da die jeweils doppelt gefahrenen Zyklen nicht immer die exakt gleiche Distanz aufweisen und somit bei der Mittelwertbildung Gewichtungsfehler auftreten können, weshalb beide Werte angegeben sind.

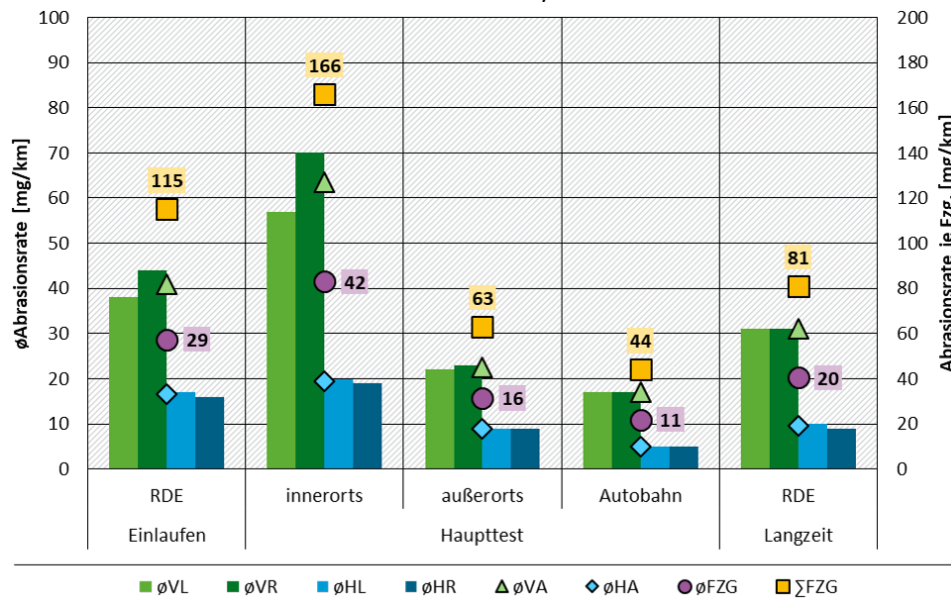
Referenzreifen

In der Abbildung 11 sind die gemessenen AR für den Referenzreifen dargestellt. Es wurden zunächst zwei RDE-Zyklen und anschließend je zwei Wiederholungen des urbanen, des Landstraßen- und des Autobahnprofils gefahren. Somit sind Effekte durch einen Einlaufprozess aus den Ergebnissen nur geringfügig.

Zunächst konnte festgestellt werden, dass die AR für alle Prüfzyklen an der Vorderachse deutlich über dem Niveau der Hinterachse liegt. Dieser Effekt ist durch das frontgetriebene und -gelenkte Fahrzeug zu erklären, da die Antriebsmomente an der Vorderachse angreifen und zudem an der Vorderachse durch die dynamische Radlasterhöhung beim Bremsvorgang höhere Radlasten auftreten. Zusätzlich findet bei Kurvenfahrt eine Überlagerung durch Schräglaufwinkel statt. Weiterhin ist für alle durchgeführten Versuche auffällig, dass die AR an der rechten Vorderachseposition leicht oberhalb der AR der linken Vorderachseposition liegt. Innerhalb der TFTA ist dieses Phänomen bereits ebenfalls beobachtet worden, eine eindeutige Erklärung liegt hierfür jedoch nicht vor und konnte auch anhand der weiteren aufgezeichneten Parameter der Versuche bislang nicht identifiziert werden.

Abbildung 11: AR des Referenzreifens

AR des Referenzreifens für unterschiedliche Prüfzyklen



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Es lässt sich jedoch eindeutig erkennen, dass der urbane Prüfzyklus die höchste AR aufweist, was durch die Überlagerung der Einflüsse von Längs- und Querschlepp zu begründen ist. Schlepp in Fahrzeuginnenrichtung entsteht immer, wenn durch Antriebs- oder Bremsdrehmoment eine Kraft über die Reifen auf die Fahrbahn übertragen wird (Bachmann, 1998). Durch die reibschlüssige Verbindung zwischen Reifen und Fahrbahn kommt es zu einem kontinuierlichen Abrieb von Gummi von der Lauffläche des Reifens in Abhängigkeit von der umgesetzten Reibenergie. Gleichzeitig führen bei Kurvenfahrten die für die Übertragung von Seitenkräften notwendigen Schräglaufwinkel zu Schlepp in Querrichtung und damit zu einem seitlichen Verschleiß der Reifen.

Für die RDE-Messungen, welche zu Beginn durchgeführt wurden, ergaben sich hier im Vergleich zu den weiteren Prüfzyklen und der absoluten AR hohe Streubreiten sowohl an der Vorder- als auch der Hinterachse. Hervorzuheben ist dabei, dass die Niveaus aller gemessenen AR aus dem 2. RDE-Zyklus deutlich unter dem Niveau des 1. RDE-Zyklus liegen. Anhand der aufgezeichneten Parameter, wie u.a. der Längs- und Querschleunigung sowie der Fahrgeschwindigkeit konnte die Abweichung nicht begründet werden. Während des 2. RDE-Zyklus war die Umgebungstemperatur im Vergleich zum 1. RDE-Zyklus um ca. 5°C erhöht. Aus der Beschreibung der TFTA-Methode geht jedoch hervor, dass dieser Effekt eigentlich zu einer niedrigeren AR führen sollte. Als möglicher Erklärungsansatz für diese zu Beginn der Versuchsreihe hohen Streubreite verbleibt lediglich ein Einlaufeffekt des Reifens, wobei eine zweifelsfreie Zuordnung nicht möglich ist.

Auf der Landstraße und der Autobahn liefert der Referenzreifen sehr reproduzierbare Ergebnisse, wobei das Niveau der AR für das Autobahnstreckenprofil nochmals deutlich unterhalb der Landstraße liegt. Dies unterstreicht den Einfluss von hohen und häufigen Schleppwerten im Reifen-Fahrbahn-Kontakt als treibender Faktor der AR, da die Kurvenradien vergleichsweise groß und die Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge sowohl in der Häufigkeit als auch der Intensität niedriger ausgeprägt sind.

Im Falle vergleichbarer Beschleunigungen für den Landstraßen- und innerstädtischen Zyklus bleibt festzuhalten, dass der Vorschlag der TFTA-Methode, den innerstädtischen Prüfzyklus

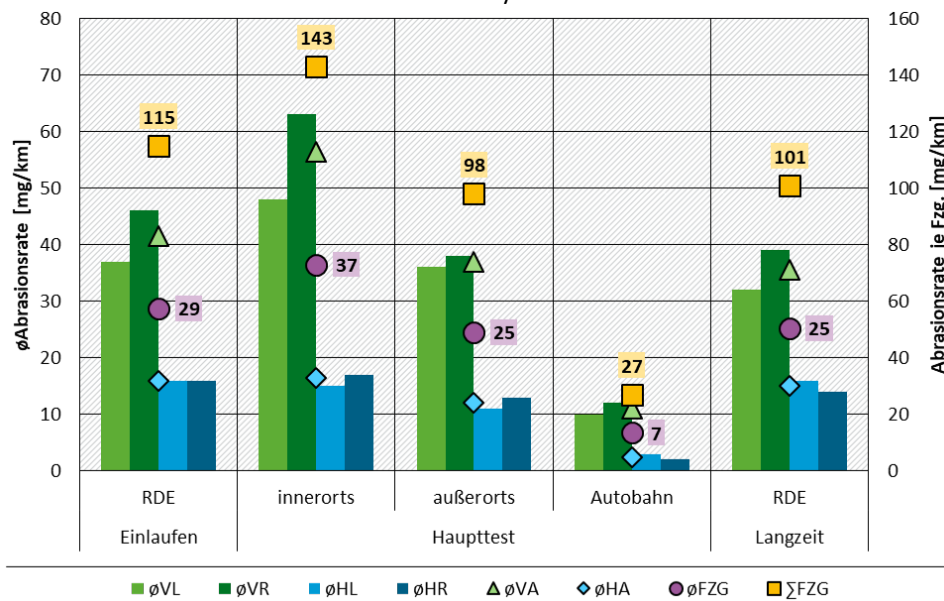
durch ein angepasstes Beschleunigungskollektiv auf der Landstraße abzubilden, nicht möglich ist, da hierdurch die AR sowohl für den innerstädtischen Prüfzyklus als auch den kombinierten Verschleißzyklus unterschätzt wird.

Prüfreifen 1

Der Prüfreifen PR-1 zeigt gemäß der Abbildung 12 qualitativ vergleichbare Ergebnisse zum Referenzreifen. Auffällig ist hier die Tendenz, dass der PR-1 im Landstraßenprofil eine vergleichsweise hohe AR aufweist, welche insbesondere durch die VA getrieben ist. In Kombination mit einer niedrigen AR im innerstädtischen und dem Autobahnprofil ergibt sich im Vergleich zum Referenzreifen eine dennoch gesteigerte AR im RDE-Profil.

Abbildung 12: AR des Prüfreifens 1

AR des Prüfreifens 1 für unterschiedliche Prüfzyklen



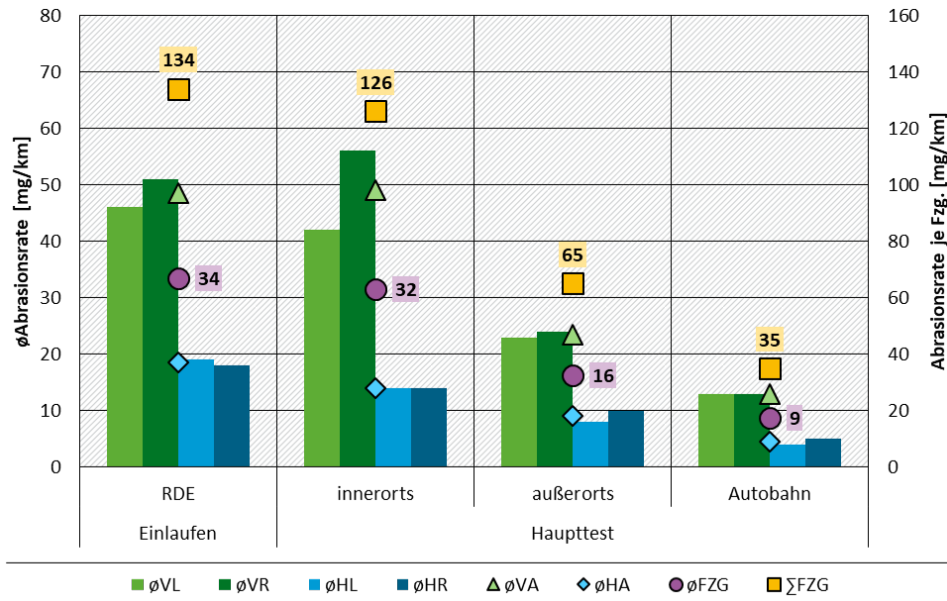
Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Prüfreifen 2

Der Prüfreifen PR-2 sollte laut der Vergleichsstudie eine leicht erhöhte AR gegenüber dem PR-1 aufweisen, was zu Beginn der Versuchsreihe durch das Ergebnis des RDE-Profiles bestätigt wurde (s. Abbildung 13). Jedoch ist vor allem der hier sowohl im Vergleich zum RDE-Profil als auch zum innerstädtischen Profil des PR-1 minimal geringere Messwert der AR im innerstädtischen Prüfzyklus auffällig. Es konnte festgestellt werden, dass die Außentemperatur bei der Durchführung der innerstädtischen Fahrversuche insgesamt auf einem höheren Niveau lag, als dies bei den RDE-Fahrversuchen der Fall war, wodurch die geringere AR teilweise zu erklären ist.

Abbildung 13: AR des Prüfreifens 2

AR des Prüfreifens 2 für unterschiedliche Prüfzyklen



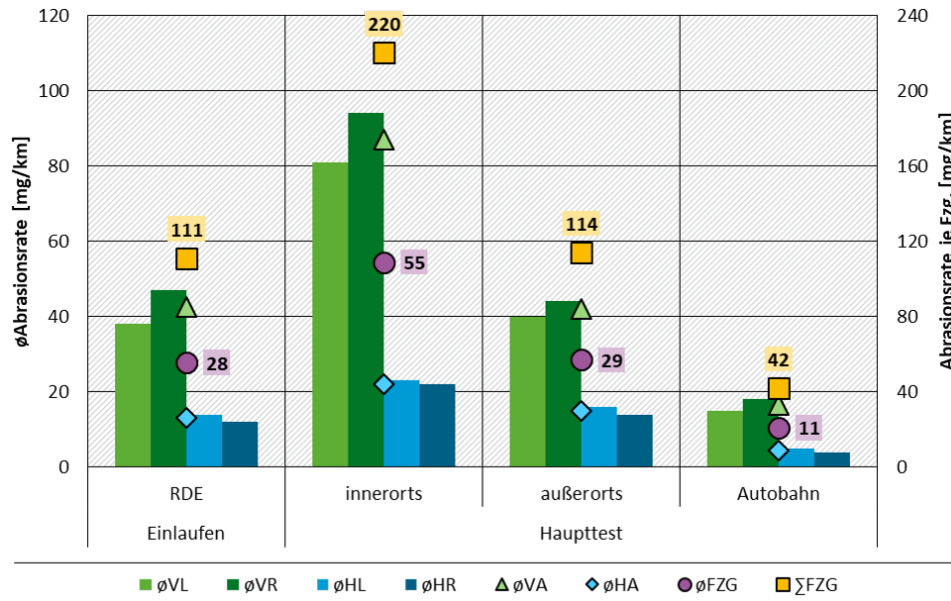
Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Prüfreifen 3

Die AR des Prüfreifens PR-3 liegt gemäß der Abbildung 14 und entsprechend der Erwartungen auf Basis der Vergleichsstudie des ADAC e.V. für alle Prüfzyklen auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Qualitativ folgen jedoch auch diese Ergebnisse dem Trend, dass durch den innerstädtischen Prüfzyklus die höchste AR generiert wird. Hervorzuheben ist hierbei, dass durch die geringen Streubreiten im RDE-Profil zu Beginn der Versuchsreihe als auch im weiteren Verlauf kein Einlaufeffekt zu erkennen war. Dies kann einerseits an den Eigenschaften des Prüfreifens liegen, andererseits auch an einer sehr konstanten Fahrweise über die gesamte Versuchsreihe. Daraus kann wiederum abgeleitet werden, dass ein Einfluss der Fahrweise möglicherweise einen als Einlaufeffekt bewertbaren Anstieg der AR zum Beginn einer Versuchsreihe überlagern oder verstärken kann. Zudem ist das Verhältnis der AR von der VA zur HA auffällig, welches deutlich oberhalb der Verhältnisse der bisher analysierten Prüfreifen liegt. Dies lässt die Vermutung zu, dass dieser Reifen besonders sensitiv auf hohe Schlupfwerte im niedrigen Geschwindigkeitsbereich reagiert.

Abbildung 14: AR des Prüfreifens 3

AR des Prüfreifens 3 für unterschiedliche Prüfzyklen



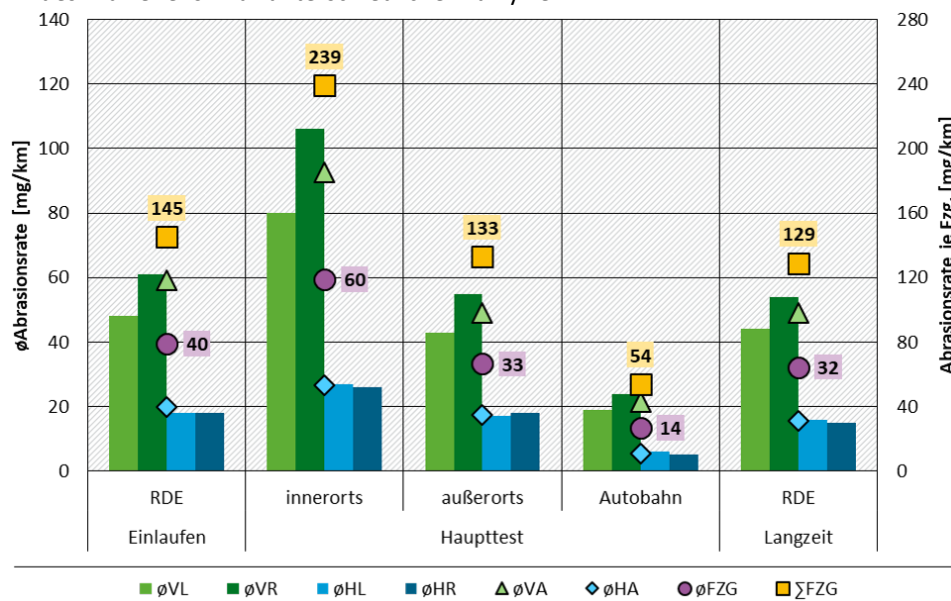
Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Prüfreifen 4

Der Prüfreifen PR-4 bestätigt anhand der in Abbildung 15 dargestellten Messergebnisse die zuvor beschriebenen Effekte. Die AR liegt entsprechend der Erwartungen nochmals oberhalb der AR des PR-3, wobei der qualitative Verlauf sehr gut korreliert. Für den PR-4 wurden insbesondere für den RDE- und innerstädtischen Prüfzyklus deutlich höhere Streubreiten gemessen, was durch einen Einlaufeffekt zu begründen sein kann, aber auch durch die zu Beginn der Messkampagne (RDE- und innerstädtischer Prüfzyklus) kontinuierlich abnehmende Außentemperatur bedingt war.

Abbildung 15: AR des Prüfreifens 4

AR des Prüfreifens 4 für unterschiedliche Prüfzyklen



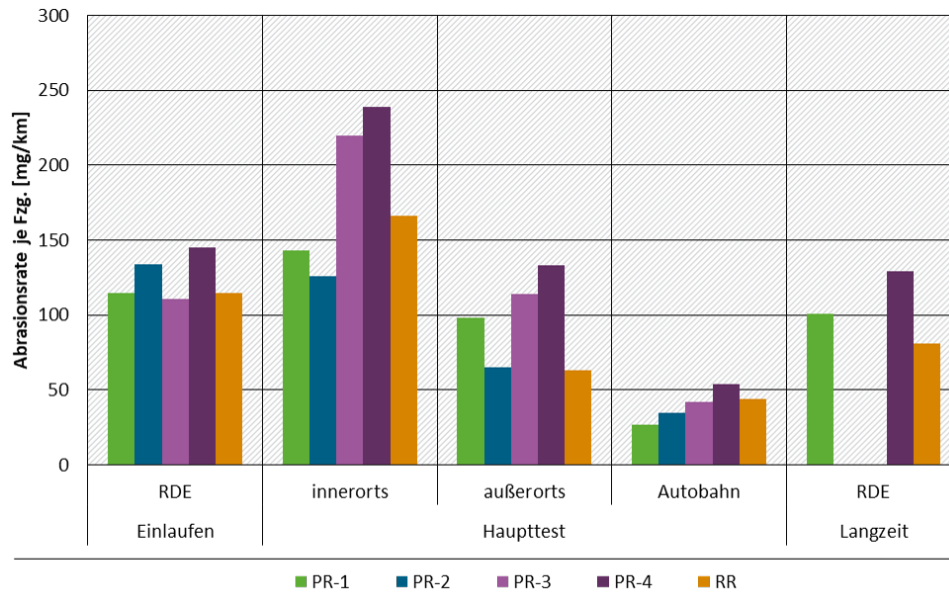
Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

3.3.5.2 Vergleich der Prüfzyklen

Aus den Ergebnissen der Messkampagne hat sich ein eindeutiges Bild ergeben, dass die AR aller getesteten Prüflinge vorwiegend in Abhängigkeit der Prüfzyklen und damit dem Streckenprofil stehen. Entsprechend der Abbildung 16: AR der Prüfzyklen wurden für den urbanen Prüfzyklus die höchsten AR und für das Autobahnprofil die niedrigsten AR gemessen. Die AR für das RDE- und das Landstraßenprofil liegen auf vergleichbaren Niveaus und reihen sich zwischen den gemessenen AR des urbanen und des Autobahnprofils ein.

Abbildung 16: AR der Prüfzyklen

Abriebraten der Prüf- und des Referenzreifens in Abhängigkeit der gefahrenen Prüfzyklen



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

In der Abbildung 16: AR der Prüfzyklen sind von links nach rechts die AR der Prüfreifen farblich sowie die AR des Referenzreifens für die jeweiligen Prüfzyklen dargestellt.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten und bestätigen, dass im urbanen Fahrbetrieb durch die Streckenführung und den daraus bedingten größeren Einfluss der Fahrweise die durchschnittlich höchsten AR erzielt werden. Dies ist vorwiegend durch häufige und enge Kurvenfahrten sowie Anhalte- und Anfahrmanöver zu erklären. Daraus ergeben sich quantitativ und qualitativ hohe Anteile von am Reifen wirkendem Längs- und Querschleif, welche maßgeblich den abrasiven Verschleißmechanismus der Reifenoberfläche beeinflussen.

Demzufolge ergeben sich für die RDE- und Landstraßenprofile niedrigere AR inkl. niedrigerer Streubreiten, die für das Autobahnprofil nochmals reduziert gemessen werden konnten.

Die absolut gemessenen AR sind unter dem Aspekt zu bewerten, dass diese Fahrten zu Beginn der jeweiligen Fahrversuche mit den jeweils fabrikneuen Prüflingen durchgeführt wurden. In dem Bereich der Prüfdistanz, die hierfür im Rahmen von ca. 0 – 550 km gelegen hat, wird durch andere Studien ein Einlaufeffekt der Reifen vermutet, der sich negativ auf die AR auswirkt (Silvestro, 2022; Ardanón, 2022). So ist davon auszugehen, dass das Ergebnis der Prüfreifen im RDE-Prüfzyklus zum einen insgesamt niedriger ausfällt, zum anderen aber auch die Streubreiten geringer ausfallen.

Weiterhin lässt sich aus den Messergebnissen im Vergleich zu den im Auswahlverfahren der Prüflinge (vgl. Tabelle 11: Auswahl der Testreifen) zitierten AR bezüglich der Rangordnung festhalten, dass diese nur im Falle des Autobahnprofils nachgewiesen werden konnte. Somit ist

trotz gleicher Versuchs-abläufe und -reihenfolge je Reifen nicht nachzuweisen, dass der PR-1 für alle Prüfzyklen die niedrigste AR und der PR-4 die höchste AR aufweist. Demnach ist die Reihung der Prüfreifen untereinander nicht für alle Prüfzyklen gleich. Der bzgl. AR beste Reifen ist folglich nicht für alle Prüfzyklen der beste; der schlechteste in Umkehrung nicht in allen Fällen der schlechteste. Eine „Best Case“ bzw. „Worst Case“ Betrachtung ist damit nicht zielführend. Die Reihung der Prüfreifen untereinander muss immer differenziert betrachtet werden bzw. es müssen - auf das Prüfverfahren bezogen - immer alle Prüfzyklen gefahren werden.

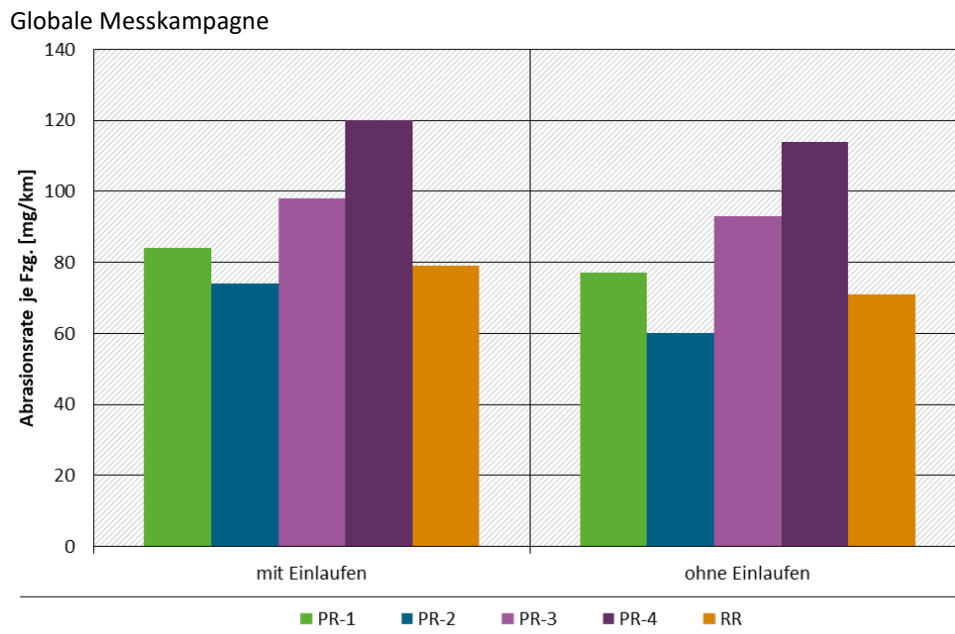
Vielmehr lassen sich anhand der Ergebnisse Rückschlüsse darauf ziehen, dass sich die charakteristischen Eigenschaften der Reifen, z.B. die Materialzusammensetzung, der Rollwiderstand, der Negativanteil des Profils sowie die Performanceauslegung in Abhängigkeit der Beanspruchung durch den Prüfzyklus unterschiedlich stark ausprägen. So hat jeder Reifen für ein gewisses Anwendungsspektrum Vor- und Nachteile mit entsprechend ableitbaren Effekten auf das Verschleißverhalten.

Der Vergleich der AR des Referenzreifens mit den gemittelten Ergebnissen der Prüfreifen lässt anhand der hier verwendeten Auswahl von Prüfreifen nur bedingt die Schlussfolgerung zu, dass er grundsätzlich als Referenzreifen geeignet ist. Dies ist im Hinblick auf die in der TFTA-Methode vorgesehene Indexierung der AR von Prüfreifen auf die AR des Referenzreifens von entscheidender Bedeutung. In der hier durchgeführten Messkampagne lag das Niveau der AR des Referenzreifens häufig, aber nicht in allen Fällen unterhalb der Niveaus der Prüfreifen.

3.3.5.3 Vergleich der Prüflinge

In diesem Abschnitt werden die AR der Prüflinge für die gesamte Messkampagne zusammengefasst. Zunächst ergeben sich anhand der Messergebnisse aus allen Versuchsfahrten die in Abbildung 17 dargestellten AR.

Abbildung 17: AR der Prüfreifen



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

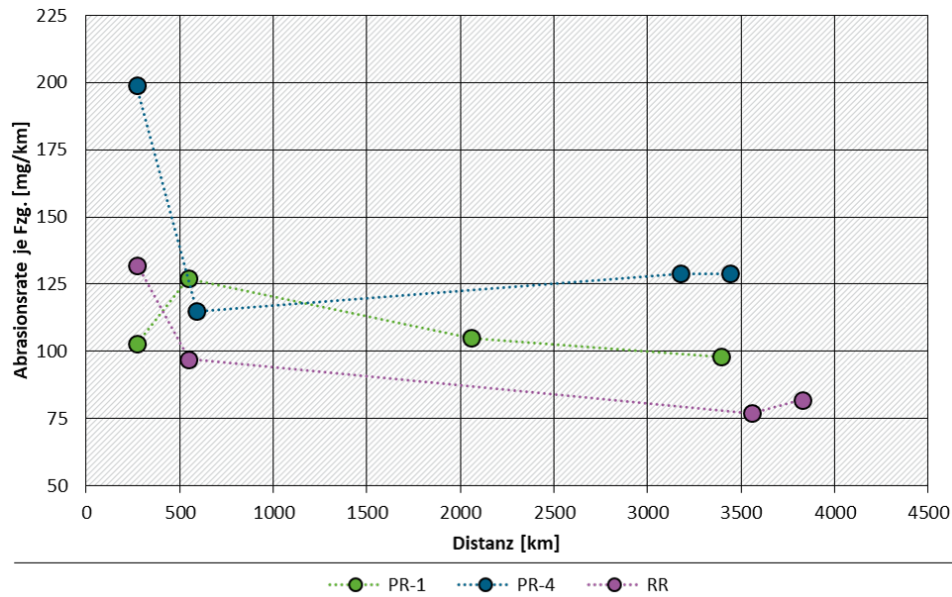
Hieraus wird ersichtlich, dass die Reifen annähernd der Rangordnung aus der Vergleichsstudie derart folgen, da das Niveau der AR von PR1 zu PR-4 aufsteigend zunimmt. Lediglich das Niveau der AR des Referenzreifens liegt insgesamt unterhalb aller Prüfreifen, anstatt sich im Mittelfeld zu bewegen. Dies ist aus den Einzelauswertungen im vorherigen Abschnitt hauptsächlich aus den Ergebnissen aus den RDE- und Landstraßenmessungen abzuleiten, wo die AR des Referenzreifens deutlich unterhalb der Niveaus der Prüfreifen lag. Anhand der Ergebnisse kann zunächst grundlegend festgehalten werden, dass es möglich ist, Reifen anhand einer definierten Methode qualitativ für unterschiedliche Prüfumgebungen zu vergleichen.

3.3.6 Entwicklung der AR im Verlauf von RDE-Messungen

Innerhalb der ersten 1000 km der Prüfdistanz ist mit einem Einlauffeffekt zu rechnen. Da dies im Verlauf der Messkampagne bestätigt werden konnte, wurden für eine Auswahl der Prüfreifen im Verlauf sowie zum Ende der Messkampagne Versuchsfahrten nach dem RDE-Profil wiederholt, um festzustellen, wie sich die AR über der Lebensdauer bzw. der Laufleistung verändert. Die Bestimmung der AR erfolgte jeweils nach einer RDE-Prüfdistanz von 270 km, dazwischen wurden ggf. abweichende Prüfzyklen gefahren. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 18 dargestellt.

Abbildung 18: Verlauf der AR im RDE-Prüfzyklus

Verlauf der AR im RDE-Prüfzyklus in Abhängigkeit von der Laufleistung



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die zunächst zu Beginn der Messkampagnen der jeweiligen Reifen durchgeführten Messungen nach dem RDE-Prüfzyklus werden anhand der nachfolgend gemessenen AR aufgrund der festgestellten Überlagerung von Einlaufeffekten als nicht aussagekräftig bewertet. Anhand der durchgeführten Messungen ist grundsätzlich zu bestätigen, dass diese Effekte die Messungen beeinflussen und somit eine genaue Interpretation erschweren.

Durch den Einlaufeffekt zeichnet sich die allgemeine Tendenz ab, dass die Abriebrate mit zunehmender Laufleistung abnimmt. Die in den Ergebnissen ablesbare Entwicklung bietet wichtige Erkenntnisse, auch wenn sie den Einlaufeffekt nicht vollständig abbilden. Hierzu ist vor allem der Einfluss schwankender Außentemperaturen auf die Abriebrate zu benennen. Der Anstieg der AR des RR ist vorrangig durch einen gemessenen Temperaturunterschied von 14°C bedingt. Daraus ergibt sich die Hypothese, dass die AR bei niedrigeren Temperaturen tendenziell höher ausfällt, da der Gummi verhärtet und damit stärker verschleißt. Diese Hypothese bildet einen bedeutenden Ansatzpunkt für weitere Untersuchungen und Forschungsarbeiten und erfordert eine genaue Analyse im Rahmen der Messkampagne der TFTA.

3.3.7 Zusammenfassung und Einordnung der Messergebnisse

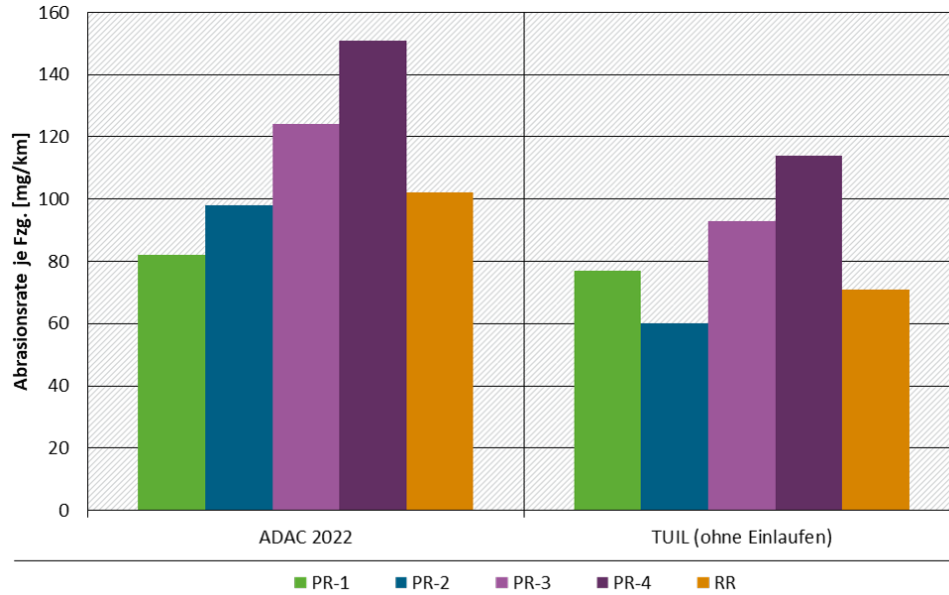
Die Messergebnisse zeigen die Niveaus der AR für fünf unterschiedliche Reifen in Abhängigkeit des gefahrenen Prüfzyklus auf, welche im realen Fahrbetrieb mit einem frontangetriebenen Fahrzeug ermittelt wurden.

Zunächst konnte nachgewiesen werden, dass die AR an der VA bei einem frontangetriebenen und -gelenkten Fahrzeug am höchsten ist. In diesem Zusammenhang konnte festgestellt werden, dass die AR an der VA ca. 75 % der AR des Gesamtfahrzeugs ausmacht bzw. ungefähr das 3-fache der AR der HA beträgt. Dabei ist weiterhin auffällig, dass die AR an der Radposition VR nochmals über dem Niveau der Radposition VL liegt. Dies ist zu hinterfragen, da in den jeweiligen Zyklen keine nennenswerten Unterschiede zwischen Querbeschleunigungen auftreten, die als Erklärungsmechanismus dienen könnten. Ebenso konnten durch mehrfache Überprüfung und Achsvermessung Unterschiede in der Radstellung des Versuchsfahrzeugs ausgeschlossen werden. Da

diese Unterschiede auch aus vergleichbaren Studien der TFTA bekannt sind, besteht hier für dieses Phänomen weiterer Forschungsbedarf.

Abbildung 19: Vergleich der Ergebnisse mit der Vergleichsstudie

Vergleich der Ergebnisse der Messkampagne mit der Vergleichsstudie des ADAC e.V.



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Datenquelle ADAC

Weiterhin konnte zweifelsfrei nachgewiesen werden, dass der innerstädtische Fahrbetrieb im Vergleich der Prüfzyklen durch eine Vielzahl von Anfahr- und Anhaltemanövern sowie engen Kurvenfahrten durch Abbiegevorgänge die höchste AR aufweist. Gemäß einer Studie der ETRTO beträgt der innerstädtischen Fahrprofile im EU-Durchschnitt ca. 31% (ETRTO, 2022). Aufgrund dieser Angabe sowie der erzielten Ergebnisse wird der Anteil der AR des innerstädtischen Prüfzyklus für einen kombinierten Prüfzyklus aus den Anteilen „urban“, „Landstraße“ und „Autobahn“ als maßgeblich eingestuft.

Für einen Vergleich der Messergebnisse zur Methode der TFTA ist der RDE-Prüfzyklus am besten geeignet, da dieses von der Zusammensetzung der Streckenanteile annähernd den Vorgaben der TFTA entspricht. Hierbei sind jedoch nur diejenigen Prüfzyklen heranzuziehen, die nach einem möglichen Einlauffeffekt durchgeführten wurden.

Da zum Zeitpunkt dieses Berichts für die untersuchten Reifen keine Messergebnisse aus der laufenden TFTA-Testkampagne veröffentlicht wurden, kann dieser Vergleich bzgl. der AR nicht angestellt werden.

Jedoch kann anhand der Ergebnisse aus den separierten Prüfzyklen (Urban, Landstraße, Autobahn) ein Rückschluss auf die maßgeblich treibenden Faktoren der AR gezogen werden, dass z.B. der urbane Prüfzyklus nicht durch eine Anpassung der Beschleunigungswerte auf der Landstraße repräsentativ nachgefahren werden kann, wie es im aktuellen Entwurf der TFTA-Methode beschrieben ist.

Hinsichtlich der Methode der TU Ilmenau zur Bestimmung von Reifenverschleiß war im Vergleich zur Methode der TFTA festzustellen, dass durch das Verwiegen der Prüflinge mit beaufschlagtem Reifenfülldruck eine Fehlerquelle besteht, die durch den Zielkonflikt der Durchführung eines Wägevorgangs im Anschluss an jede durchgeführte Prüffahrt entstanden ist. Im Rahmen einer Fehlereinflussanalyse wurde für zwei Prüfreifen unter Verwendung einer

weiteren Wägeeinrichtung ermittelt, dass ein Unterschied des Reifenfülldrucks von 0,2 bar eine Massenzunahme von ca. 6 g zur Folge hat.

Da diese Vorgabe innerhalb der Methode der TFTA nicht gestellt wird, sondern eine Wägung erst nach mehreren 1000 km und mit luftleeren Rädern durchgeführt wird, ist diese Vorgehensweise als robuster einzustufen.

Eine Zielstellung der Messkampagne war der qualitative Vergleich der gemessenen AR zu den Ergebnissen der erwähnten Vergleichsstudie des ADAC, auf deren Basis die Auswahl der Prüfreifen erfolgte. Dieser Vergleich kann aufgrund diverser Unterschiede nur bedingt angestellt werden, weshalb zunächst die notwendigen Eingrenzungen vorgenommen wurden.

Grundsätzlich können nur die Ergebnisse der RDE-Prüfzyklen verglichen werden, da die Vergleichsstudie des ADAC auf einen kombinierten Prüfzyklus zurückgegriffen hat. Dabei sind nur die Ergebnisse der Prüfreifen PR-1, PR-4 sowie RR heranzuziehen, da diese Reifen über den Verlauf der Messkampagne mehrfach im RDE-Prüfzyklus getestet wurden.

Der vom ADAC genutzte Zyklus zeigte reduzierte Anteile in Innenstadtgebieten, dafür erhöhte Anteile auf Autobahnen, da sich der ADAC bei der Auslegung seines Zyklus gegen die Einhaltung der RDE-Vorgaben entschieden hat, um eine Annäherung an reale Verteilungen der Prüfzyklen zu erzielen. Weiterhin beziehen sich die gemessenen AR auf eine erheblich höhere Gesamtdistanz im Vergleich zur Messkampagne an der TU Ilmenau (15.000 km vs. 3.000 km), die zusätzlich einen größeren Abstand zwischen den Messpunkten aufweisen (2.500 km vs. 270 km).

Zudem wurde die Studie des ADAC mittels Konvoifahrten durchgeführt, wohingegen in der Messkampagne der TU Ilmenau nur ein Versuchsfahrzeug eingesetzt wurde. Weiterhin wurden nicht die identischen Dimensionen der Prüflinge geprüft. Eine weitere Unsicherheit ergibt sich aus unterschiedlichen Produktionszeiträumen der Prüflinge.

Der ADAC hat im Sommer 2023 eine weitere Studie vorgestellt, in der die hier verwendeten Prüfreifen ebenfalls erneut getestet wurden. Jedoch wurden Teile der Versuche auf einem Prüfstand durchgeführt und die Ergebnisse für eine Übertragung auf reale Straßenbedingungen berechnet. Diese Vorgehensweise lässt Zweifel an der eindeutigen Interpretation der Ergebnisse aufkommen. Die Abweichung der Ergebnisse der Studien des ADAC untereinander könnten hierdurch begründet sein; als weiterer Einflussfaktor kommen Unterschiede in den getesteten Dimensionen hinzu.

Weiterhin ist durch die Durchführung der Messkampagne mit nur einem Versuchsfahrzeug ein direkter Vergleich der Messergebnisse nur bedingt möglich, da die Reifen nicht unter identischen Prüfbedingungen getestet werden konnten. Dies wurde jedoch durch die Analyse der Fahrweise sowie der herrschenden Außentemperaturen in der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt.

4 Bremsenabrieb

4.1 Aktivitäten der UNECE GRPE PMP IWG

Nachfolgend sind die bisherigen Aktivitäten der UNECE GRPE PMP IWG zusammengefasst, die im Vorfeld und während der Erarbeitung des Entwurfs der „Global Technical Regulation“ (GTR) (vgl. Kap. 2) stattgefunden haben.

► Task Force 1 (TF1)

Im Oktober 2016 wurde eine gesonderte Task Force von der PMP IWG eingerichtet, um die Entwicklung eines Testzyklus voranzutreiben. Dafür wurden insbesondere die klimatischen Bedingungen innerhalb der Prüfumgebung am Bremsenprüfstand, die Definition der Temperaturmessung, die Definition des Kühlluftstroms der Bremse anhand realer Fahrzeugparameter, die Unterstützung bei der Erarbeitung eines neuartigen Testzyklus und dessen Validierung in einer laborübergreifenden Studie (engl.: Inter-Laboratory Study (ILS)) als Aufgabenziele der TF1 definiert.

Ein Testzyklus, der auf der Datenbasis des „Worldwide harmonized Light Vehicle Test Procedure“ (WLTP) beruht, wurde als WLTP Bremsenzyklus (WLPT Brake) im Juli 2018 entwickelt und der PMP IWG von der TF1 im November 2018 vorgestellt (Mathissen, 2018). Dieser Zyklus wurde mittels einer ILS durch acht Prüflabore erprobt und validiert. Die Ergebnisse dieser ILS wurden der PMP IWG im April 2019 vorgestellt. Im Oktober 2019 schloss die TF1 ihre Aktivitäten nach 30 Meetings ab.

► Task Force 2 (TF2)

Im September 2017 wurde eine weitere Task Force eingerichtet, um Methoden und Instrumentierungen zur Probenahme und Messung von Bremsenemissionen zu untersuchen. Hieraus sollten ein geeigneter Versuchsaufbau sowie geeignete Instrumentierungen zur Probenahme von Partikelmassen- und Partikelanzahlkonzentrationen definiert und in einem Protokoll ausgearbeitet werden.

Im Juli 2021 legte die TF 2 der PMP IWG eine Empfehlung für die Mindestanforderungen zur Untersuchung von Bremsenemissionen vor. Diese Empfehlung wurde in einer zweiten ILS angewandt, um sie zu prüfen und zu optimieren. Aus dem im Anschluss an die ILS-2 überarbeiteten Protokoll wurde ein Vorschlag für den Entwurf für eine UN-GTR ausgearbeitet, welcher der PMP IWG im Juni 2022 von der TF2 vorgestellt wurde. Die TF2 schloss ihre Aktivitäten nach 45 Meetings im Juni 2022 ab.

► Task Force 3 (TF3)

Im März 2021 wurde die Task Force 3 zur Organisation und Durchführung der ILS-2 eingerichtet. Die Aufgaben der Task Force konzentrierten sich auf die Überprüfung der Durchführbarkeit sowie die Anwendbarkeit der festgelegten Spezifikationen für die Probenahme und Messung von Bremspartikelemissionen. Weiterhin sollte die Reproduzierbarkeit von PN- und PM-Emissionsmessungen untersucht werden. Hieraus abgeleitete Empfehlungen wurden zur weiteren Optimierung und Ergänzung der festgelegten Spezifikationen an die TF2 übermittelt.

Die ILS-2 begann im September 2021 und wurde im Januar 2022 abgeschlossen. Die Ergebnisse der ILS-2 wurden der PMP IWG im März 2022 präsentiert. Im April 2022 schloss die TF3 ihre Aktivitäten nach 6 Meetings ab.

► Task Force 4 (TF4)

Die PMP IWG richtete die Task Force 4 zur Erweiterung des Protokolls im Herbst 2021 ein. Das Ziel der TF4 ist die Integration einer Methodik für regenerative Bremssysteme in das Protokoll. Hierzu zählt sowohl die Definition von Rand- und Testbedingungen für die Emissionsmessung an regenerativen Bremssystemen als auch eine mögliche Bildung von Bremsenclustern, um die Abbildung des Worst-Case-Szenarios zu ermöglichen. Im Erhebungszeitraum wurden die generischen c-Faktoren erarbeitet; die Aussagen im vorliegenden Bericht beziehen sich auf den Bearbeitungszeitraum und nicht auf den Stand zur Veröffentlichung des Abschlussberichts.

4.2 Analyse des aktuellen Entwurfs der UN-GTR der UNECE GRPE PMP IWG

Nachfolgend wird der aktuelle Entwurf der GTR, welcher im Juni 2022 bereitgestellt wurde, analysiert und bewertet. Die Analyse ist dabei entsprechend der nachfolgenden Kapitel in mehrere Fragestellungen untergliedert. Der Entwurf der GTR wurde mit besonderem Fokus auf die aufgeführten Fragestellungen untersucht, um die GTR hinsichtlich ihrer Robustheit und zukünftigen Relevanz bzw. Zukunftssicherheit zu bewerten. Das Ziel ist demnach die Identifikation möglicher Schwachstellen in der GTR, welche eine spätere, auf ihr aufbauende Grenzwertimplementierung, und damit die letztendliche Minderung der bremsenseitigen Fahrzeugemissionen, erschweren oder z.T. verhindern können. Zudem soll abgesichert werden, dass sie als möglichst vollumfängliche Basis für andere Fahrzeugklassen oder neuartige Antriebs- & Verzögerungskonzepte dienen kann.

Die Analyse berücksichtigt und bezieht sich ggf. auf eingereichte Kommentare von Stakeholdern der IWG, um die Bewertung neutral zu halten.

4.2.1 Eignung der Methode zur Grenzwertimplementierung

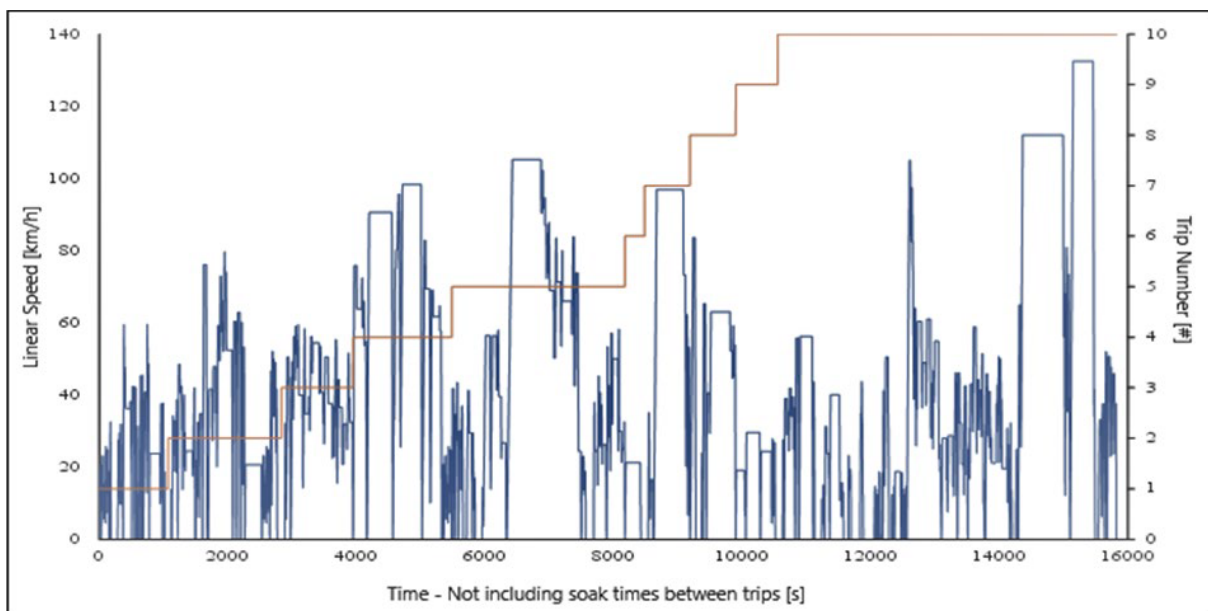
Der vorliegende Entwurf der UN-GTR wird nachfolgend hinsichtlich der Möglichkeiten zur Implementierung eines Grenzwertes zur Regulierung von Bremsenemissionen bewertet. Weil die UN-GTR auf die Messung der Parameter Partikelanzahl (PN), Partikelmasse (PM) und Verschleißmasse der Bremsenkomponenten ausgelegt ist, beziehen sich die nachfolgenden Abschnitte sowohl auf die Möglichkeit nur eines regulierten Parameters als auch auf mögliche Grenzwerte für alle genannten Emissions- bzw. Verschleißkenngrößen.

Randbedingungen

Die umfassende und detaillierte Anforderungsmatrix, welche in den Kapiteln 7 und 8 des Entwurfs der UN-GTR beschrieben ist, schafft eine robuste und einheitliche Basis zur Messung von Bremsenemissionen an einem Prüfstand und damit - im Unterschied zur Prüfmethode für den Reifenabrieb - in einer geschlossenen Prüfumgebung. Weil sich die UN-GTR auf Labormessungen stützt, wird grundsätzlich eine Vielzahl an Einflussparametern aus der Umwelt, welche die generelle Messfähigkeit negativ beeinflussen, eliminiert.

Der Entwurf der UN-GTR setzt strikte Rahmenbedingungen für die Ausstattung der Labore. Der Aufbau der Prüf- und Messstrecke unterliegt ebenfalls strengen Anforderungen, welche in den voran beschriebenen Task Forces erarbeitet wurden. Hierzu zählen vorrangig die geometrischen Bedingungen für die Positionierung des Bremssattels bei Scheibenbremsanlagen, die Einhausung der Bremsanlage, die Strömungskanäle der Zu- und Abluft sowie die Positionierung der Sonden zur Probenahme. Der Fokus liegt auf der Optimierung der Messfähigkeit, was der robusten Quantifizierung der Emissionen Priorität vor einer realitätsnahen Prüfumgebung einräumt.

Abbildung 20: Prüfverfahren WLTP-Bremsenzyklus



Quelle: (UNECE PMP, 2023)

Der WLTP-Bremsenzyklus basiert auf der WLTC-Datenbasis und besteht aus insgesamt 10 Sektionen (Trip Number). Der Zyklus wurde explizit auf die Implementierung in einer stationären Prüfumgebung zugeschnitten, um möglichst repräsentative und reproduzierbare Messergebnisse zu erzielen. Die Entwicklung des WLTP Brake-Zyklus ermöglicht die weiterführenden Prozesse, um eine Methode zur Messung von Bremsenemissionen über diverse Prüflabore hinweg zu etablieren.

Strömungsbedingungen

Die definierten Anforderungen an die Auslegung der Strömungskanäle sind positiv hervorzuheben, da die geforderte turbulente Strömung für eine gute Durchmischung des Probenahmevolumenstroms mit den emittierten Partikeln der Bremse ermöglicht. Weiterhin positiv zu benennen sind die isokinetische Probenahme sowie die angepassten bremsen- & fahrzeugspezifischen Kühlbedingungen. Dadurch werden die Betriebsbedingungen der Bremse insoweit realistisch abgebildet, dass die Entstehungsprozesse der Partikelemissionen nicht grundlegend verfälscht oder beeinflusst werden (Augsburg, 2018).

Für die Einstellung der Kühlluftzufuhr wird gemäß UN GTR No. 24 (2023) der Trip #10 des WLTP-Bremsenzyklus bei der PMP verwendet, und nach dem WL/DM-Verhältnis aus Tabelle 12 der Luftstrom an die vorliegende Vorderachsbremse angepasst. Bei hinteren Scheibenbremsen ist der identische Wert für den Kühlluftstrom entsprechend der vorderen Bremsanlage anzuwenden. Die entsprechende WL/DM-Kategorie wird anhand der Daten von der Vorderachsbremse vorgenommen. Bei der Verwendung von Trommelbremsen an der Hinterachse wird der festgelegte Nenn- bzw. Soll-Kühlluftstrom verwendet, wobei die Zuordnung der entsprechenden WL/DM-Kategorie anhand der Daten der Vorderradbremse erfolgt.

Tabelle 12: Einstellung der Kühlluftzufuhr Anhand von Trip #10 (Storch et al., 2023)

| Group | T _{ave} [A ₁] | IBT [A ₂] ± Tolerance | IBT [A ₃] ± Tolerance |
|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| WL _n /DM≤45 | ≥ 50 °C | 60 ± 20 °C | 90 ± 30 °C |
| 45<WL _n /DM≤65 | ≥ 55 °C | 70 ± 20 °C | 110 ± 30 °C |
| 65 < WL _n /DM≤85 | ≥ 60 °C | 80 ± 20 °C | 125 ± 30 °C |
| WL _n /DM>85 | ≥ 65 °C | 90 ± 20 °C | 145 ± 30 °C |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die Methode der PMP IWG stellt insofern einen gut begründeten Kompromiss zwischen der Realitätsnähe und dem Messaufwand dar. Zudem sind für alle Reibpaarungen sowie für Vorderrad-, Hinterrad- sowie Trommelbremsen Werte in der Tabelle 12 gegeben, mit denen sich reproduzierbare und repräsentative Messungen ergeben. Der Ansatz in der UN-GTR ist ebenfalls für eine Implementierung in ein internationales Messverfahren geeignet, da die Vorgehensweise für jedes Labor genauestens definiert wird. Zudem ist der Ansatz in der UN-GTR von jedem Labor umsetzbar, ohne dass Zusatzmessungen notwendig sind, die über die eigentlichen Bremsenemissionstests hinausgehen.

Messfähigkeit der Partikelemissionen und des Verschleißes – Hintergrundkonzentration

Vor der Messung der Partikelemissionen wird zunächst die Hintergrundkonzentration in der Prüfumgebung bestimmt. Ziel ist es hohe Hintergrundkonzentrationen zu vermeiden, um reproduzierbare und repräsentative Bremsenemissionsprüfungen durchführen zu können. Zudem ist die Ermittlung des Hintergrundwertes für die Vergleichbarkeit der Labore untereinander von besonderer Relevanz. Die Messung der Hintergrundkonzentration erfolgt unter genau definierten Bedingungen. Es werden die Konzentrationen der insgesamt messbaren Partikel (engl.: Total Particle Number, „TPN10“) sowie der Feststoffpartikel (engl.: Solid Particle Number, „SPN10“) mit einem Elektromobilitätsdurchmesser von größer 10 nm gemessen, wobei ein Wert von 20 #/cm³ für die Hintergrundkonzentration auf der System- und der Testebene für die gemessenen Werte nicht überschritten werden darf. Zunächst erfolgt die Prüfung auf Systemebene, bei der eine Messung der Hintergrundkonzentration ohne die Installation der Bremsenhalterung und Bremsenkomponenten im Inneren des Bremsengehäuses stattfindet. Diese Art von Prüfung wird nach Wartungsarbeiten sowie beim Auftreten von Störungen ggf. erneut durchgeführt. Die Prüfung auf Testebene erfolgt vor und nach Bremsenemissionsmessungen. Dabei ist die Bremsenbaugruppe montiert, wobei sich die Scheibe oder Trommel nicht dreht und die Beläge bzw. Backen vollständig eingefahren sind. Es darf keine Betätigung erfolgen, also kein Bremsdruck anliegen. Die gemessene Hintergrundkonzentration wird als Partikelanzahl in Abhängigkeit der zurückgelegten Strecke angegeben, um die bei verschiedenen Bremsen veränderten Kühlluft Einstellungen zu berücksichtigen und darf am Ende der Messung von den Emissionen nicht abgezogen werden. Die Konzentration im Hintergrund pro zurückgelegte Fahrstrecke wird am Ende der Messungen mit zwei Gleichungen berechnet.

Formel 1: TPN10-Hintergrundkonzentration (UNECE, 2023)

$$TPN10_{bEF} = 10^6 \times TPN10_{b\#} \times NQ \div V_{Set}$$

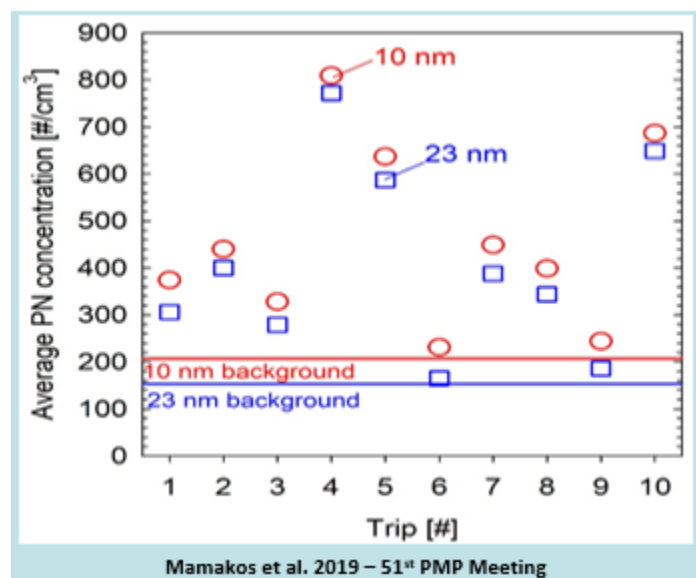
Formel 2: SPN10-Hintergrundkonzentration

$$\text{SPN10}_{\text{bEF}} = 10^6 \times \text{SPN10}_{\text{b\#}} \times NQ \div V_{\text{Set}}$$

Dabei ist $\text{TPN10}_{\text{b\#}}$ die normalisierte durchschnittliche PCRF-korrigierte TPN10-Hintergrundkonzentration und $\text{SPN10}_{\text{b\#}}$ die normalisierte durchschnittliche PCRF-korrigierte SPN10-Hintergrundkonzentration, wobei beide Werte in $\#/\text{cm}^3$ angegeben werden. Der Parameter NQ gibt den durchschnittlich normalisierten Luftstrom im Probenahmetunnel in Nm^3/h an. V_{Set} ist die Nenngeschwindigkeit, welche über den WLTP-Bremszyklus durchschnittlich und normalisiert auftritt. Die Formeln für die Berechnung des jeweiligen Wertes der Hintergrundkonzentration sind aufgrund der unterschiedlichen Gehäusedesigns notwendig, um die Vergleichbarkeit der Labore untereinander zu gewährleisten und reproduzierbare sowie repräsentative Messungen durchführen zu können. Die durchschnittlichen Werte werden aus den insgesamt gemessenen PN-Hintergrundkonzentrationen ermittelt, wobei sowohl die auftretenden TPN als auch SPN berücksichtigt werden. Bei allen Emissionsprüfungen erfolgt die Berechnung und Angabe der Konzentration auf Testebene.

Der Ansatz in der UN-GTR ist für die Implementierung in ein Regulierungsverfahren geeignet. Aus der Abbildung 14 ist zu erkennen, dass die im Emissionstest gemessenen Partikelanzahlkonzentration teilweise sehr nahe an der gemessenen Hintergrundkonzentration liegt, weshalb diese bei den Emissionsprüfungen immer anzugeben ist.

Abbildung 21: Hintergrundkonzentrationswerte über den WLTP-Bremsenzyklus



Quelle: (UNECE PMP, 2020)

Messfähigkeit der Partikelemissionen und des Verschleißes – Verschleiß

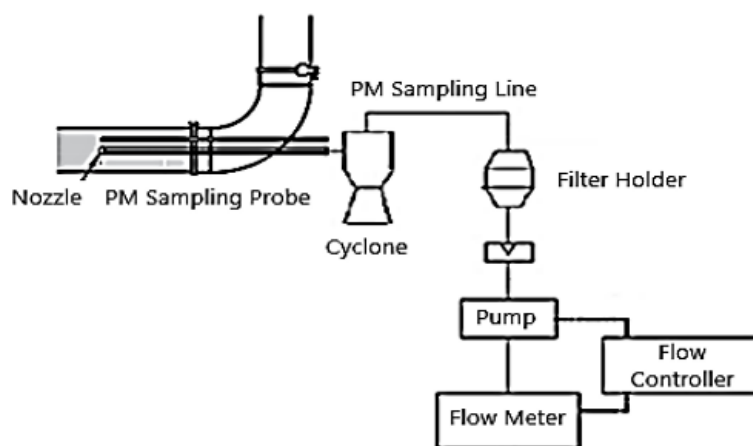
Eine Feststellung der Massenverluste ist für die Abschätzung der Robustheit und Korrektheit des gesamten Messverfahrens hilfreich. Zudem bietet sie eine zusätzliche Möglichkeit zur Validierung, um die Repräsentativität sowie Reproduzierbarkeit des gesamten Messverfahrens zu garantieren. Die Komponenten der Bremse werden vor der Messung mit einem Staubsauger gereinigt und von jeglichen Rückständen befreit. Für die Messung ist für Teile bis 30 kg eine

Waage mit einer Auflösung von mindestens 0,01 g oder besser bei Standardlaborbedingungen von $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ und $(45 \pm 8) \% \text{RH}$ zu verwenden. Die Temperatur der Bremsenteile liegt dabei unter 30°C . Der Gesamtmassenverlust des Reibpaares wird durch Wiegen der ursprünglichen Gesamtmasse und anschließender Subtraktion der Masse nach der Messung gebildet. Die Temperatur der Bremsenteile liegt dabei unter 30°C und das Endergebnis wird in die PM-Massemessdatei eingetragen. Zusätzlich kann der Dickenverlust von Bremscheiben oder -trommeln bestimmt werden, wobei der Dickenverlust unter der Nachweisgrenze oder Auflösung des Messgerätes liegen kann. Die vorgegebene Messmethode entstammt der SAE J2986:2019 Recommended Practice. Es sind nur Messinstrumente im einwandfreien Zustand zu verwenden und zudem sind die Reibpaarungen auf Grate, Risse, Lücken sowie Ablösungen zu überprüfen. Für die Dickenmessung ist eine Messschraube (Mikrometerschraube) oder ein gleichwertiges Messinstrument mit flachen Oberflächen an den Berührungspunkten zu benutzen.

Messfähigkeit der Partikelemissionen und des Verschleißes – PM-Emissionen

Ziel ist es, eine genau definierte Methode in den einzelnen Laboren anzuwenden, um die Emissionsfaktoren in Masse pro zurückgelegte Strecke anzugeben. Dies dient der Vergleichbarkeit der Labore untereinander, jedoch auch um die Repräsentativität und die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Die PM₁₀- und PM_{2,5}-Emissionen werden gravimetrisch mit getrennten Probenahmesystemen und Messgeräten für die einzelnen Grenzdurchmesser $2,5\ \mu\text{m}$ und $10\ \mu\text{m}$ gemessen. Es sind im Tunnel zwei PM-Probenahmesonden angebracht, an deren Spitze sich geeignete Probenahmedüsen befinden, zudem wird ein Zyklon als Abscheider für volatile Partikel eingesetzt. Die Partikel werden über eine Probenahmeleitung von der Abscheidevorrichtung auf den Filterhalter transportiert, welcher die Partikel sammelt (UNECE, 2023).

Abbildung 22: PM Probenahmesystem



Quelle: Storch et al., 2023

Es dürfen im gesamten Messsystem keine Strömungsteiler verwendet werden. Die Partikelverluste von der Düsen Spitze bis zur Abscheidevorrichtung sollen durch Wahl geeigneter Sonden minimiert werden. Die Düsen sind vor jeder Prüfung nach Herstellerangaben zu reinigen. Bei der Messung von Bremsenemissionen muss das isokinetische Verhältnis durchschnittlich bei 0,90 bis 1,15 liegen. Vor Beginn der Prüfung werden die eingesetzten Filter

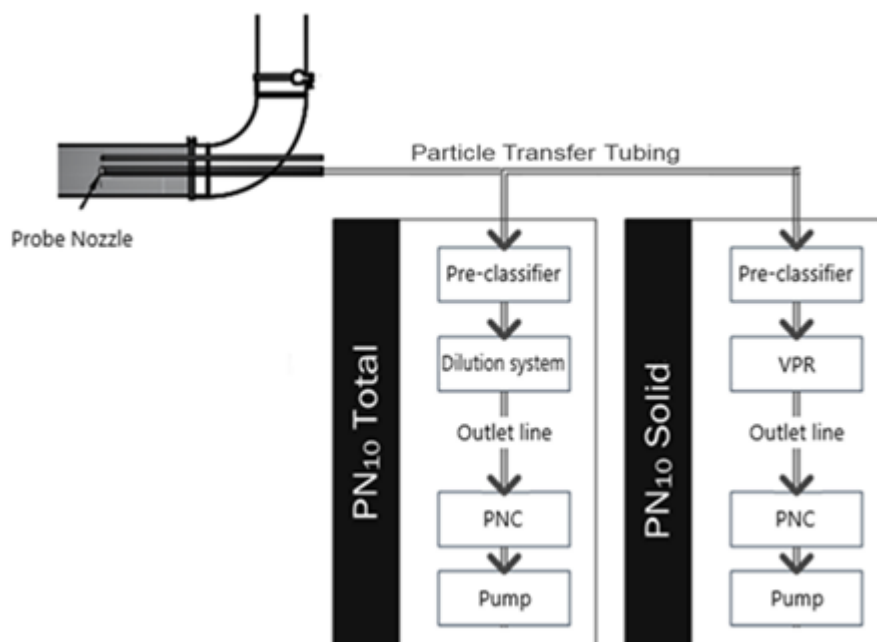
zunächst unter strengen Auflagen konditioniert und verwogen. Im Anschluss an die Prüfung wird der Filter in einen Wiegeraum mit einer Umgebungstemperatur von $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(45 \pm 8) \% \text{ RH}$ unter genau definierten Anforderungen transportiert und anschließend verwogen. Nach der Auswertung wird der Emissionsfaktor pro zurückgelegte Strecke durch genau definierte Gleichungen für die jeweilige Partikelgröße angegeben.

Der Entwurf der UN-GTR sieht zur Messung der PM-Emissionen keinen Impaktor vor, sondern einen Zyklonabscheider für die Partikelaufeilung. Der Zyklonabscheider ist im Rahmen einer Gesetzgebung das beste Messinstrument, da nur genau definierte PM-Emissionen gemessen werden. Ein Impaktor mit vielen Trenndurchmessern besitzt den Nachteil, dass durch die vielen Filterwirkungsgrade unnötige Toleranzen beziehungsweise Fehlerquellen in die Messungen einfließen.

Messfähigkeit der Partikelemissionen und des Verschleißes – PN-Emissionen

Die Quantifizierung der Anzahl von Partikeln ist das Ziel der PN-Probenahme. Zudem ist es wichtig, in den einzelnen Laboren eine genau definierte Methode anzuwenden, um die emittierte Partikelanzahl pro zurückgelegter Strecke anzugeben. Dies dient zur Vergleichbarkeit der Labore untereinander, jedoch auch um die Repräsentativität und die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Bei den Bremsenemissionsmessungen muss das Messsystem die Fähigkeit besitzen, Total-PN (TPN₁₀) und Solid-PN (SPN₁₀) bei ca. 10 nm Elektromobilitätsdurchmesser und größer zu messen (UNECE, 2023).

Abbildung 23: PN Probenahmesystem



Quelle: Storch et al., 2023

Der Aufbau für die Messung der PN-Emissionen ist in Abbildung 14 dargestellt. Dieser besteht aus einer PN-Probenahmesonde, an der eine passende Düse installiert ist. Die Partikel werden anschließend über ein geeignetes Rohr vom Ausgang der Probenahmesonde zum Vorklassierer transportiert, um diese anschließend zum Verdünnungssystem weiterzuleiten. Für die Entfernung größerer Partikel wird ein Vorabscheider eingesetzt. Die Partikel werden durch eine

interne Transferleitung vom Auslass des Verdünnungssystems zum Einlass des Zählgerätes für die Partikel transportiert. Die Konzentration der TPN-10 wird durch einen Partikelzähler ermittelt. Man unterscheidet bei der Zählung der Partikelanzahl zwischen den Solid- und Total-PN. Das besondere an der Ermittlung der Solid-PN ist, dass eine beheizte Verdünnungsstufe bei der Messung mit einer Temperatur zwischen 150-350°C eingesetzt werden kann, wobei der Sollwert der Wandtemperatur nicht höher sein darf als die Wandtemperatur des Verdampfungsrohres. Die PN-Emissionen werden mittels vordefinierter Gleichungen für den jeweils betrachteten aerodynamischen Durchmesser berechnet.

Messfähigkeit der Partikelemissionen und des Verschleißes – Fazit

Die Methode von PMP ist für die Implementierung in ein Regulierungsverfahren sehr gut geeignet, da sie zum einen mit der Beachtung von 10 nm-Partikeln die technischen Möglichkeiten zur Erfassung kleinster Partikel ausnutzt und zudem die genauesten Anforderungen für ein Messverfahren stellt. Durch die Verwendung eines CPC ohne weitere ergänzende Messinstrumente können beim Einsatz eines Vorklassierers mit einer Trenngrenze von 2,5 µm nicht alle Partikel bei der Zählung identifiziert werden und in die Messung einfließen. Allerdings wurde festgestellt, dass die maximale Partikelanzahlkonzentration bei den Bremsenemissionsmessungen unterhalb eines aerodynamischen Durchmessers von 2,5 µm liegt. Um das Verstopfen eines CPC zu verhindern ist der Einsatz eines Vorklassierers sinnvoll.

Um eine hohe Genauigkeit für die Durchflussrate während der Probenahme zu gewährleisten, sind für feine Partikel Vollstrom-CPCs notwendig. Allerdings sind Pulshöhenfehler, bei denen die Empfindlichkeit plötzlich abnimmt, Verstopfungen sowie Butanol-Rückströme bei den genannten CPCs von Nachteil. Teilstrom-CPC oder vordefinierte Verdünnungsraten schaffen Abhilfe und werden in der innerhalb der UN-GTR beschriebenen Methode eingesetzt. Somit sind reproduzierbare und repräsentative Messungen möglich. Zudem werden Zyklone eingesetzt, um große Partikel zu entfernen, wobei zusätzlich ein Kapillarverdünner stromabwärts des PM_{2,5}-Zyklons im System verbaut ist. Es lässt sich abschließend festhalten, dass mit dem Ansatz der UN-GTR repräsentative und reproduzierbare Messungen möglich sind. Zudem ist es diejenige Vorgehensweise, mit der man die für eine Gesetzgebung relevanten Kennwerte effektiv und effizient bestimmt, ohne zusätzlichen Messaufwand zu betreiben.

Dokumentation der Ergebnisse

Die Aufzeichnung und Dokumentation der Messergebnisse erfolgt anhand eines in Kapitel 13 der UN-GTR definierten Anforderungsprofils an den Prüfbericht, welcher sich aus einer ereignisbasierten Auswertung, einer zeitbasierten Auswertung, einer Auswertung der PM-Emissionen und einer Dokumentation des Prüfablaufs zusammensetzt. Die PM-Emissionen bekommen aufgrund des gravimetrischen Offline-Messverfahrens, welches erst im Nachgang des Versuchs ausgewertet werden kann, eine separate Messdatei.

Die ereignisbasierte Auswertung umfasst diverse Parameter, welche die jeweiligen Bremsungen beschreiben, wie u.a. Geschwindigkeit, Verzögerung, Bremsmoment, Bremsscheibentemperatur und Reibleistung. Eine Berechnung der PN-Emission je Bremsung ist hier nicht vorgesehen, was zwar eine sehr interessante Messgröße wäre, die allerdings innerhalb der Randbedingungen kaum zu definieren ist. Die größte Schwierigkeit hierbei stellt die Messstrecke dar, da der Zeitverzug zwischen der Emission an der Bremse und der Detektion im Messgerät nicht einheitlich über alle Prüflabore gestaltet werden kann. Daher konnte in der UN-GTR kein Zeitbereich definiert werden, der äquivalent zu Beginn und Ende einer Bremsung ist und innerhalb dessen die PN-Emissionen entsprechend zusammengefasst werden können.

Kalibrierungsvorschriften und laufende Qualitätskontrollen

Einige Reibpaarungen könnten möglicherweise Probleme in Verbindung mit der Hintergrundkonzentration oder dem Hintergrundrauschen derart aufweisen, dass diese Emissionswerte kaum messbar sind. Allgemein sollte ein Reinigungsintervall definiert werden, welches insbesondere darauf abzielt, den Umgang mit einem Versuchsabbruch zu beschreiben. Hierbei geht es konkret um die Frage, ob zwischen einem Versuchsabbruch und einem Neustart eine Reinigung erforderlich ist, um mögliche Rückstände aus dem abgebrochenen Versuch zu entfernen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf das jeweilige Abbruchkriterium von Relevanz, da es durch einen fehlgeschlagenen Versuch zu einer erhöhten Emission kommen kann, die ohne eine Reinigung vor dem Neustart des Versuchs eine Überhöhung der Emissionsmessung des neu gestarteten Versuchs zur Folge haben kann. Weiterhin kann die Hintergrundkonzentration die Detektion von tatsächlichen Partikelemissionen beeinträchtigen, da sie unter oder auf dem Niveau der Hintergrundkonzentration liegen könnten.

Die Kalibrierung der Messgeräte, wie z.B. des Kondensationspartikelzählers (CPC), ist entscheidend und sollte in einem nach ISO 27891 akkreditierten Labor gemäß GTR 15 durchgeführt werden. Das Kalibrierungszertifikat darf nicht älter als ein Jahr vor der Prüfung sein.

Um repräsentative Ergebnisse zu erzielen, ist es wichtig, dass keine äußeren Einflüsse die Messergebnisse verfälschen. Dies schließt Ablagerungen an Bauteilen, Strömungsstörungen bei der Probenahme, Feuchtigkeit und andere Faktoren ein. Das Temperaturprofil, sei es von der Bremse oder der Umgebung, sollte möglichst realitätsnah nachgebildet werden. Die Methode beruht auf der Nutzung von Bremsenkomponentenprüfständen, da die Installation von Messtechnik für Bremsenemissionen in Fahrzeugen aufgrund von Einschränkungen im Hinblick auf die mobile Anwendung sowie variable Betriebsbedingungen im realen Fahrversuch herausfordernd ist. Der Prüfstand stellt daher einen sinnvollen Kompromiss zwischen der Abbildung realer Betriebsbedingungen bei reduziertem Prüfumfang dar.

Eine mögliche Ergänzung der Methode durch RDE-Messungen in bestimmten Fahrzeugklassen könnte Aufschluss über die Robustheit des Messverfahrens am Prüfstand liefern und helfen zu klären, ob die Methode generell dazu neigt, die Emissionen zu über- oder zu unterschätzen. Dies ist vor allem im Hinblick auf die Bremsenemissionen batterieelektrischer Fahrzeuge mit hohem Rekuperationspotenzial von entscheidender Bedeutung, da die Emissionsmessung dieser Fahrzeuge im Rahmen der Methode anhand der konventionellen Betriebsweise ohne Rekuperation ermittelt wird und die Minderung durch die Rekuperationsfähigkeit schlussendlich mittels definierter Koeffizienten berechnet wird. Diese Koeffizienten weichen allerdings von der Realität im Fahrgeschehen des Einzelfahrzeugs auf der Straße ab.

Fazit

Vor diesem Hintergrund lassen sich keine gravierenden Aspekte für eine Einschränkung einer Implementierung eines Grenzwertes auf Basis der vorliegenden UN-GTR identifizieren. Die Messung von PM-Emissionen können höheren Handhabungsfehlern unterliegen, jedoch sind Risiken durch Messfehler aufgrund baulicher Maßnahmen und der mehrfachen Überarbeitung des CVS-Systems inkl. der Krümmungsradien der Strömungskanäle sowie die Positionierung der Sonden zur Probenahme als gering einzustufen.

4.2.2 Übertragbarkeit der Methode auf weitere Fahrzeugflotten, bzw. Flottenbestandteile

4.2.2.1 Schwere Nutzfahrzeuge

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Methode auf schwere Nutzfahrzeuge müssen gewisse Randbedingungen angepasst werden. Für die generelle Methodik zur Messung der Emissionen in einer stationären Prüfumgebung sind keine K.O.-Kriterien auszumachen.

Zunächst ist der WLTP-Bremsenzyklus für schwere Nutzfahrzeuge neu zu definieren, da diese aufgrund ihres Einsatzgebietes ein anderes Lastkollektiv abfahren als PKW und leichte Nutzfahrzeuge. Hierbei sind vor allem Autobahnabschnitte mit starkem und langem Gefälle als kritische Manöver zu bedenken. In dem Zusammenhang ist der Einsatz und die Bewertung von Hilfs- und Dauerbremsanlagen für schwere Nutzfahrzeuge zu berücksichtigen. Weiterhin ist der Ladungszustand als Kriterium zu integrieren, da schwere Nutzfahrzeuge zur Vermeidung von Leerfahrten nach Möglichkeit voll beladen betrieben werden. Daraus leitet sich ab, dass der Fall des maximalen Energieumsatzes durch die Reibungsbremse auch hinsichtlich der Kühlphasen sowie zeitversetzter Sekundäremissionen einkalkuliert werden muss.

Auf der technischen Seite ist sicherzustellen, dass die Prüfstände der Prüflabore in der Lage sind, die Verzögerungen mit den entsprechenden Bremsmomenten umzusetzen. Hier sind darüber hinaus das Gehäusedesign sowie dessen Abmessungen für die Bremssysteme schwerer Nutzfahrzeuge anzupassen.

Abschließend ist die Entwicklung eines alternativen oder mindestens angepassten Bremszyklus für HDV (Heavy-Duty Vehicles) denkbar, wobei die Entwicklungsstrategie der hier beschriebenen Methode als Grundlage für diesen neuen Zyklus dienen kann. Dies wäre ein entscheidender Schritt, um die speziellen Anforderungen von schweren Nutzfahrzeugen angemessen zu berücksichtigen und sicherzustellen, dass auch sie die Emissionsnormen erfüllen.

4.2.2.2 Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten und regenerativen Bremssystemen

Im vorliegenden Entwurf der UN-GTR ist das regenerative Bremsen bisher weitestgehend undefiniert bzw. nicht berücksichtigt worden. Da diese Bremssysteme jedoch in Serienfahrzeugen eingesetzt werden und durch die fortschreitende Elektrifizierung in zukünftigen Fahrzeuggenerationen eine besondere Relevanz haben, ist dieser Themenbereich essentiell für die Zukunftsfähigkeit dieser UN-GTR. Die Integration regenerativer Bremssysteme in die UN-GTR ist durch die Vielfalt an Elektrifizierungsgraden (z.B. Mild-Hybrid-Fahrzeuge, Plug-In-Hybridfahrzeuge, batterieelektrische Fahrzeuge) eine komplexe Aufgabe, da sich die Rekuperationspotenziale dieser Fahrzeuge stark unterscheiden. Die letztendliche Rekuperationsleistung eines Fahrzeugs wird jedoch hauptsächlich von der Applikation und Auslegung des regenerativen Bremssystems definiert.

Daher werden im Folgenden die Schwerpunkte aufgezeigt, die für eine robuste Integration regenerativer Bremssysteme in die UN-GTR unerlässlich sind.

Rand- und Prüfbedingungen

Für möglichst vergleichbare Ergebnisse zur Messung und Quantifizierung der Partikelemissionen von Fahrzeugen mit regenerativen Bremsanlagen müssen die Anforderungen an die Ausstattung der Prüflabore, des Versuchsaufbaus, der Messstrecke, der Probenahme und der Messtechnik identisch zu den Rahmenbedingungen sein, die für konventionelle Bremsanlagen vorgesehen sind (Grigoratos & Martini, 2015).

Fahrzyklus

Das zugrundeliegende zeitbasierte Geschwindigkeitsprofil des WLTP Bremsenzyklus aus der UN-GTR sollte aus Gründen der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zu konventionellen Reibungsbremsen ohne Energierückgewinnung beibehalten werden. Das zeitbasierte Geschwindigkeitsprofil beruht auf der umfangreichen WLTP-Datenbasis und deckt reale Prüfzyklen ab. Da Fahrzeuge mit regenerativen Bremssystemen im gleichen Einsatzgebiet verkehren wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, sind hierfür keine weiteren Anpassungen notwendig, was die Entwicklungsarbeit reduziert. Außerdem wurde der WLTP-Bremsenzyklus ausgiebig erprobt und weist eine hohe Repräsentativität sowie Reproduzierbarkeit auf (Farwick zum Hagen, 2019; Feißel et al., 2020; Feißel et al., 2022)..

Einstellung des Kühlluftstroms („Cooling Adjustment Section“)

Die Einstellung des Kühlluftstroms unterliegt für regenerative Bremssysteme anderen Randbedingungen als für konventionelle Reibungsbremssysteme. Der vorliegende Entwurf der UN-GTR sieht für die Einstellung des Kühlluftstroms eine Klassifizierung in vier Gruppen vor, die anhand des Verhältnisses der nominalen Radlast zur Masse der Brems Scheibe oder -trommel definiert ist. Die Klassifizierung sieht Korridore für Zieltemperaturen für den Start- und Endzeitpunkt sowie eine durchschnittliche Temperatur für eine Auswahl an Verzögerungen vor, die eingehalten werden müssen. Da die Reibungsbremse bei Bremsanlagen mit Energierückgewinnung seltener und weniger stark aktuiert wird, unterliegt die Bremsanlage thermisch tendenziell kühleren Bedingungen als eine konventionelle Reibungsbremsanlage. Bei der Einstellung des Kühlluftstroms dürfen für regenerative Bremssysteme keine Anpassungen vorgenommen werden, die den Beddingprozess beeinflussen und eine Unterschätzung des Emissionsniveaus im Hauptemissionstest zur Folge haben. Daher sollten hier zunächst ebenfalls keine Anpassungen vorgenommen werden. Zum Vergleich sieht der aktuelle Entwurf der UN-GTR für die Messprozedur von HA-Bremsen die gleichen Einstellungen vor, die für VA-Bremsen gelten, was durch eine Aufwandsminderung und homogene Prüfbedingungen begründet wird und hier ebenfalls gilt.

Bedding

Die aktuell definierte Einlaufprozedur von fünf Wiederholungen des WLTP-Bremsenzyklus sollte für regenerative Bremssysteme zunächst ohne Anpassungen und Berücksichtigung der Rekuperationsleistung beibehalten werden. Dies ist vorrangig damit zu begründen, dass die unterschiedliche Rekuperationsleistungen oder -profile bei gleicher Distanz des Einlaufprozesses zu heterogenen Einlaufzuständen und damit starken Schwankungen im Hauptemissionstest führt. Um einen robusten Einlaufprozess inkl. der Berücksichtigung der Rekuperationsleistung zu gewährleisten, müsste dieser entsprechend der Rekuperationsleistung eine längere Distanz überwinden, was einen zeitlichen Mehraufwand fordert.

4.2.3 Überführung der Methode auf Messungen im realen Fahrbetrieb

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Methode auf Messungen im realen Fahrbetrieb und der daraus resultierenden Emissionen gibt es sowohl positive als auch negative Punkte, die berücksichtigt werden müssen, vgl. hierzu die Literatur unter (Augsburg et al., 2018; Hesse & Augsburg, 2019; Hesse et al., 2019; Huber et al., 2022; Ricciardi et al., 2020).

Pro

Zunächst stellt der Bremsenzyklus WLTP Brake Cycle einen realitätsnahen Testzyklus dar, da sein Geschwindigkeitsprofil auf einer real ermittelten Datenbasis beruht und entsprechend seiner Auslegung auch unter realen Bedingungen nachgebildet werden kann. Somit sind die

Emissionen der Bremsen nach der Methode bezüglich des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofils auf Messungen im realen Fahrbetrieb übertragbar (Grigoratos, 2023).

Zusätzlich wird die Kühlluftstromgeschwindigkeit in der Methode auf Grundlage realer Fahrzeugprofile angepasst, wodurch die Testbedingungen diesbezüglich ebenfalls eine Übertragbarkeit erlauben.

Die Methode berücksichtigt weiterhin die Messung und Analyse sowohl von primären als auch sekundären Bremsenemissionen unter streng kontrollierten Laborbedingungen. Dies trägt zur hohen Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei, was von großer Bedeutung ist, um in Bezug auf den realen Fahrbetrieb repräsentative Messwerte zu erhalten. Durch die Nutzung externer Gehäuse, welche die Reibungsbremse im realen Fahrbetrieb von Stör- und Umwelteinflüssen (z.B. Reifenabrieb, Aufwirbelung, Resuspension, Feuchtigkeit) größtmöglich entkoppelt, können Emissionen unter vergleichbaren Bedingungen gemessen werden. Dies erfordert jedoch zusätzlichen Aufwand im Vorfeld der Messungen im realen Fahrbetrieb aufgrund der veränderten Prüfumgebung.

Diese Methode ist insbesondere für klassische Antriebskonzepte (ICE) geeignet. Für die Bewertung der Emissionen von regenerativem Bremsen in Elektrofahrzeugen ist sie ebenfalls geeignet, jedoch ergeben sich für eine Übertragbarkeit auf den realen Fahrbetrieb deutliche Unterschiede. Während die Emissionen dieser Fahrzeuge im Rahmen der Methode ohne Rekuperation gemessen und mittels eines Korrekturfaktors, welcher entsprechend der Rekuperationsleistung des Fahrzeugs als Tabellenwert in der Methode aufgeführt ist, korrigiert werden, so können sich durch die tatsächliche Rekuperationsleistung im realen Fahrbetrieb Abweichungen in den Messergebnissen ergeben.

Contra

Die Methode zur Emissionsmessung von Bremsen weist hinsichtlich der Übertragbarkeit auf reale Fahrumgebungen jedoch einige Einschränkungen auf, welche berücksichtigt werden müssen.

Zunächst berücksichtigt die Methode keine Einflüsse oder Variationen von Umweltbedingungen wie Nässe, Schnee /Eis oder Umgebungstemperaturen während der Emissionsmessung. Diese Faktoren können in der Realität einen erheblichen Einfluss auf die Emissionen haben, da sie das Bremsverhalten und den Verschleiß der Bremsbeläge u.a. durch Korrosionsvorgänge stark beeinflussen können. Die mangelnde Berücksichtigung dieser Umweltbedingungen könnte zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Emissionen führen.

Weiterhin berücksichtigt der Prüfstandszyklus der Methode keine hohen oder extremen Verzögerungen, die in der Realität durchaus auftreten können. In der Methode wird vorgeschrieben, dass die Emissionsmessung bei einer ungeplanten Verzögerung über 5 m/s^2 abgebrochen und neu gestartet werden muss. Dies kann zu einer Unterschätzung der Emissionen führen, da solche Verzögerungen in der Realität auftreten können und sich somit Abweichungen zu den Emissionsmessungen zur Prüfstandsumgebung ergeben können. Ein Ausschlusskriterium anhand eines Beschleunigungsgrenzwertes könnte für die reale Fahrumgebung zudem dazu führen, dass Fahrversuche häufig wiederholt werden müssen oder Emissionsevents nachträglich aus der Messung eliminiert werden müssen, um die Vergleichbarkeit wiederherzustellen. Ein weiterer Aspekt ist die Verdünnung der realen Partikelemissionen durch Umwelteinflüsse, die Transportstrecke bis zum Messgerät sowie durch Ablagerungseffekte. Die tatsächliche Konzentration von Partikelemissionen in der Realität kann somit erheblich von den am Prüfstand gemessenen Werten abweichen. Weiterhin werden Alterungs- oder Korrosionseffekte, welche sich in der realen Fahrumgebung zwangsläufig anders entwickeln und ausprägen, in der Methode nicht untersucht oder berücksichtigt.

Insgesamt erfordert die Anwendung der Methode in der realen Straßennutzung eine umfassendere Berücksichtigung der oben genannten Aspekte, um realistische und repräsentative Ergebnisse zu erzielen und die Umweltauswirkungen der Bremsbeläge angemessen zu bewerten.

4.2.4 Abschätzung des zeitlichen Horizonts bezüglich der Einführung und Umsetzung

Der zeitliche Horizont zur Implementierung dieser Emissionsmessmethode in eine Regulierung erfordert eine sorgfältige Planung und Koordination, insbesondere in Bezug auf die verschiedenen Akteure und Verantwortlichkeiten.

Laut der Automobilindustrie wird vor der Einführung eines Grenzwertes mindestens ein Entwicklungszyklus für Fahrzeuge und Bremsengenerationen zu durchlaufen sein, was bis zu fünf Jahre bei Neuentwicklungen in Anspruch nehmen kann. Während dieser Zeit müssen Fahrzeuge und Bremsbeläge so konzipiert und entwickelt werden, dass sie den neuen Emissionsanforderungen sowie Messmethoden und daraus resultierenden Messtoleranzen gerecht werden. Die Aufgabe, die Emissionen von Fahrzeugbremsen zu überprüfen und zu zertifizieren, erfordert eine klare Aufgabenverteilung. Die Frage, wer wen beauftragt, um diese Zertifizierungen durchzuführen, muss noch geklärt werden. In vielen Fällen können unabhängige Prüforganisationen wie TÜV, DEKRA etc. damit beauftragt werden, die Tests durchzuführen und die Ergebnisse zu validieren. Dabei ist die Haftungsfrage ein weiterer wesentlicher Punkt, der abschließend geklärt werden muss. Wenn beispielsweise die Emissionen einer Bremsenpaarung für ein Fahrzeug in einem Prüflabor zertifiziert werden, liegt die Haftung für etwaige Abweichungen oder Probleme dennoch beim ursprünglichen Fahrzeughersteller (OEM). Dies unterstreicht die Bedeutung genauer Prüfungen und Qualitätskontrollen, um wiederum mögliche Haftungsansprüche des OEMs gegenüber dem Prüflabor zu minimieren, sollte die mögliche Abweichung aus der Durchführung des Tests und nicht aus unmittelbaren Effekten der Bremsenpaarung resultieren.

Die Einführung dieser neuen Emissionsstandards stellt zudem den Zubehör- und Ersatzteile-Markt („Aftermarket“) vor Herausforderungen. Es ist denkbar, dass die Verfügbarkeit von zertifizierten Bremsbelag-Scheiben-Kombinationen zunächst stark eingeschränkt ist, da nur diese den neuen Normen entsprechen. Dies könnte dazu führen, dass die Auswahlmöglichkeiten für Verbraucher stark reduziert werden. Dies wird nochmals durch die zu Beginn vermutlich knappen Prüfkapazitäten verschärft, da die OEMs zunächst die Neufahrzeuge absichern müssen, bevor zukünftige Ersatzteile für den Aftermarket analysiert werden können. Hierbei kann wiederum eine zeitlich verzögerte Einführung des Grenzwertes für Aftermarket-Produkte eine Option sein, da die Produktion und Zertifizierung von Bremsbelägen Zeit in Anspruch nehmen wird. Dies kann allerdings dazu führen, dass Verbraucher auf die Verfügbarkeit von zertifizierten Produkten warten müssen.

Insgesamt erfordert die Implementierung dieser neuen Emissionsstandards eine enge Zusammenarbeit und Koordination zwischen der Automobilindustrie, den Tier1 und Tier2-Lieferanten für das Bremssystem, unabhängigen Prüfinstitutionen wie TÜV, DEKRA etc. und dem Aftermarket-Sektor. Dies ist entscheidend, um sicherzustellen, dass die neuen Normen erfolgreich umgesetzt werden.

4.2.5 Eignung der Methode zur gezielten Reduzierung von Partikelanzahl, Partikelmasse und einzelner Schadstoffklassen

Die vorgestellte Methode bietet infolge der Quantifizierungs- und Vergleichsmöglichkeiten eine Grundlage zur Beurteilung der Möglichkeiten zur Minderung von Bremsenemissionen (Storch et al., 2023). Ein entscheidender Aspekt ist jedoch, dass diese Methode keine explizite Analyse von Schadstoffklassen vorsieht, da die verwendeten Messgeräte nicht für eine solche Differenzierung

ausgelegt sind. Daher sind notwendigerweise Validierungsmessungen durchzuführen, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Dennoch eröffnet diese Methode Möglichkeiten zur Quantifizierung von Einsparpotenzialen. Dies betrifft insbesondere die Anwendung von regenerativen Bremssystemen mit variabler Steuerung der Rekuperation von batterieelektrischen und Hybridfahrzeugen, die Integration von Fahrerassistenzsystemen und intelligenten Verkehrsregelsystemen sowie die Car-to-Car-Kommunikation. Diese Aspekte sind bislang oft vernachlässigt worden, obwohl sie erhebliches Potenzial bieten, um die Verzögerungen von Fahrzeugen in bestimmten Verkehrssituationen entsprechend der minimalen Emissionen durchzuführen.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Methode keine differenzierte Bestimmung der Partikelzusammensetzung nach Schadstoffklassen (z.B. PAH – polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) oder spezifischen Metallen vorsieht. In der Praxis könnte z.B. eine definierte Anforderung an die Reduzierung bestimmter Schadstoffe (z.B. Kupfer) gestellt werden, insbesondere im Hinblick auf die Auswirkungen der emittierten Stoffe auf Mikroorganismen und auf Säugetiere, einschließlich des Menschen.

Des Weiteren sollten beschichtete Brems Scheiben oder alternative Materialien für Bremsbeläge, sowohl von Scheiben- als auch Trommelbremsen, sorgfältig untersucht werden. Hier stellt sich die Frage, ob die derzeitige Anzahl von fünf Wiederholungen der Beddingprozedur ausreicht oder ob Anpassungen erforderlich sind. Sollten bestimmte Bedingungen, wie beschichtete Scheiben, einen erhöhten Aufwand im Bereich des Bedding erfordern, sollte dies in der Methode berücksichtigt werden.

Allgemein fehlen derzeit Qualitätskriterien für den Zustand einer eingelaufenen Bremse. Eine mögliche Herangehensweise könnte darin bestehen, den Zustand der Bremse als eingelaufen zu bezeichnen, wenn die Wiederholungen 4 und 5 der Beddingprozedur ähnliche Ergebnisse liefern. Dies würde möglicherweise Zeit und Ressourcen sparen, da keine weiteren Wiederholungen erforderlich wären. Hier sollte jedoch sorgfältig geprüft werden, ob diese Methode für alle Arten von Bremsen und Belägen geeignet ist oder ob weitere Anpassungen notwendig sind.

Weiterhin ist nach wie vor fraglich, ob nach einer erfolgreichen öffentlichen Testphase eine einzige Durchführung des Hauptemissionstests (HET) ausreicht, um die gewünschte Qualität der Ergebnisse zu erzielen. Dies kann jedoch erst anhand einer qualifizierten Testkampagne bewertet werden, welche einen Querschnitt der möglichen Prüfkandidaten darstellen, z.B. eine Durchführung einer weiteren ILS.

4.2.6 Quantifizierung der Minderungspotenziale im Rahmen der Methode

Die Minderungspotentiale, welche durch Anwendung der Methode quantifizierbar gemessen werden können, benötigen die Charakterisierung der Emissionsniveaus aus dem aktuellen Entwicklungsstand sowie das Erreichen eines reduzierten Emissionsniveaus, beispielsweise durch die Einführung eines Grenzwertes. Aus diesem Vergleich lassen sich die eingesparten Emissionen im Vergleich zu den festgelegten Vorschriften analysieren. Dies wurde bereits im Rahmen einer Vergleichsstudie (Storch et al., 2023) durchgeführt, wodurch nachgewiesen wurde, dass die Durchführung entsprechender Messkampagnen durchaus die Quantifizierung der Minderungspotentiale unter Anwendung der Methode ermöglicht.

Es ist wichtig zu beachten, dass Minderungspotenziale möglicherweise besser identifiziert und quantifiziert werden können, wenn mehrere Hauptemissionstests (HETs) durchgeführt werden. Dies liegt daran, dass das Emissionsniveau, sei es Partikelanzahl (PN), Partikelmasse (PM) oder beides, tendenziell über den Verlauf mehrerer HETs abnimmt. Der aus mehreren HETs gebildete Mittelwert der Emissionen liegt dabei in der Regel unter dem Niveau des ersten HETs. Wenn

davon ausgegangen wird, dass ein potenzieller Grenzwert anhand eines einzigen HETs ermittelt und validiert wird, so liegt dieser Grenzwert für Bremsenemissionen zu Beginn der Regulierung in einem höheren Bereich. Daher ist es wichtig, die Unterschiede zum aktuellen Stand der Methode zu berücksichtigen und gegebenenfalls mehrere HETs durchzuführen, um repräsentative Grenzwerte für Bremsenemissionen festzulegen sowie die Umweltauswirkungen zu minimieren und ggf. zu quantifizieren.

4.2.7 Zusammenfassung von Schwachstellen und Verbesserungsvorschlägen im Rahmen der UN-GTR

Nachfolgend sind Themen aufgeführt, welche im weiteren Entwicklungsprozess der UN-GTR dringend nachzuverfolgen oder zu verbessern sind. Hierzu zählen vorrangig die Themenfelder des regenerativen Bremsens und der Familienbildung von Bremsanlagen, welche im aktuell vorliegenden Entwurf vorgesehen, jedoch noch nicht ausformuliert sind. Darüber hinaus werden sowohl die Anzahl der Hauptemissionstests als auch in Einzelfällen zu grobmaschige Rahmenbedingungen kritisch diskutiert, welche ein Risiko für Verfahrensfehler darstellen.

Zur Familienbildung von Bremsen hinsichtlich der Integration regenerativer Bremssysteme in den Entwurf der UN-GTR liegt zum Zeitpunkt dieses Berichts keine endgültige Definition vor. Die laufenden Diskussionen fokussieren sich auf die Möglichkeit zur Abbildung eines Worst-Case-Szenarios, wonach die kritischste Bremsenkonfiguration eines Fahrzeuges geprüft und bewertet wird. Weiterhin wäre es ebenfalls möglich, dass eine Bremsenkonfiguration, welche in mehreren Fahrzeugen verbaut wird, für das kritischste Fahrzeug zu prüfen ist.

Kritische Aspekte sind in dem Bereich der Familienbildung zunächst die Definitionen der regenerativen Bremssysteme hinsichtlich ihrer Rekuperationsleistung, also der tatsächlichen Energieumwandlung durch Generator und Energiespeicher, der Berücksichtigung und Kategorisierung des Ladezustands der Energiespeicher (engl.: State of Charge, „SoC“) und möglicher Korrekturfaktoren bezogen auf die Gesamtmasse des Fahrzeugs. Hier müssen für unterschiedliche Elektrifizierungsgrade von Fahrzeugen strikte Randbedingungen definiert werden, um möglicherweise unterschätzende Emissionswerte aufgrund eines zu hoch angesetzten Rekuperationspotenzials zu vermeiden.

Hinsichtlich der Komplexität der Problematik und dem geringen zur Verfügung stehenden zeitlichen Horizont ist davon auszugehen, dass die Familienbildung trotz ihrer Brisanz verhältnismäßig grobmaschig definiert werden wird. Aus Sicht der Autoren ist es daher besonders wichtig, dieses Thema intensiv zu verfolgen, da hier grobe Abweichungen zu realen Fahrzeugkonfigurationen auftreten können und damit die Gefahr einer unterschätzenden Emissionsbewertung besteht.

Die UN-GTR Methode schließt grundsätzlich die Berücksichtigung der Felgen, Reifen und Karosseriebauteile aus, um eine Grundlage für den Vergleich der Emissionen der Bremskomponenten zu schaffen. Die mögliche Ablagerung von Bremspartikeln auf den Felgen oder Verwirbelungen durch Karosserieströmungen werden im Vergleich zur Verbesserung der generellen Messfähigkeit als vernachlässigbar betrachtet.

Im aktuellen Entwurf der UN-GTR ist anstelle von 3 Wiederholungen nur noch ein Hauptemissionstest (UNECE, 2023) vorgesehen. Daraus ergibt sich das Problem, dass eine Validierung des Messergebnisses aus dem ersten HET nicht möglich ist. Zudem ergibt sich eine Unschärfe aus der fehlenden Limitierung der Anzahl der Wiederholungen der CAS (Cooling Adjustment Section), welche vor dem Beddingprozess und dem HET durchlaufen wird. Somit besteht die Möglichkeit, dass durch eine überdurchschnittlich hohe Anzahl an Wiederholungen der CAS der Einlaufprozess künstlich verlängert wird, sodass das Messergebnis des HET niedriger ausfällt. Die Reduzierung der HETs wurde zwar statistisch im bisherigen Rahmen abgesichert, aber die

endgültige Bewertung erfordert die Durchführung eines weiteren Tests im Rahmen einer ILS. Wenn die Bremsenpaarung nach dem Beddingprozess keinen eingelaufenen Zustand erreicht hat, kann dies durch die Durchführung von drei HETs anhand der Emissionswerte festgestellt und berücksichtigt werden. Es bleibt daher fragwürdig, inwieweit ein einziger HET das Emissionsverhalten einer Reibpaarung über deren gesamte Lebensdauer widerspiegelt.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Bremskraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse. Besonders im Fall batterieelektrischer und Hybridfahrzeuge muss dies sorgfältig bewertet werden, da die Bremskraftverteilung durch die Rekuperation dynamisch verändert werden kann. Wenn beispielsweise ein batterieelektrisches und heckangetriebenes Fahrzeug nur durch die Rekuperation an der Hinterachse verzögert, entfällt der Anteil der Reibungsbremse an der Hinterachse, während die notwendige Bremskraft an der Vorderachse aufgrund des hohen Rekuperationspotentials geringer ausfällt als bei einem vergleichbaren Fahrzeug, welches ausschließlich mit einer konventionellen Reibungsbremse ausgerüstet ist. Hier stellt sich die Frage, ob die vorgeschlagenen Änderungen ohne Berücksichtigung dieser Aspekte durchgeführt werden können.

In Bezug auf die Reduzierung der HETs gibt es die Möglichkeit, zur Ausgangssituation zurückzukehren, wenn die öffentliche Testphase die bisherigen Ergebnisse nicht bestätigt. Alternativ besteht die Option, dass Hersteller mehrere HETs durchführen können, ohne dass dies in der Methode vorgeschrieben ist. Dies würde Herstellern, die beim ersten HET möglicherweise Probleme haben (z. B. durch nicht eingelaufene Reibpaarungen oder überhöhte Temperaturen), die Möglichkeit bieten, weitere Tests durchzuführen, ohne umfangreiche Anpassungen vornehmen oder den Versuch neustarten zu müssen. Zeitliche Einschränkungen sind dann ein Problem des Herstellers oder des Labors, aber keine allgemein vorgeschriebene Verlängerung sämtlicher Prüfprozeduren. Das Potential zur falschen Bewertung des Emissionsniveaus einer Bremsenpaarung wird dabei als gering angesehen, da alle HET-Ergebnisse protokolliert und gemeldet werden müssen.

Schlussendlich führen mehrere der angesprochenen Themen dazu, dass eine zweite ILS zwingend notwendig ist, da die erste ILS nicht in ausreichender Qualität verlief, da nachträglich Ergebnisse "korrigiert" wurden und die durchgeführte ILS mittlerweile nicht mehr dem aktuellen Stand der GTR entspricht. Eine abschließende Bewertung und Validierung des UN-GTR steht daher noch aus. Es sollte beachtet werden, dass die Methode nach der aktuellen Version der GTR in nur wenigen Laboren umsetzbar ist, da sich Anforderungen an Ausrüstung geändert haben und dementsprechende Umrüstungen durchgeführt werden müssen. Dies sind wichtige Aspekte, die bei der Entscheidung über mögliche Änderungen und Anpassungen im Zusammenhang mit der Emissionsprüfung von Bremsbelägen berücksichtigt werden müssen.

Die Einlaufprozedur ist aktuell erneuter Bestandteil der Diskussionen in der PMP IWG, da argumentiert wird, die aktuelle Einlaufprozedur würde nicht ausreichend stabile Ergebnisse liefern, somit die Bremsenpaarungen keinen eingelaufenen Zustand erreichen.

4.3 Durchführung von Messungen als Beitrag zur Entwicklung oder Validierung einer Methode zur Bestimmung von Reifenabrieb

Der erste Teil der experimentellen Untersuchungen beinhaltet die Teilnahme am Ringversuch der PMP (Interlaboratory Study (ILS) – Taskforce 3 (TF3)) zur Beurteilung der Eignung der entwickelten Methodik im Laborvergleich. Dabei wurden im Herbst 2021 die gleichen Bremsenkonfigurationen in 16 teilnehmenden Laboren gemäß des GRPE PMP Brake Emissions Protocol (UNECE PMP TF2, 2021; Grigoratos, 2022) untersucht.

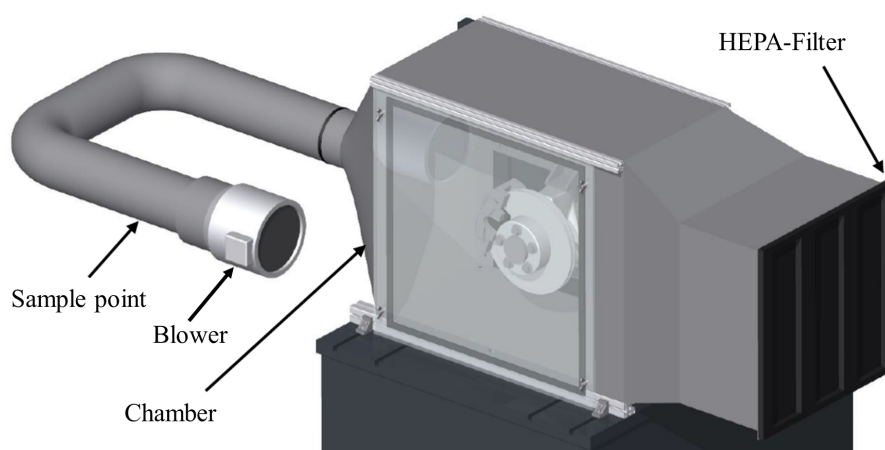
Der zweite Teil der Messkampagne dient dazu, einen Überblick über das Emissionsverhalten von handelsüblichen Radbremsen und Reibpaarungen aufzuzeigen. Die Feinstaubuntersuchungen werden dabei am Beispiel unterschiedlicher Fahrzeugklassen, Bremsenkonzepte (Scheiben- (Faustsattel, Festsattel) und Trommelbremse), Fahrzeugachsen (Vorder- und Hinterachse), sowie alternative Reibmaterialien (hartmetallbeschichtete Brems Scheibe) exemplarisch dargestellt. Alle Untersuchungen wurden auch hier unter Berücksichtigung des GRPE PMP Brake Emissions Protocol durchgeführt (UNECE PMP TF2, 2021; Grigoratos, 2022). Vergleiche hierzu auch die Übersicht in (Giechaskiel et al., 2024).

4.3.1 Prüfumgebung und Messtechnik

Alle Bremsen wurden an einem Schwungmassenbremsenprüfstand (Hersteller und Typ: Link 3900 NVH) mit einer Klimakammer getestet. Am Prüfstand können Drehzahl und Bremsdruck für die gewünschte Prüfung dynamisch geregelt werden. Der Prüfstand verfügt über drei kombinierbare mechanische Schwungmassen ($47,46 \text{ kgm}^2$, 75 kgm^2 , 75 kgm^2) und zusätzlich über eine elektrische Schwungmassensimulation, um beliebige Fahrzeugträgheitsmomente nachzubilden. Die Klimakammer kann in einem Temperaturbereich von -20°C bis 50°C und die relative Luftfeuchte im Bereich von 15 % bis 85 % geregelt werden.

Für die Messung und Klassifizierung von Bremsenemissionen wird der Prüfstand mit einem Konstantvolumenprobenahmesystem (CVS) ausgerüstet. (vgl. Abbildung 24)

Abbildung 24: Konstantvolumenprobenahmesystem



Quelle: Storch et al., 2023

Die Probenentnahme aus dem Verdünnungstunnel erfolgte mit isokinetischen Sonden (Paul Gothe GmbH) nach EN 13284-1 und ISO 9096. Der Luftstrom wurde stromabwärts der Probenahmestelle mit einem Differenzdrucktransmitter (KIMO) bestimmt. Es wurden 90° gebogene Sonden verwendet, bei denen der Probenahmestutzen senkrecht zur Strömung

installiert ist. Die PN- und PM-Proben wurden parallel entnommen, wobei die Sonden in der gleichen Ebene in einem Abstand von 1 cm von der Kanalmitte angebracht wurden.

Für PN-Proben wurde ein TSI 3708 4-Wege-Strömungsteiler verwendet, um die gesammelte Probe an zwei angeschlossene Partikelzähler weiterzuleiten. Die Düsendurchmesser der Sonden wurden so gewählt, dass die Probenahme bei den jeweiligen Strömungszuständen isokinetische Verhältnisse von $1 \pm 0,1$ erreicht.

4.3.1.1 Messsysteme PMP ILS TF3 an der TU Ilmenau

Im Rahmen einer mit dem Ziel bestmöglicher Vergleichbarkeit vereinbarten Kooperation wurden an der TU Ilmenau für die PMP ILS Untersuchungen Messgeräte der Firma AVL verwendet, die dem neusten Stand der Technik entsprechen.

Zur Messung der Partikelanzahl wurden zwei baugleiche AVL APCs zur Verfügung gestellt. Die APCs bestehen aus einem rotierenden Scheibenverdünner als erste Verdünnungsstufe (PND1), gefolgt von einem einfachen Mischverdünner als zweite Stufe. Der PND1 bietet eine dynamische Verdünnung, die Verhältnisse von 10:1 bis zu 1000:1 erreichen kann. In der Standardkonfiguration, die für SPN-Messungen verwendet wurde, wird der PND1 auf 150 °C aufgeheizt und die verdünnte Probe („Diluter“) über eine 2 m lange beheizte Leitung bei 150 °C zu einem „Volatile Particle Remover“-Block (VPR-Block) transportiert. Der VPR-Block umfasst ein Verdampfungsrohr, gefolgt von einem katalytischen AVL-Stripper, die beide bei einer Wandtemperatur von 350°C arbeiten. Die Sekundärverdünnung (10:1 bis 20:1) erfolgt unmittelbar hinter dem VPR-Block mit auf Umgebungstemperatur konditionierte Luft. Diese zweite Verdünnungsstufe dient auch als Sammelstufe für die thermisch behandelte Probe, so dass sie mit einer Temperatur unterhalb der Sättigungstemperatur von 38 °C in den CPC gelangen kann. Die APCs überwachen die Bedingungen an der Probenahmestelle (PND1), um die Verdünnung unabhängig vom Eingangsdruck konstant zu halten. Die notwendigen Korrekturen der angezeigten Konzentrationen auf Standardbedingungen werden automatisch vorgenommen und in den Konzentrationen berücksichtigt. An jedem Einlass der beiden APCs wurde ein URG-2000-30EBD-Zyklon installiert, der bei einem Volumenstrom von 5 l/min eine Trenngrenze von 4,3 µm aufweist.

Ein APC wurde modifiziert, um TPN-Messungen zu ermöglichen. Insbesondere wurden alle Scheibenheizungen außer der PND1 deaktiviert. Die rotierende Scheibe des PND1 erwärmt sich durch Reibung, wobei die entstehende Temperatur von der Rotationsfrequenz und bis zu einem gewissen Grad von den Umgebungsbedingungen abhängt. Um sicherzustellen, dass alle Tests unter den gleichen Bedingungen durchgeführt werden (die auch für die Kalibrierung des Geräts festgelegt wurden), wurde die Heizung des Drehteller-Diluters aktiviert und auf 60 °C geregelt, was etwa 5 °C über der maximalen Selbsterhitzungstemperatur des Drehtellers liegt. Das modifizierte APC enthielt auch einen VPR-Block ohne katalytischen Stripper.

Bei allen Messungen wurde für beide APCs der gleiche Partikelkonzentrations-Reduktionsfaktor von 100 verwendet. Die spezifische Verdünnung reichte aus, um die Anzahlkonzentrationen weit innerhalb des nominellen, zertifizierten Konzentrationslinearitätsbereichs der AVL CPCs (30.000 #/cm³) zu halten.

Für die Bestimmung der Partikelmasse wurden zwei AVL-PM-Sampler verwendet, von denen ein Gerät eine PM10 Probe sammelte, während das andere für PM2,5 eingesetzt wurde. Während der PM-Messungen wurde der Volumenstrom mit einem Massendurchflussregler konstant gehalten, der den Probendruck und die Temperatur berücksichtigt. Beide PM-Sampler wurden mit einem Volumenstrom von 8 l/min betrieben, was eine Trenngrenze von 2,5 µm bzw. 10 µm

für die Zyklone URG-2000-30EBD und URG-2000-30EC ergab, die vor den beiden PM-Samplern installiert waren.

Zum Auffangen der Partikel wurden teflonbeschichtete Glasfaserfilter (Pall EMFAB TX40) verwendet. Das Wiegen der Filter erfolgte mit jeweils fünffacher Wiederholung vor und nach der Beladung mit Feinstaubpartikeln mithilfe einer Analysewaage XSR225DU der Firma Mettler Toledo. Die Auflösung dieser Waage beträgt 10 µg. Sowohl die Lagerung als auch die Wägung der Filter fanden in einem klimatisch konditionierten Laborraum statt.

4.3.1.2 Messsysteme Marktvergleich

Die PM-Probe wird durch den Einlass des Planfiltergeräts (ISO 23210 und VDI 2066 Blatt 7) in einen 3-stufigen Kaskadenimpaktor (Paul Gothe GmbH) gesaugt und das Aerosol in die Partikelgrößenklassen $> 10 \mu\text{m}$, $10 - 2,5 \mu\text{m}$ (grobe PM) und $< 2,5 \mu\text{m}$ (feine PM) fraktioniert. Der Impaktor wurde für PM₁₀/PM_{2,5} In-Stack-Messungen konzipiert und kalibriert. Aufgrund eines relativ hohen Volumenstroms von $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$ (abhängig von den Gasbedingungen), der den nominalen 50 % Cutoff-Größen bei 10 und $2,5 \mu\text{m}$ entspricht, werden die Probenahmezeiten kurz gehalten (für Staubkonzentrationen von $20 \text{ mg}/\text{m}^3/\text{h}$) (Storch et al., 2023). Die Probe wird pro Größenfraktion auf Glasfaserfiltern (Munktell MG 160) abgeschieden. Die Nachweisgrenze der Filterbeladung liegt nach VDI 2066 bei 0,3 mg für PM_{2,5} und 0,4 mg für PM₁₀. Um sicherzustellen, dass sich die Partikelablagerung und die isokinetischen Probenahmebedingungen im Verlauf eines Prüfzyklus nicht verändern, müssen die Umgebungsbedingungen (Temperatur und Druck) kontinuierlich überwacht werden. Zu diesem Zweck wird ein automatisches Steuergerät eingesetzt, das den Durchsatz des Impaktor entsprechend den Umgebungsbedingungen regelt. Aus der Wägung der Glasfaserfilter ergeben sich die streckenbezogenen PM-Emissionsfaktoren.

Zur gravimetrischen Bestimmung der Filtermasse wurde die Mikrowaage MYA 5.4Y.F.A PLUS von Radwag Waagen eingesetzt. Das Gewicht der Filtereinsätze wird vor und nach jedem Test bestimmt. Die Genauigkeit beträgt 1 µg mit einer Wiederholbarkeit von 1,6 µg. Die auf den Filtern gesammelte Masse lag zwischen 0,6 und 2,8 mg für PM₁₀ und 0,3 bis 1,3 mg für PM_{2,5}, was innerhalb der vom Hersteller vorgegebenen Grenzen liegt. Die Filter wurden vor jeder Messung 24 Stunden lang in einem temperatur- und feuchtigkeitskontrollierten Klimaraum konditioniert. Um Messungenauigkeiten zu minimieren, wurden sie fünf Mal gewogen.

Ein Horiba Mexa SPCS 10nm (D50) CPC (TSI 3772) mit Doppelverdünnungssystem wurde zur Messung der PN-Emissionen in Übereinstimmung mit der europäischen Abgasnorm verwendet. Das CPC ist mit einer Probenahmeeinheit, einem Entferner für flüchtige Partikel (Primärverdünner (PND1)/Sekundärverdünner (PND2)/katalytischer Stripper (CS)) und einem Partikelzähler ausgestattet. Zunächst wird die Probe aus dem Verdünnungstunnel entnommen und grobe Partikel werden durch einen Vorklassierer (Zyklon) mit einer Trenngrenze von $2,5 \mu\text{m}$ entfernt. Anschließend werden die Proben in einem beheizten Verdünner mit Heißluft bei 191 °C 15-fach verdünnt (PND1) und nachfolgend in einem katalytischen Stripper (CS) bei 350 °C thermisch behandelt. Eine zweite 10:1-Verdünnung mit Luft bei Raumtemperatur kühlt die Probe ab ($\leq 35 \text{ °C}$) und bringt sie auf die für die Zähleinheit geeigneten Konzentrationswerte.

Als zweites PN-Messgerät wird ein optischer Partikelzähler ohne Vorkonditionierung (TSI 3756) eingesetzt, um die Messung abzusichern und einzelne Effekte einordnen zu können. Der Messbereich erstreckt sich bei diesem Gerät von $2,5 \text{ nm} - 3 \mu\text{m}$. Durch das Fehlen der thermischen Vorkonditionierung und der Vorverdünnung des Aerosols können allerdings Ungenauigkeiten bei emissionsintensiven Bremsmanövern entstehen, weshalb dieses Gerät lediglich zur Unterstützung bei der Interpretation der Messergebnisse eingesetzt wird.

Um die ermittelten Emissionsfaktoren auch bzgl. Verschleiß einordnen zu können, wurde der Masseverlust der Reibpartner bestimmt. Dies erfolgte mittels zwei Laborwagen (Auflösung: 0,05 g und 0,01 g) durch mehrfache Wägung der Brems scheiben und –beläge jeweils vor und nach den Versuchen.

4.3.2 Fahrzeuge und Bremssysteme

4.3.2.1 Simulierte Fahrzeuge und Prüflinge PMP ILS TF3 an der TU Ilmenau

Im Zuge des PMP ILS wurden drei vorgeschriebene und eine optionale Bremse an der TU Ilmenau getestet. Für alle teilnehmenden Labore war die Messung der Ford Focus 280 mm Vorderachsbremse sowohl mit ECE- (Br1a) als auch mit NAO-Belägen (Br1b) und die 350 mm Vorderachsbremse des Audi S4 (Br2) verpflichtend. Die optionale Hinterachs-Trommelbremse (220 mm) des Opel Corsa (Br4) wurde von insgesamt fünf Laboren zusätzlich untersucht. Um möglichen Chargeneinflüssen oder Umwelteinflüssen auf dem Vertriebsweg entgegenzuwirken, wurden die Bremsenkomponenten von den an den PMP Aktivitäten beteiligten OEMs direkt zur Verfügung gestellt. Die Anbindung der Bremssysteme erfolgte mittels Radträgeraufbau gemäß der Fahrzeugeinbaulage.

Tabelle 13: Übersicht der untersuchten Bremssysteme - PMP ILS

| Fahrzeug | Ford Focus | | Audi S4 | Opel Corsa |
|-------------------------------------|---------------------------------|------|--------------------------------|-----------------------------|
| Bezeichnung | Br1a | Br1b | Br2 | Br4 |
| Achse | VA | | VA | HA |
| Bremse Bremsattel | Scheibenbremse (Faustsattel) | | Scheibenbremse (Festsattel) | Trommel-bremse (Simplex) |
| Dimension Bremsanlage | Ø280 mm | | Ø350 mm | Ø220 mm |
| r_{dyn} [m] | 0,315 | | 0,321 | 0,314 |
| m_{Fzg} [kg] | 1600 | | 1668 | 1253 |
| Trägheitsmoment [kgm ²] | 49,3 | | 50,8 | 16,1 |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

4.3.2.2 Simulierte Fahrzeuge und Prüflinge Marktvergleich

Die hier verwendeten Bremsen wurden mit dem Ziel ausgewählt einen Überblick über die Emissionen marktüblicher Bremssysteme repräsentativer Fahrzeug(-klassen) zu schaffen (vgl. Tabelle 14: Übersicht der untersuchten Bremssysteme - Marktvergleich).

Vom Kleinwagensegment (VW Polo) über die Kompaktklasse (VW Golf & VW ID3) bis hin zum Oberklasse-SUV (Porsche Macan) sind in der Auswahl entsprechende Vertreter vorhanden. Diese werden miteinander sowohl bezüglich ihres segmenttypischen Emissionsniveaus verglichen als auch untereinander in verschiedenen Zusatzuntersuchungen. So stellt die 312 mm Bremsanlage der VW Golf Vorderachse die Basis für Untersuchungen variierender Bremsbelagzusammensetzungen (ECE, NAO, Hybrid) und darüber hinaus die Betrachtung eines rekuperationsfähigen PHEV dar. Außerdem wird die 272 mm Hinterachsbremsanlage des gleichen Fahrzeugs für einen Vergleich der Emissionsanteile zwischen Vorder- und Hinterachse untersucht. Die im Zuge der Antriebs-Elektrifizierung zurückkehrende Trommelbremse (VW ID3 – 290 mm) erfährt in dieser Gegenüberstellung den Vergleich zwischen unterschiedlichen Bremsenkonzepten (Scheiben- vs. Trommelbremse).

Im Premiumsegment sind darüber hinaus bereits neuartige Ansätze im Bereich des Brems-scheibenmaterials erhältlich. Die Porsche Surface Coated Brake (PSCB) auf Basis der 390 mm Bremsanlage an der Vorderachse des Porsche Macan bietet die Möglichkeit, ein solches Konzept alternativer Reibmaterialien dem aktuellen Standard einer Grauguss-Bremsscheibe gegenüber-zustellen.

Tabelle 14: Übersicht der untersuchten Bremssysteme - Marktvergleich

| Fahrzeug | VW Polo | VW Golf | | VW ID3 | Porsche Macan |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Achse | VA | VA | HA | HA | VA |
| Bremse Bremsattel | Scheiben- bremse (Faustsattel) | Scheiben- bremse (Faustsattel) | Scheiben- bremse (Faustsattel) | Trommel- bremse (Simplex) | Scheiben- bremse (Faustsattel) |
| Dimension Bremsanlage | Ø255 mm | Ø312 mm | Ø272 mm | Ø290 mm | Ø390 mm |
| r_{dyn} [m] | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,335 | 0,36 |
| m_{Fzg} [kg] | 1.319,5 | 1.659,5 | 1.659,5 | 2.040,5 | 2.112,5 |
| Trägheitsmoment [kgm²] | 42,5 | 27,5 | 53,5 | 37,9 | 81,5 |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

4.3.3 Messergebnisse

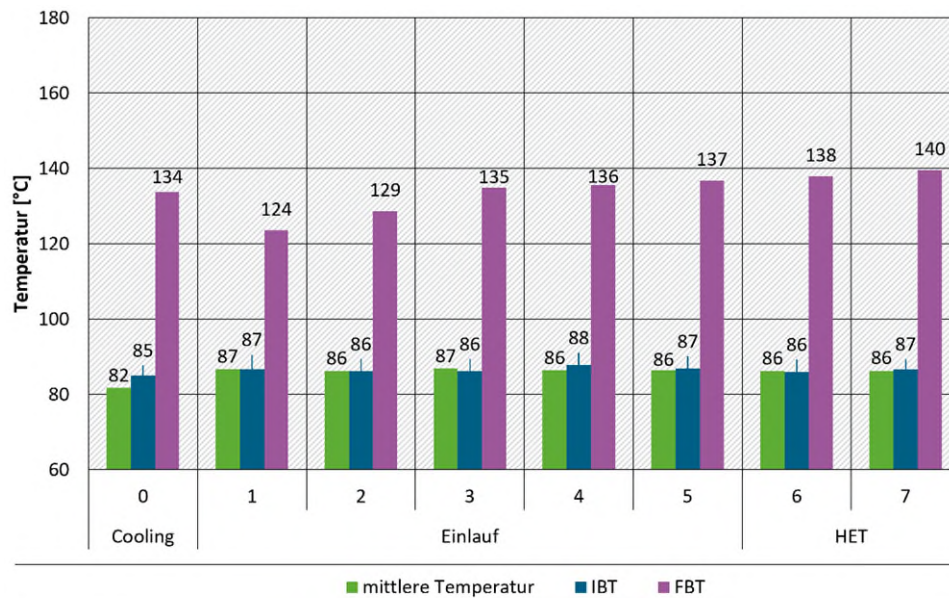
4.3.3.1 Ergebnisse PMP ILS TF3

Die Teilnahme an den Untersuchungen im Zuge der PMP Interlaboratory Study (ILS –TF3) beläuft sich seitens der TU Ilmenau auf die Emissionsmessung von vier Reibpaarungen gemäß der durch die PMP Task Force 2 entwickelten Prozedur. Nach den vorbereitenden Untersuchungen beispielsweise zur Bestimmung der Partikel-Hintergrundkonzentration sieht die Prozedur die Einstellung des für das jeweilige Bremssystem zu verwendenden Kühlvolumenstroms anhand der Sektion 10 des WLTP Brake Cycle vor. Dieser dient gleichzeitig als Evakuierungsströmung für das Feinstaubaerosol und ist demnach für die Messung mittels Teilstromentnahme entscheidend.

Die Aussage des sogenannten Cooling Tests liegt in der Bewertung des thermischen Verhaltens des Bremssystems (Messung mittels Thermoelement im Reibring der Bremsscheibe) anhand von entsprechenden Temperaturkorridoren. Resultieren mittlere Temperatur, IBT¹, oder FBT² außerhalb der vorgegebenen Korridore, so ist der Volumenstrom entsprechend anzupassen und die Sektion 10 wiederholt zu absolvieren. Dieses Vorgehen erfolgt iterativ solange, bis ein zur Einhaltung der Temperaturvorgaben geeigneter Volumenstrom ermittelt wird. Hintergrund ist die Temperaturabhängigkeit des tribologischen Systems Reibungsbremse, woraus gleichermaßen ein Einfluss auf das Emissionsverhalten eines Bremssystems hervorgeht. Ziel ist es, vergleichbare Voraussetzungen für die Feinstaubmessung unterschiedlicher Bremssysteme zu gewährleisten.

Exemplarisch ist in Abbildung 25 die Temperaturentwicklung der NAO-Reibpaarung des Ford Focus (Br1b) dargestellt. Der zu Beginn durchgeführte Cooling Test lieferte mit einem Volumenstrom von 810 m³/h direkt zulässige Referenztemperaturen, wodurch diese Einstellung unmittelbar für die Emissionsuntersuchungen übernommen werden konnte.

Abbildung 25: Temperaturverlauf Ford Focus NAO [Br1b]



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

¹ Initiale Bremsentemperatur – Mittelwert definierter Referenzbremsungen

² Finale Bremsentemperatur – Mittelwert definierter Referenzbremsungen

Durch die vorgeschriebene Verwendung zweier baugleicher Reibpaarungen für jeweils den Cooling Test und die Emissionsmessung wird an dieser Stelle angedeutet, dass das Temperaturverhalten einer zweiten Reibpaarung insbesondere in Bezug auf Temperaturspitzen von der Cooling-Test-Referenz abweichen kann. Grund dafür sind schlichtweg die toleranzbehafteten tribologischen Prozesse und mögliche Chargeneinflüsse der in Kontakt stehenden Reibpartner.

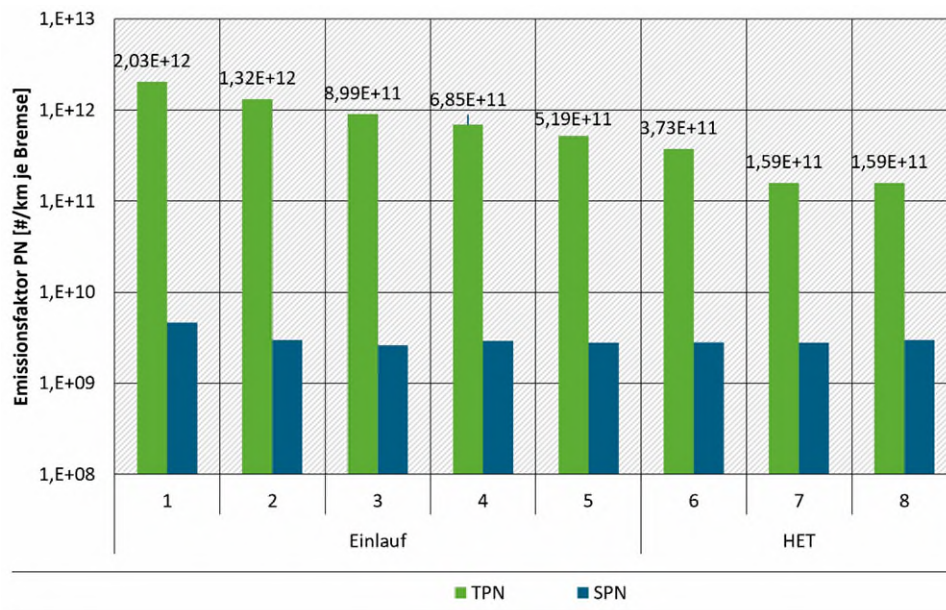
Für die Emissionsuntersuchungen bestand das methodische Vorgehen aus der Durchführung von acht Zyklen des WLTP Brake Cycle. Dabei wurde für alle Durchläufe die Partikelanzahl gemessen, um anhand dessen den Einlaufzustand der Reibpaarung einschätzen zu können. Ziel ist ein möglichst stabiles und reproduzierbares Emissionsniveau nach fünf Zyklen, um den eigentlichen Hauptemissionstest (HET) frei von Einflüssen einer andauernden Konditionierung bewerten zu können. Für die 3 Messungen des HET wurde schließlich auch die Partikelmasse bestimmt. Innerhalb der Versuche an der TU Ilmenau wurde dabei neben den AVL PM-Samplern (Vorabscheidung durch Zyklon) auch ein 3-stufiger Kaskadenimpaktor (Partikel-Größenklassifizierung mittels kalibriertem Strömungszustand) der Firma Paul Gothe verwendet. Dadurch kann eine zusätzliche Einschätzung zur Eignung und Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Messprinzipien gewonnen werden.

Emissionsergebnisse

Beginnend mit den in Abbildung 27 dargestellten Ergebnissen der Ford Focus ECE (Br1a) Feinstaubmessungen, ist für diese Reibpaarung zunächst eine die SPN (solid PN) um etwa Faktor 1.000 übersteigende TPN (total PN) zu verzeichnen. Das Vorkommen temperaturinduzierter volatiler Nanopartikel sinkt zwar im Verlauf der Untersuchungen, führt aber auch während des HET zu 100-fach höheren TPN verglichen mit der SPN.

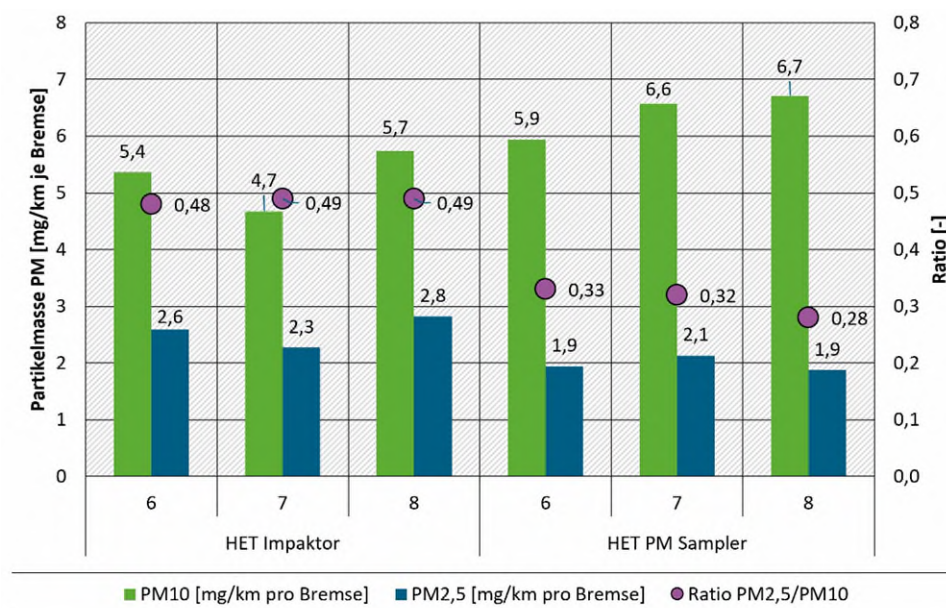
Die Betrachtung der gemessenen Partikelmassen liefert im Gerätevergleich ein grundsätzlich vergleichbares Emissionsniveau. Allerdings liegt die PM₁₀ Gesamtemission gemessen mit dem Impaktor leicht unter der der PM Sampler. Weiterhin ist eine Differenz der Verhältnissfaktoren (PM_{2,5} zu PM₁₀) zwischen den Messprinzipien nachweisbar. Während der Anteil an PM_{2,5} Partikeln beim Impaktor knapp die Hälfte der PM₁₀ Partikelmasse ausmacht, ist es unter Verwendung der PM Sampler mit Zyklonvorabscheidung nur etwa ein Drittel. Diese Erkenntnis liefert einen Hinweis auf prinzipbedingte Vorteile von Zyklonen bezüglich der Effizienz und Trennschärfe bei der Klassifizierung von Feinstäuben.

Abbildung 26: Emissionsergebnisse Partikelanzahl - Ford Focus ECE (Br1a)



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

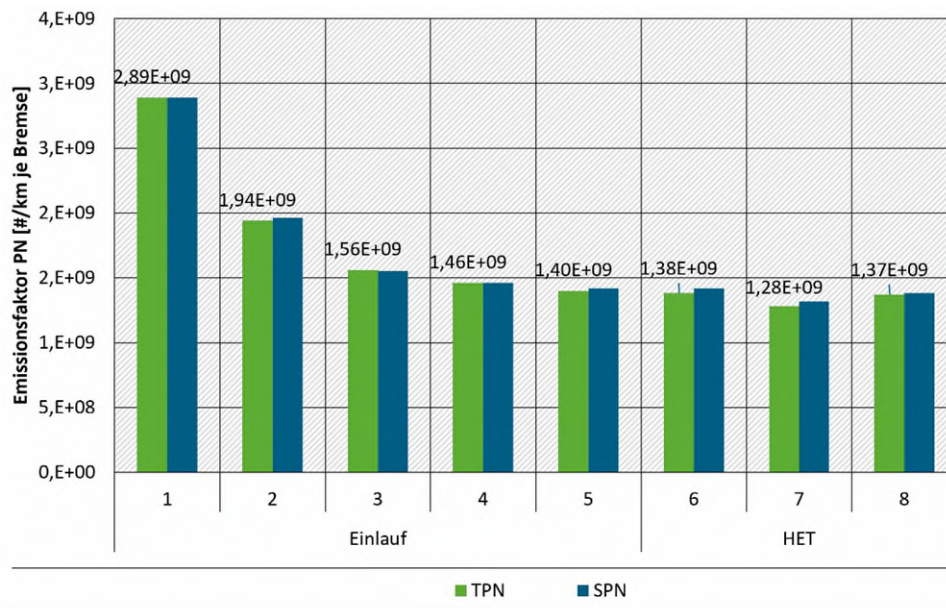
Abbildung 27: Emissionsergebnisse Partikelmasse - Ford Focus ECE (Br1a)



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

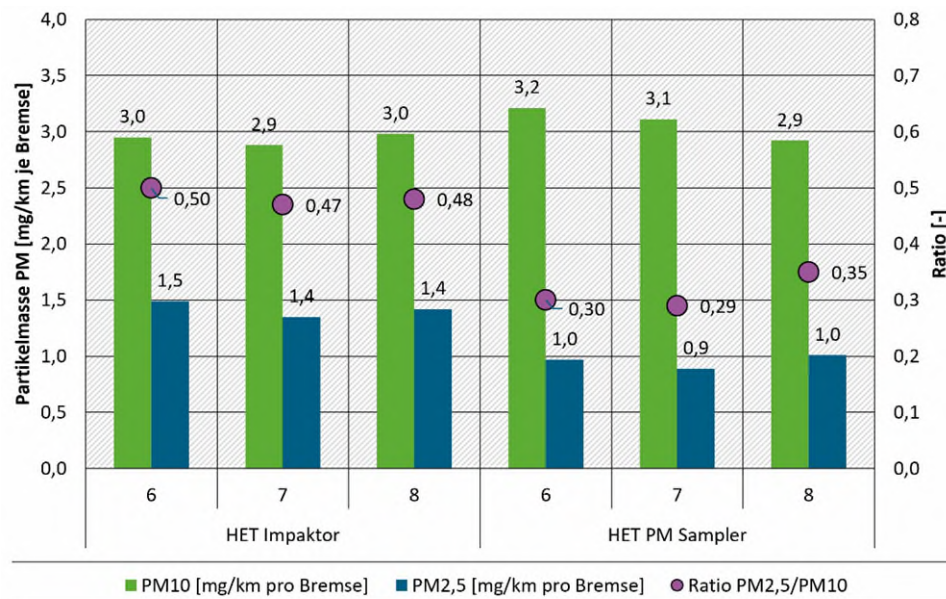
Ein identisches Bild hinsichtlich der PM-Emission zeichnen die Ergebnisse für die Ford Focus NAO (Br1b) Reibpaarung (vgl. Abbildung 28). Auch hier liefert die Impaktormessung minimal geringere PM10 Emissionsfaktoren, wenngleich das Niveau durchaus mit der PM Sampler Messmethode übereinstimmt. Seitens der Verhältnissfaktoren finden sich ebenfalls knapp 50 % PM2,5 Anteil beim Impaktor und gut 30 % unter Verwendung der PM Sampler wieder. Sowohl die emittierte Partikelmasse als auch die Partikelanzahl der NAO-Reibpaarung betragen im direkten Vergleich mit dem ECE-Äquivalent dieser Bremsanlage etwa die Hälfte. Das Emissionsreduktionspotenzial durch den Einsatz von NAO-Bremsbelägen wird dadurch ersichtlich. Erhöhte Anteile volatiler Partikel waren bei dieser Reibpaarung nicht messbar, weshalb die Emissionsfaktoren von TPN und SPN nicht nennenswert voneinander abweichen.

Abbildung 28: Emissionsergebnisse Partikelanzahl – Ford Focus NAO (Br1b)



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Abbildung 29: Emissionsergebnisse Partikelmasse – Ford Focus NAO (Br1b)



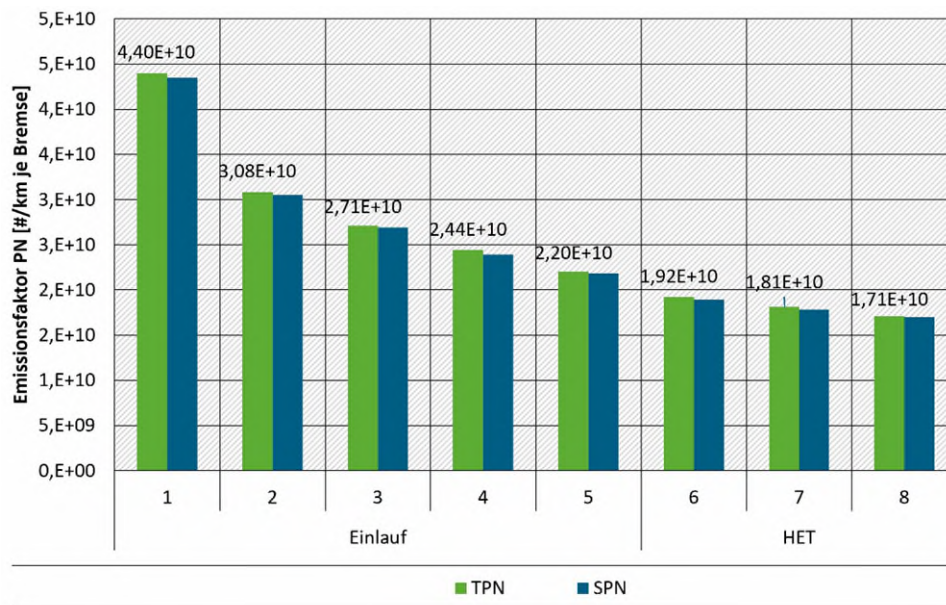
Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die für eine sportliche Fahrweise ausgelgte Bremsanlage des Audi S4 emittiert deutlich mehr Feinstaub als Bremsanlagen für konventionelle Kompakt- bzw. Mittelklasse-Fahrzeuge. Nimmt man die TPN der Ford Focus ECE Reibpaarung aus dem Vergleich heraus, so liegt der Partikelanzahl-Emissionsfaktor der Audi Bremsanlage fast um Faktor 10 über dem des Ford. (vgl. Abbildung 28). Auch bei der Partikelmasse beläuft es sich in etwa auf eine Verdopplung des Emissionsfaktors.

Zyklus Nummer 8 der Impaktormessung fällt sichtlich aus dem Kontext und ist letztlich auf einen Messfehler durch eine undichte Probenahmeleitung zurückzuführen. Die übrigen Messwerte liegen dagegen auch bei dieser Bremsanlage geräteübergreifend auf dem gleichen

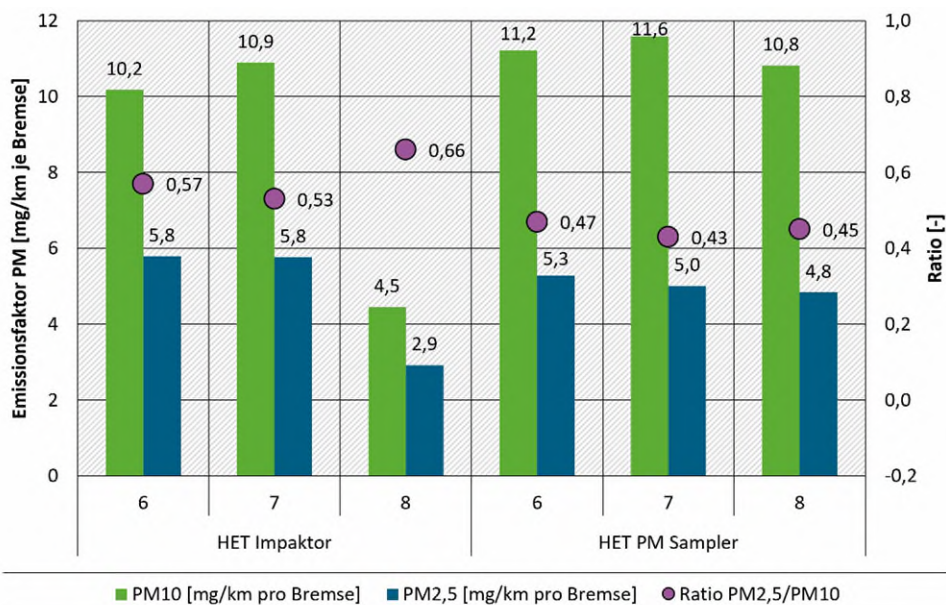
Niveau. Bezüglich der Verhältnissfaktoren fällt der Unterschied zwischen den Messprinzipien bei der Audi S4 Bremse deutlich geringer aus. In Kombination mit dem insgesamt höheren PM_{2,5} Anteil (Impaktor $\approx 0,55$; PM Sampler $\approx 0,45$) und unter Berücksichtigung der deutlich erhöhten PN-Emissionsfaktoren, lässt sich vermuten, dass diese Reibpaarung grundsätzlich feinere Partikel als die zuvor getesteten Ford Focus Bremsen emittiert.

Abbildung 30: Emissionsergebnisse Partikelanzahl – Audi S4 (Br2)



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Abbildung 31: Emissionsergebnisse Partikelmasse – Audi S4 (Br2)



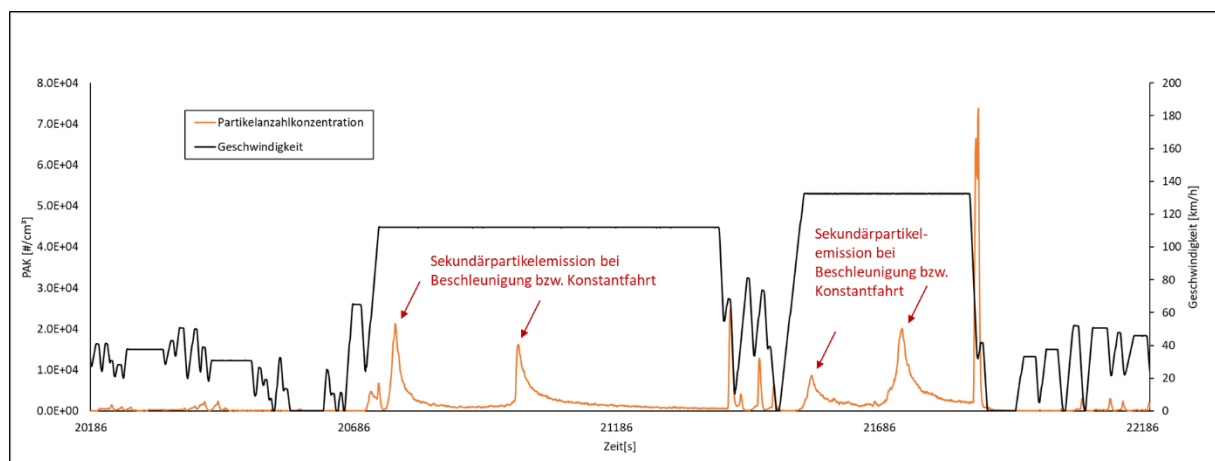
Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Als zusätzlicher Auslöser feiner Partikel ist bei dieser Bremse ein erhöhtes Vorkommen sogenannter Sekundärpartikelemissionen zu verzeichnen. Diese nicht dem eigentlichen Bremsvorgang, sondern hauptsächlich während Beschleunigungen oder durch den Restkontakt zwischen

Bremsbelägen und –scheibe verursachten Feinstaubemissionen sind in Sektion 10 des WLTP Brake Cycle gemäß Abbildung 32 besonders deutlich zu erkennen.

Ein bestimmtes Maß an Sekundäremissionen ist während Beschleunigungsphasen nicht zu vermeiden. Einige durch eine konkrete Bremsung entstehende Partikel werden nicht zwangsläufig auch während dieser emittiert, sondern werden erst bei Beschleunigungen und hohen Brems Scheibendrehzahlen freigesetzt. Insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten äußert sich dagegen der vermeidbare Effekt sogenannter Restbremsmomente auch in Form von Partikelemissionen. Durch ein fehlendes Lüftspiel (minimaler Freiraum zwischen Bremsbelägen und –scheibe) steht die Reibpaarung dauerhaft in leichtem Kontakt, was bei hohen Relativgeschwindigkeiten zu sehr lokalen Temperaturspitzen und zusätzlicher Feinstaubemission führen kann. Der beschriebene Effekt ist bei dieser Bremse während der Konstantfahrten besonders deutlich zu erkennen und kann bei der Auslegung von Bremsanlagen durch die Sicherstellung eines ausreichenden Lüftspiels zukünftig vermieden werden.

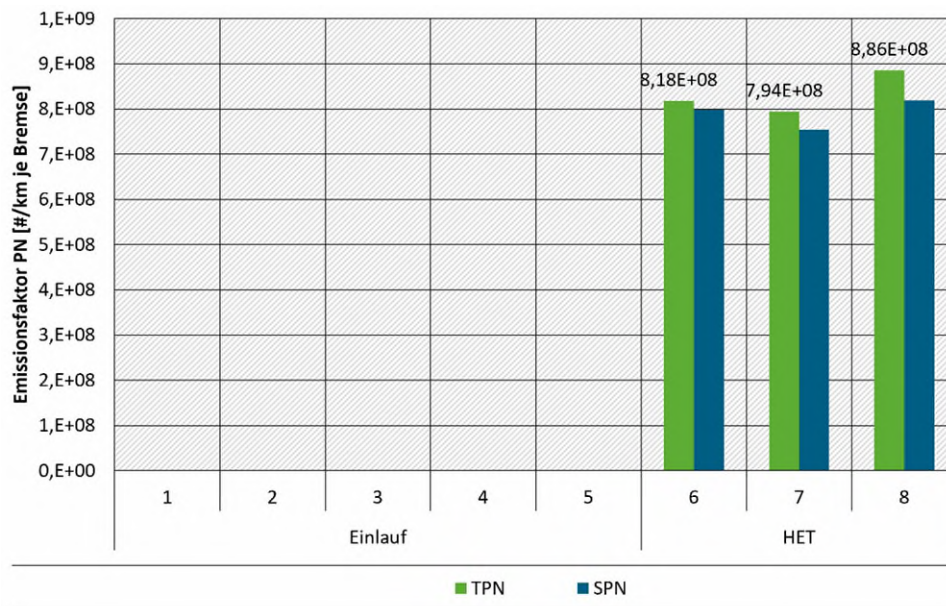
Abbildung 32: Sekundärpartikelemission im WLTP Brake Cycle Sec. 10 Zyklusverlauf – Audi S4 (Br2)



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

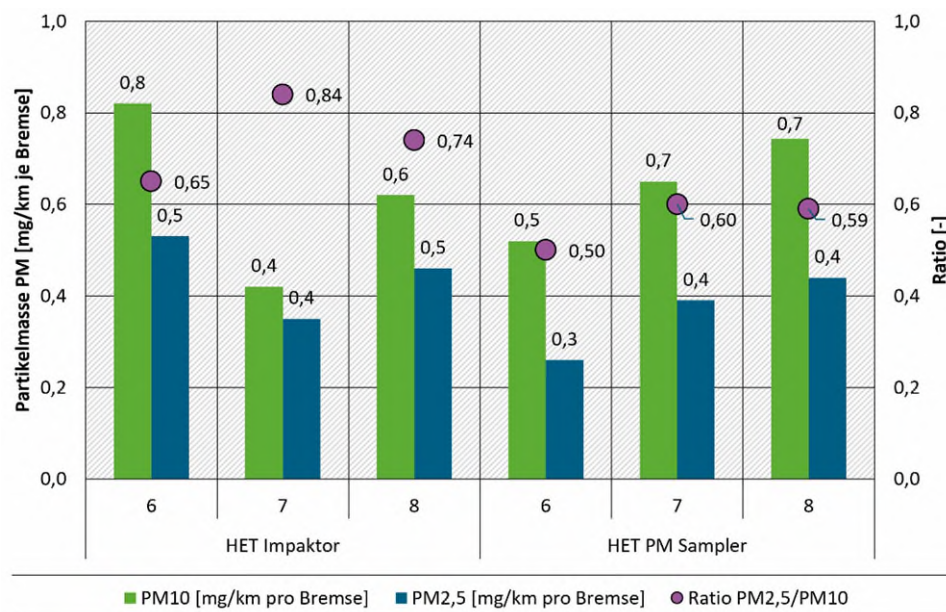
Aufgrund einer Fehlfunktion konnten die Emissionen der Opel Corsa Trommelbremse (Br4) während der 5 Zyklen des Einlaufs nicht aussagekräftig gemessen werden. Der PMP Gruppe wurden dementsprechend für diese Bremse nur die Messdaten der 3 Zyklen des Hauptemissionstests zur Verfügung gestellt (vgl. Abbildung 33). Aus diesem Grund sind auch in Abbildung 14 lediglich die PN-Emissionsfaktoren für die Zyklen 6 bis 8 zu erkennen. Bedingt durch das sehr geringe Hinterachs-Trägheitsmoment ($16,1 \text{ kgm}^2$) dieses Kleinwagens fallen die Emissionsfaktoren verglichen mit den übrigen getesteten Bremsen erwartungsgemäß geringer aus. Für die Bestimmung der Partikelmasse hat die geringere Emission zur Folge, dass eine höhere Schwankung der Messergebnisse entsteht. Grund dafür ist unter anderem die während der ILS-Untersuchungen verwendete Analysenwaage zur Filterwägung mit einer Auflösung von lediglich $10 \text{ }\mu\text{g}$. Um geringe Filterbeladungen hinreichend genau auflösen zu können, wird seitens der Methodikvorgabe eine Waage mit einer Ablesbarkeit von $1 \text{ }\mu\text{g}$ gefordert. Ein solches Gerät stand aber zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Ilmenau noch nicht zur Verfügung.

Abbildung 33: Emissionsergebnisse Partikelanzahl – Opel Corsa (Br4)



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

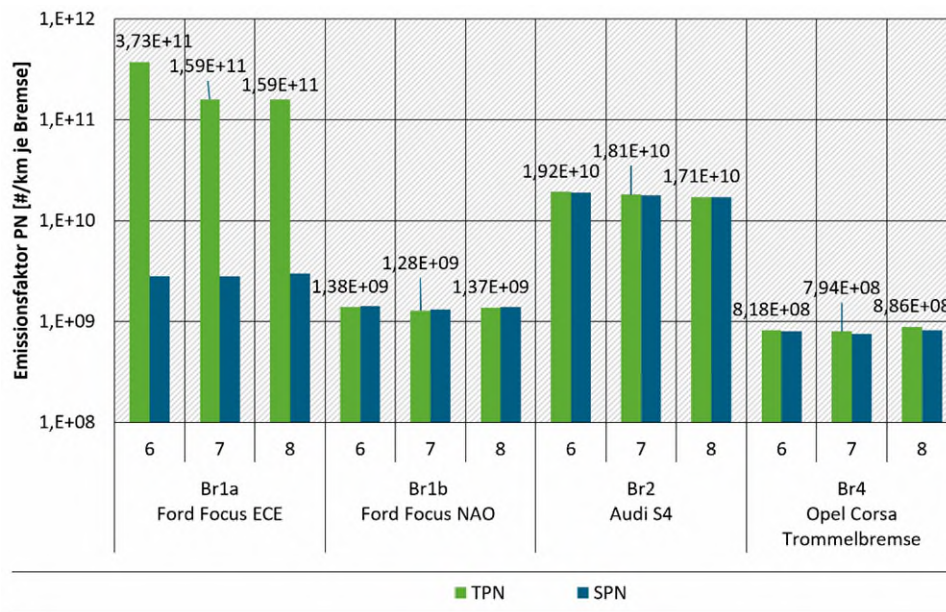
Abbildung 34: Emissionsergebnisse Partikelmasse – Opel Corsa (Br4)



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

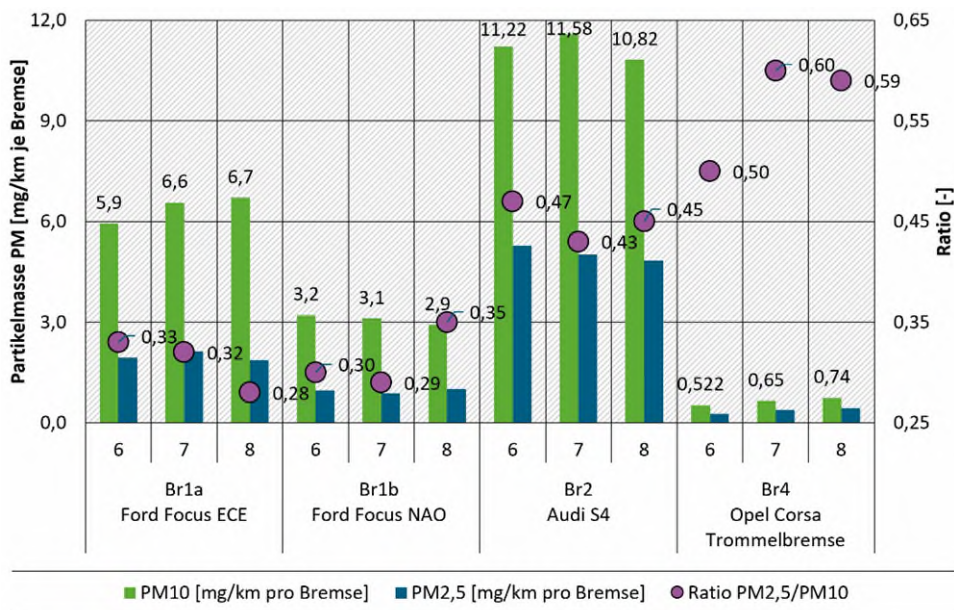
In Abbildung 35 ist die Gegenüberstellung der Emissionsfaktoren der untersuchten Bremsen veranschaulicht. Dadurch wird das grundsätzliche Emissionsniveau der jeweiligen Bremsensysteme herausgestellt und gleichzeitig eine gute (interne) Reproduzierbarkeit der Methode für Messungen im Hauptemissionstest nachgewiesen. Trotzdem wird deutlich, dass die Messung von tribologisch induzierten Feinstäuben stets statistischen Schwankungen unterworfen ist. Aus diesem Grund werden seitens der TU Ilmenau die endgültigen Emissionsfaktoren einer Bremse anhand des Mittelwerts der drei Hauptemissionsmessungen gebildet.

Abbildung 35: Vergleich der Partikelanzahl der Bremsen im Hauptemissionstest



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Abbildung 36: Vergleich der Partikelmasse der Bremsen im Hauptemissionstest



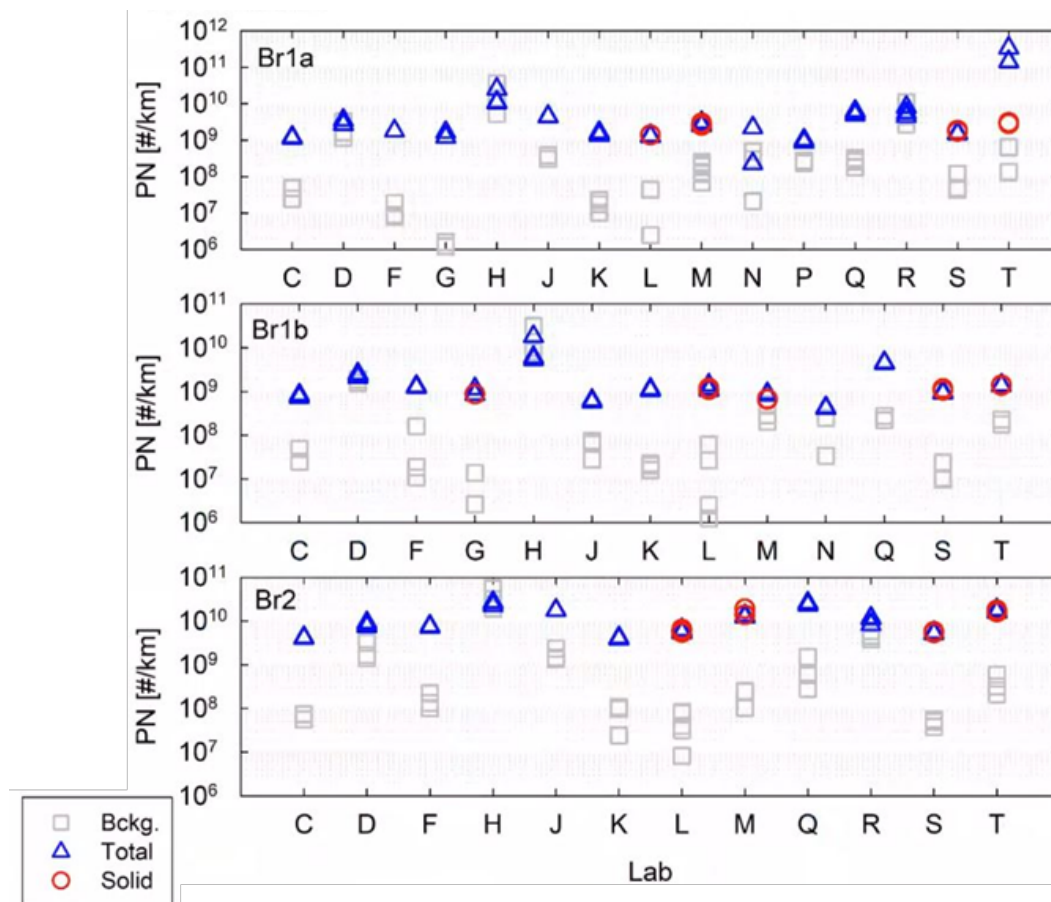
Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die Einordnung der Ergebnisse in den Kontext der ILS erfolgt mittels des von der PMP-Gruppe ausgewerteten und anonymisierten Laborvergleichs. Dieser Vergleich dient gleichzeitig als Grundlage für etwaige Anpassungen und Optimierungen der Methodik. Die bereits vorgestellten Ergebnisse der TU Ilmenau sind im Laborvergleich unter dem Kennbuchstaben „T“ zu finden.

Zunächst sei der Blick auf die laborübergreifenden PN-Emissionsfaktoren der drei von allen Laboren getesteten Bremsen gerichtet. Dieser ist in Abbildung 14 dargestellt und zeigt eine durchaus auffällige Streuung der Emissionsfaktoren. Für einzelne Labore (z.B. D, H und R) liegen die gemessenen Partikelanzahlhintergrundwerte auf dem gleichen Niveau wie der ausgewiesene Emissionsfaktor, wodurch dieser kein zuverlässiges Messergebnis darstellt. Grundsätzlich zeigt sich darüber hinaus, dass die Partikelanzahlhintergrundwerte zwischen den einzelnen Laboren sehr unterschiedlich ausfallen. Der Einfluss auf den PN-Emissionsfaktor erscheint allerdings verhältnismäßig gering. Dennoch sollte das Ziel einer möglichst geringen Hintergrundkonzentration vor allem mit Blick auf zukünftig emissionsärmere Bremskonzepte weiter verfolgt und intensiviert werden. Dafür sind eine effiziente Filterung der Luft und eine bestmögliche Abdichtung des Gesamtsystems anzustreben.

Die signifikant erhöhten TPN-Zusatzemissionen, die für die Ford Focus ECE Reibpaarung (Br1a) an der TU Ilmenau gemessen wurden, sind im Kontext der übrigen Labore darüber hinaus nicht reproduzierbar nachzuweisen. Generell lässt sich abseits dessen bei den einzelnen Laboren kein nennenswerter Unterschied zwischen den TPN- und SPN-Emissionsfaktoren feststellen.

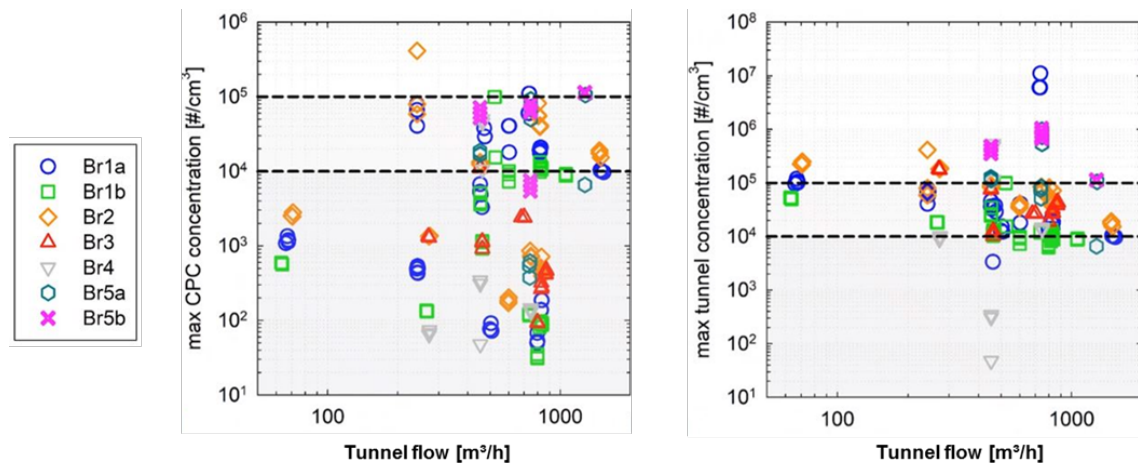
Abbildung 37: PN Emissionsfaktoren der Ford Focus und Audi S4 Bremsen im Laborvergleich



Quelle: Mamakos, 2022

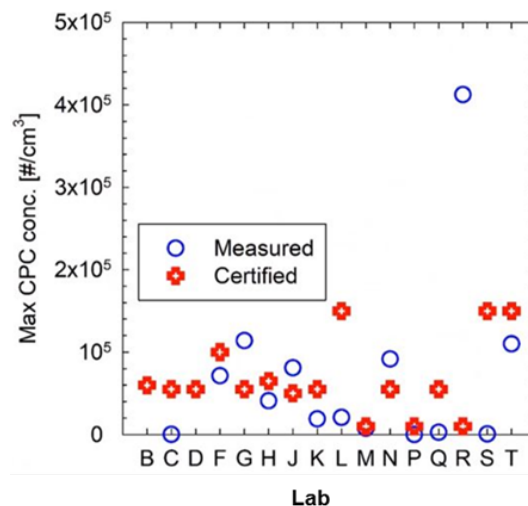
Um der Streuung der PN-Emissionsfaktoren genauer auf den Grund zu gehen, wurden weitere Vergleiche durchgeführt. So zeigt Abbildung 14 die maximalen Partikelanzahlkonzentrationen am CPC bzw. unter Berücksichtigung von Verdünnungsstufen die Maximalkonzentration im Kanal. Letztere liegt mit $3,5 \times 10^3 - 1,1 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ in einem weiten Bereich, der letztlich hinsichtlich des oberen Konzentrationswerts eine Verdünnung der Aerosolprobe zur Reduktion der CPC-Konzentration unbedingt notwendig macht. Andernfalls kommt es, wie in Abbildung 14 für Labor G,J,N und R zu sehen, zu Anzahlkonzentrationen am CPC, für die das Gerät nicht zertifiziert ist.

Abbildung 38: Max. Partikelanzahlkonzentration am CPC bzw. verdünnungskorrigiert im Kanal



Quelle: Mamakos, 2022

Abbildung 39: Maximal gemessene und zertifizierte Partikelanzahlkonzentrationen der verwendeten CPC



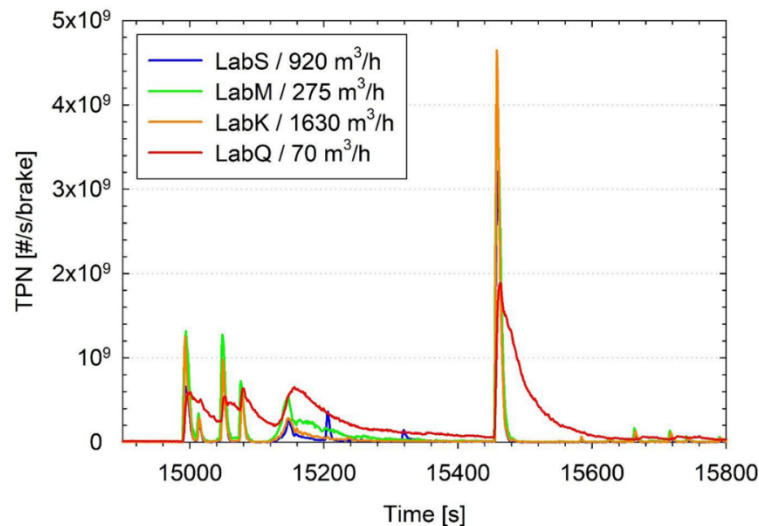
Quelle: Mamakos, 2022

Als weiterer Punkt wurde vereinzelt eine unzureichende Güte der Messung des Kanalvolumenstroms erkannt, die aber vergleichsweise einfach mit einer Anpassung der Sensorik behoben werden kann. Schwieriger gestaltet sich dagegen jegliche Änderung am Grundaufbau des Systems. Damit ist von Form und Volumen der Bremsenumhausung über die Kanalanordnung

bis hin zur Volumenstromerzeugung jede Schnittstelle gemeint, die direkt oder indirekt eine effiziente Evakuierung des Feinstaubaerosols beeinflusst.

Als Beispiel sei der mit $70 \text{ m}^3/\text{h}$ sehr niedrige Volumenstrom von Labor Q erwähnt, der gemäß Abbildung 40 sehr lange Evakuierungsdauern zur Folge hat. Verbleiben Partikel sehr lange im System, erhöht sich automatisch das Potenzial der Beeinflussung durch unerwünschte Wechselwirkungen.

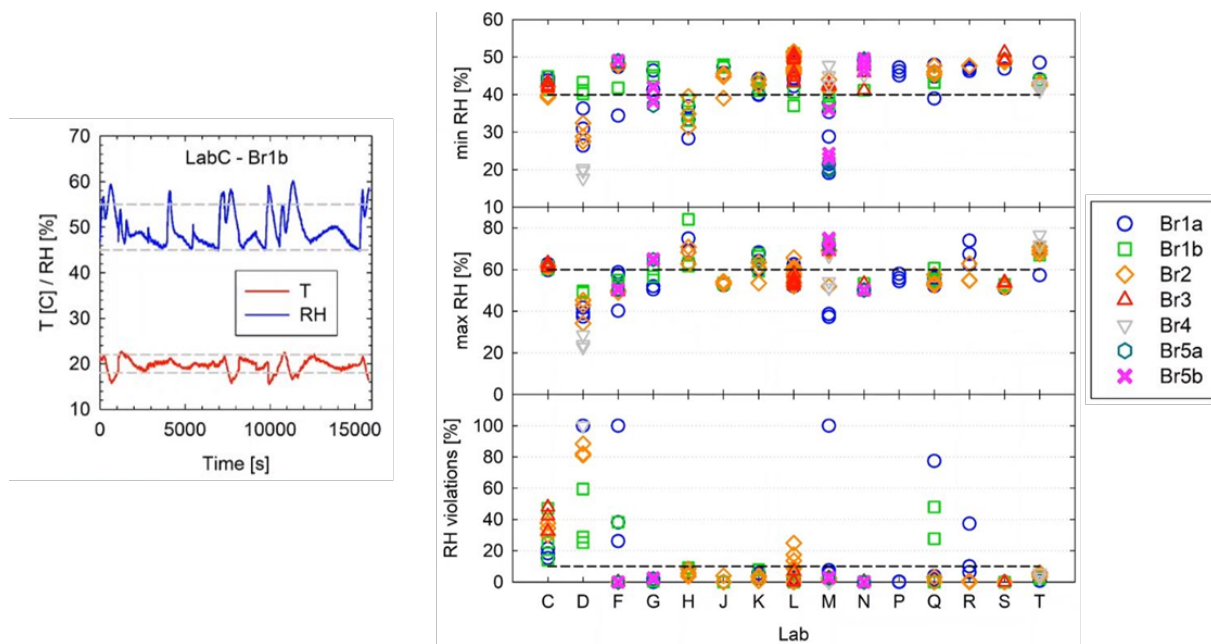
Abbildung 40: Emissionsverlauf in Abhängigkeit vom Evakuierungsvolumenstrom



Quelle: Mamakos, 2022

Ein Einfluss auf die Messung der Partikelanzahl geht unter anderem von Schwankungen der Luftfeuchtigkeit aus. Diese hat sich auch im Rahmen der ILS als schwierig zu kontrollieren erwiesen. Erlaubte Abweichungen um $\pm 5 \%$ des Sollwerts von 50% RH wurden insbesondere in Richtung höherer Luftfeuchten immer wieder überschritten (vgl. Abbildung 41). Grund dafür sind häufig die trägen und in Wechselwirkung stehenden Klimaprozesse in Lüftungsanlagen von Bremsenprüfständen, die nie für die Anforderungen an Emissionsmessungen geplant wurden.

Abbildung 41: Einhaltung der Luftfeuchtigkeit im Laborvergleich

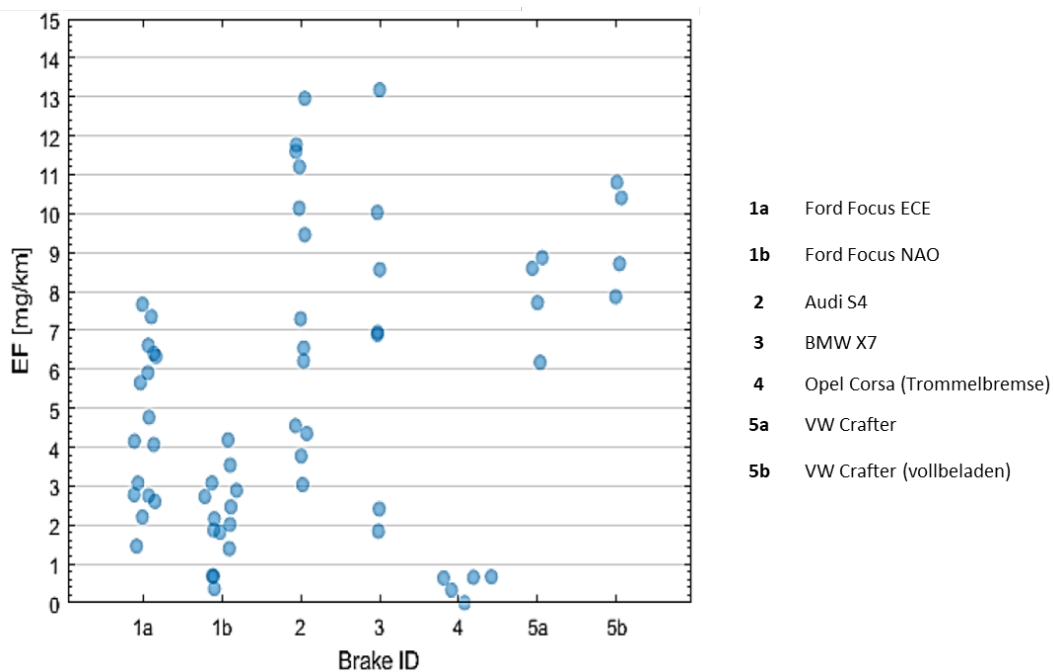


Quelle: Mamakos, 2022

Allgemein kann bei der Auswertung der PM-Emissionsfaktoren eine Korrelation des Emissionsniveaus mit der Größe der Bremse festgestellt werden. Steigen Fahrzeuggewicht und Performance-Anforderungen, so werden Bremsscheiben mit größerem Reibring (Bremsscheibe) und damit auch einer größeren Kontaktfläche verwendet. Diese Tendenz kann Abbildung 42 entnommen werden, wonach sportliche Fahrzeuge (Audi S4) und schwere SUV (BMW X7) bzw. Transporter (VW Crafter) sichtbar höhere Emissionen hervorrufen, als ein Fahrzeug der Kompaktklasse (Ford Focus). Weiterhin ist im selben Diagramm eine Emissionsreduktion durch die Verwendung von NAO-Bremsbelägen ersichtlich.

Neben dem grundsätzlich plausiblen Emissionsverhalten im Vergleich der einzelnen Bremsanlagen offenbart die Streuung der ermittelten Emissionsfaktoren zwischen den Laboren Herausforderungen bei der methodischen Reproduzierbarkeit.

Abbildung 42: Streuung der PM-Emissionsfaktoren über alle Bremsen und Labore

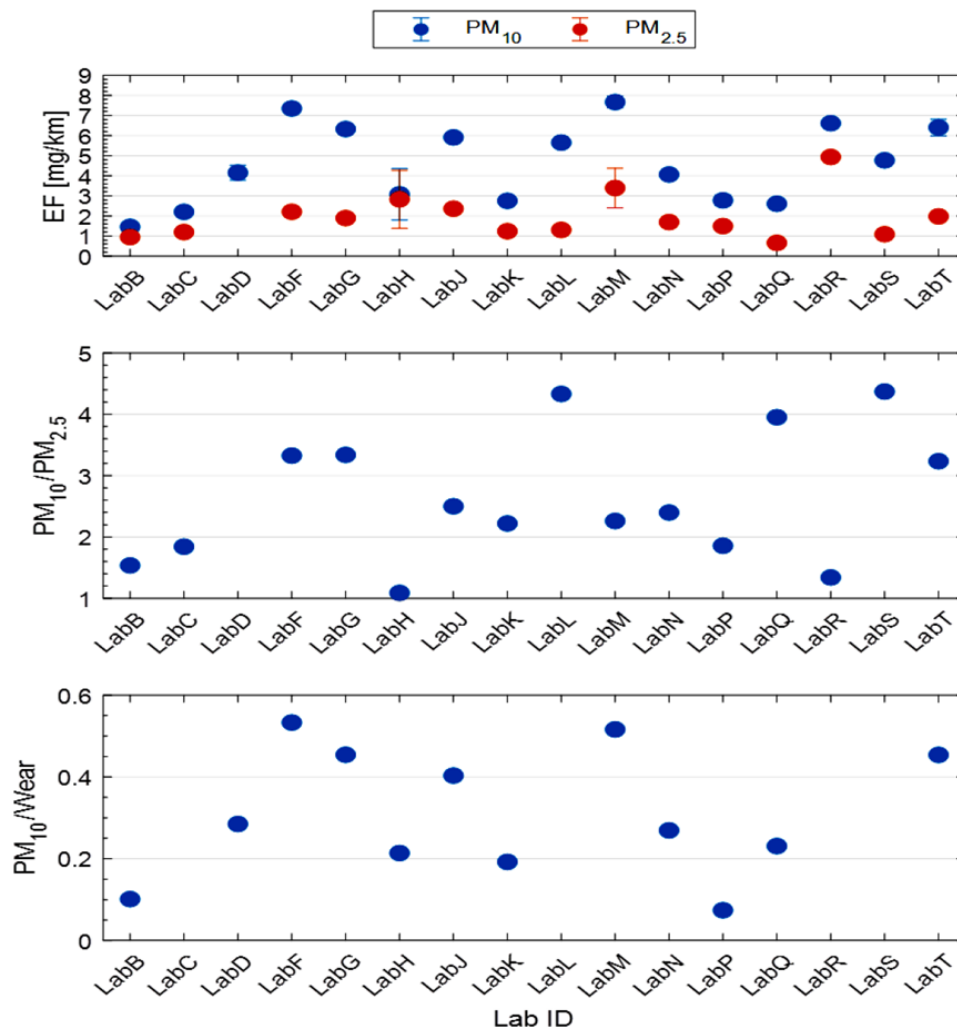


Quelle: Grigoratos & Mamakos, 2022

Um mögliche Schwachstellen innerhalb der Methode oder bei deren Umsetzung ausfindig zu machen, wurden zusätzliche Qualitätskriterien zur Einordnung der Messergebnisse untersucht. Auf Basis grundsätzlich leichter messbarer PM_{2,5} Feinstaubanteile spielen zunächst die Verhältnisfaktoren PM₁₀/PM_{2,5} eine Rolle. Da kleine Partikel weniger von Faktoren wie der Trägheitsabscheidung betroffen sind, lassen sich diese auch laborübergreifend vergleichsweise reproduzierbar messen (vgl. Abbildung 42). Anhand auffälliger Verhältnisfaktoren kann schließlich eine Unterschätzung gemessener PM₁₀ Emissionsfaktoren abgeleitet werden.

Verluste im Bereich der PM₁₀ Klassifikation lassen sich darüber hinaus anhand des Bezugs zum Verschleißfaktor der jeweiligen Bremse ermitteln. Ungewöhnlich niedrige Verhältnisse von PM₁₀ zu Verschleiß deuten ebenfalls auf eine Unterschätzung grober Partikel hin. Abbildung 43 zeigt am Beispiel der Ford Focus ECE Bremse (Br1a) die laborübergreifende Streuung der PM-Emissionsfaktoren und die erläuterten Verhältnisfaktoren zur Einordnung der Ergebnisse.

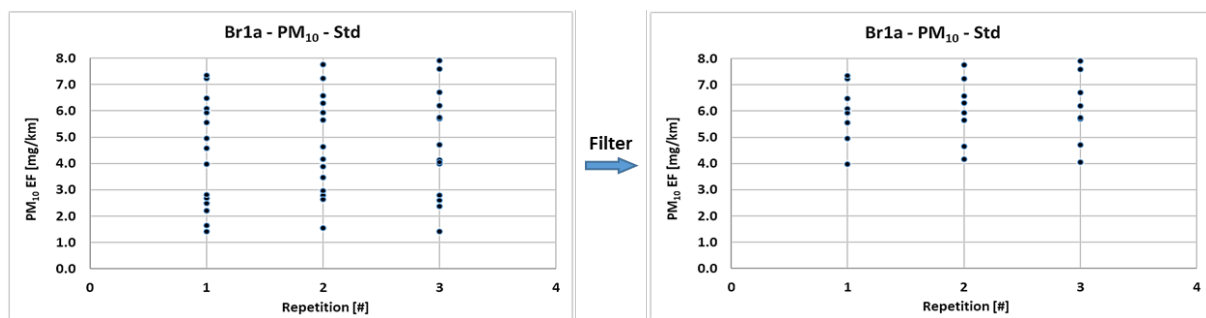
Abbildung 43: PM-Emissionsfaktoren Br1a und zugehörige Verhältnissfaktoren



Quelle: Grigoratos & Mamakos, 2022

Eine Filterung der Daten wurde schließlich anhand der Einhaltung der PM-relevanten Methodik- anforderungen und einer statistischen Analyse vorgenommen. Unter Verwendung des 75 %- Perzentils wurden Laboren mit einem PM_{2,5}/PM₁₀ Verhältnis größer 52.8 % als PM₁₀ unter- schätzend eingeordnet. Gleiches gilt anhand des 25 %-Perzentils für Labore mit einem PM₁₀/Verschleiß Verhältnis kleiner 20,3 %. Das Resultat der Datenfilterung ist in Abbildung 44 am Beispiel der PM₁₀ Emissionen der Ford Focus ECE Bremse (Br1a) veranschaulicht. Die Variabilität der Emissionsfaktoren konnte dadurch von 42,6 % auf 19,5 % gesenkt werden.

Abbildung 44: Ergebnis der Datenfilterung am Beispiel PM₁₀ – Br1a



Quelle: Grigoratos & Giechaskiel, 2022

Eine Einengung der verbleibenden Streuung soll durch striktere Vorgaben verschiedener Anforderungen an Messgeräte, Kanalaufbau und Probenahme erfolgen. Außerdem werden im Zuge der Finalisierung der GTR Labore zur Einhaltung aller relevanten Anforderungen verpflichtet, was die auf stellenweise mangelnder Erfüllung der methodischen Standards basierenden Abweichungen reduziert.

In Summe hat sich die generelle Einhaltung der Vorgaben der Untersuchungsmethodik als verbesserungswürdig erwiesen. Von PM-relevanten Anforderungen wie der Wiegeraum-Spezifikationen oder der Auflösung der Filterwaage, über die für PN bedeutsame Minimierung der Hintergrundkonzentration, bis hin zu grundsätzlichen Anforderungen an den Gesamtaufbau (Umhausung, Kanalanordnung, Anbindung und Position der Bremse, ...) sind bei allen Laboren mehr oder weniger entscheidende Einschränkungen bei der Umsetzung der Methodik zu verzeichnen gewesen. Diese gilt es im Zuge der zukünftig verbindlichen GTR abzustellen.

Um während der Entwicklung der Messprozedur proaktiv möglichen Schwachstellen entgegenzuwirken, wurden insbesondere bestehende Qualitätskriterien überarbeitet und teilweise ergänzt. Die korrekte Umsetzung des Belastungskollektivs (WLTP Brake Cycle) stellt die Grundlage aller Untersuchungen dar und sollte weiterhin entsprechend konsequent überprüft werden. Insbesondere mit Hinblick auf Messungen von Bremsen rekuperationsfähiger Fahrzeuge wird die Regelung der Prüfstände nochmals in den Vordergrund rücken.

Weiterhin werden möglichst konstante und partikelfreie Luftbedingungen der Umgebung benötigt, um auch zukünftig emissionsärmere Bremssysteme zuverlässig untersuchen zu können.

Darüber hinaus sind standardisierte Formen für die Umhausung der Bremsanlage anzustreben. Gleiches gilt für die Anordnung des Evakuierungskanals und der Probenahmeleitung, um Strömungsverluste und Partikelabscheidungen zu vermeiden bzw. in einem untereinander vergleichbaren Rahmen zu halten.

Seitens der Messtechnik sollte für hohe Partikelanzahlkonzentrationen unbedingt eine Aerosol-verdünnung erfolgen, um stets im zertifizierten Bereich der jeweiligen Zählleinheit (CPC) zu arbeiten. Für die Messung der Partikelmasse werden insbesondere die unterschiedlichen Prinzipien eines Kaskadenimpaktors und von Zyklon-vorabscheidenden PM-Samplern diskutiert. Die letztlich präzisere Methode liefert die individuelle Messung von PM_{2,5} bzw. PM₁₀ mittels einzelner, vorgeschalteter Zyklone, da die bei Kaskadenimpaktoren mögliche Kontamination der PM_{2,5} Stufe durch Überschreitung der zulässigen PM₁₀ Massebelastung ausgeschlossen ist.

4.3.3.2 Ergebnisse Marktvergleich

Der Hauptteil der Untersuchungsmethodik gemäß GRPE PMP Brake Emissions Protocol beginnt nach Systemcheck und einer Kontrolle der vorliegenden Partikelhintergrundkonzentration mit der Einstellung des Evakuierungsvolumenstroms anhand der Temperaturentwicklung der Bremsscheibe innerhalb der Sektion 10 des WLTP Brake Cycle (Cooling Test). Gestützt auf Erfahrungswerte wurde bei diesen Versuchen auf eine zweite, exklusiv für den Cooling Test zu verwendende Reibpaarung pro Untersuchung³ verzichtet und stattdessen eine Überprüfung der Temperaturkorridore während des Beddings vorgenommen.

Für die jeweiligen Tests sind die mittlere Temperaturentwicklung in Sektion 10 des WLTP Brake Cycle einzuhalten, Auch die gemittelten initialen (IBT) und finalen Bremstemperaturen (FBT) für definierte Referenzbremsungen in ebenjener Sektion werden gemäß ihrer Klasseneinteilung bezüglich Radlast/ Bremsscheibenmasse (WL/DM) (vgl. Tabelle 15: Randbedingungen und Vorgaben bezüglich der Cooling Tests) festgehalten. Aufgrund der Fokussierung auf innenbelüftete Bremsscheiben für Vorderachsenanwendungen ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die vorgegebenen Temperaturkorridore keine eindeutige Gültigkeit für Hinterachsenanwendungen mit Vollmaterialscheiben bzw. Trommelbremsen besitzen.

Tabelle 15: Randbedingungen und Vorgaben bezüglich der Cooling Tests

| Fahrzeug | VW Polo | VW Golf | | VW ID3 | Porsche Macan |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Achse | VA | VA | HA | HA | VA |
| Bremse Bremssattel | Scheiben- bremse (Faustsattel) | Scheiben- bremse (Faustsattel) | Scheiben- bremse (Faustsattel) | Trommel- bremse (Simplex) | Scheiben- bremse (Festsattel) |
| Dimension Bremsanlage | Ø255 mm | Ø312 mm | Ø 272 mm | Ø 290 mm | Ø 390 mm |
| WL/DM Klasse | 4 | 3 | 3 | 1 | 2 |
| T_{avg} [°C] | >65 | >60 | >60 | >50 | >55 |
| IBT [°C] | 85 ± 15 | 75 ± 15 | 75 ± 15 | 55 ± 15 | 65 ± 15 |
| FBT [°C] | 140 ± 25 | 120 ± 25 | 120 ± 25 | 85 ± 25 | 105 ± 25 |

Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

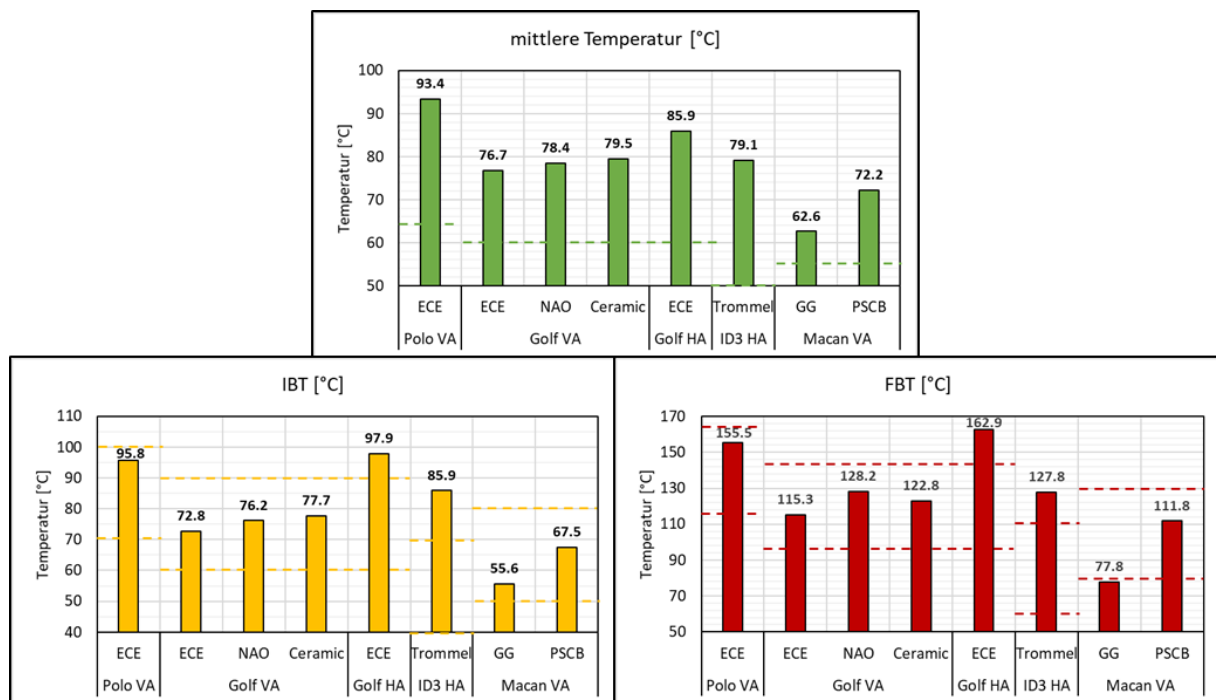
³ zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung sah die Methodik noch eine gesonderte Cooling Test Reibpaarung vor – mittlerweile ist die Durchführung der Untersuchungen mit einer einzigen Reibpaarung vorgesehen

Die eingestellten Volumenströme von $810 \pm 10 \text{ m}^3/\text{h}$ bilden einen optimierten Betriebsbereich des Gesamtsystems und ermöglichen eine effiziente Probenahme. Die Erfüllung der Vorgaben bzw. Temperaturkorridore ist mit diesem Volumenstrom für einen weiten Bereich unterschiedlicher Bremssysteme gewährleistet.

So zeigt Abbildung 45 zunächst die Einhaltung der mittleren Temperatur über der Sektion 10 für alle Bremsen. Die initiale Bremstemperatur (IBT) liegt bei allen Vorderachsvarianten im vorgesehenen Temperaturkorridor. Gleiches gilt für die finale Bremstemperatur (FBT) mit Ausnahme der Grauguss-Reibpaarung des Porsche Macan. Diese weist eine leichte Unterschreitung des vorgesehenen FBT-Korridors auf. In Hinblick auf eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse, insbesondere unter Beachtung des erkennbar wärmeren Betriebsverhaltens der PSCB-Reibpaarung, wurde an dieser Stelle auf eine Anpassung des Volumenstroms verzichtet. Als zusätzliches Argument für diese Entscheidung ist darauf zu verweisen, dass eine lokale Temperaturmessung mit Hilfe eines Thermoelements insbesondere bei großen Bremsendimensionen (breiter Reibring) in hohem Maße vom temporären Tragbild des Bremsbelags auf der Scheibe abhängt. Häufig führen die vergleichsweise niedrigen Bremsdrücke des WLTP-Brake Cycle bei Bremsanlagen, die für höhere Belastungen ausgelegt sind, zu einem radial sehr lokalen Reibkontakt, dessen Temperatureintrag nicht repräsentativ vom vergleichsweise kleinen Thermoelement erfasst werden kann. Somit ist vor allem bei der Bewertung von Temperaturspitzen eine gewisse Unschärfe zu erwarten und zu berücksichtigen.

Die getesteten Bremsen für Hinterachsen zeigen ein IBT- und FBT-Temperaturverhalten oberhalb der vorgegebenen Korridore (vgl. Tabelle 15). Wie bereits erwähnt existieren bis heute noch keine validierten Korridore für typische Hinterachsvarianten (Vollmaterialscheiben, Trommelbremsen) – die Methode sieht zum aktuellen Zeitpunkt vor, den Volumenstrom für den Test einer Hinterachse anhand der zugehörigen Vorderachsbremse einzustellen. Infolgedessen wurde auch an dieser Stelle die Volumenstromereinstellung gemäß der Vorderachsreferenz (VW Golf VA) beibehalten.

Abbildung 45: Übersicht der „Cooling Test“ Temperaturentwicklung



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

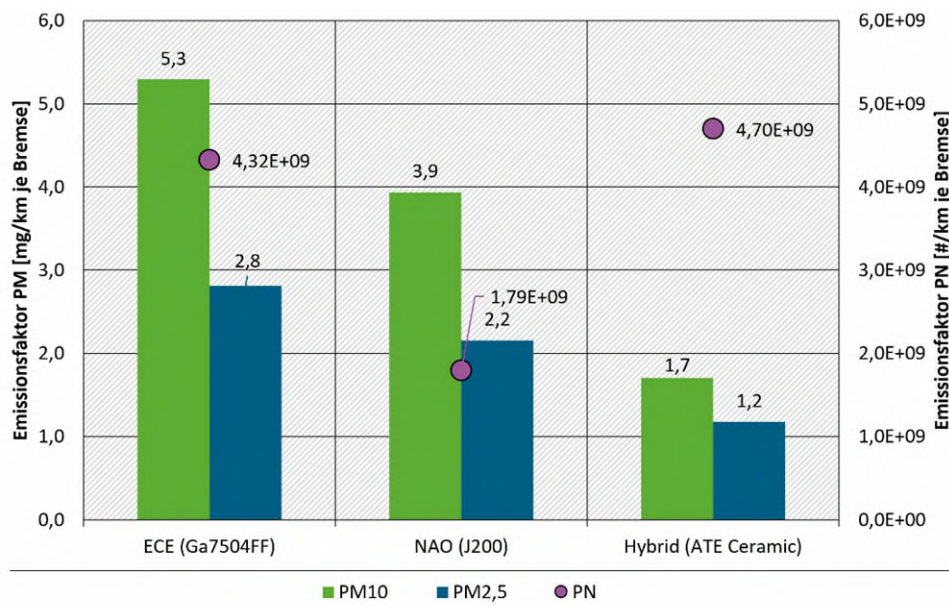
Vergleich der Bremsbelagqualitäten

Auf Basis der VW Golf VA wurde eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Bremsbelagzusammensetzungen vorgenommen. Einem Vertreter der auf dem europäischen Markt dominanten ECE-Beläge (auch „Low-Steel“-Beläge genannt) in Form des Galfer7504FF wurden ein Jurid200 NAO Bremsbelagsatz (amerikanischer bzw. asiatischer Markt) und ein ATE Ceramic Aftermarket Belagsatz gegenübergestellt. Alle drei Belagmixturen wurden auf herkömmlichen Grauguss-Bremsscheiben getestet.

Abbildung 46 zeigt die Emissionsfaktoren für Partikelmasse (PM) und -anzahl (PN) als Mittelwert der jeweils absolvierten drei Hauptemissionstests (HET) pro Reibpaarung. Erwartungsgemäß erzeugt die ECE-Reibpaarung am meisten feinstaubrelevante Partikelmasse. Als Serienreibpaarung für den europäischen Markt dient sie im Folgenden als Referenz. Hohe Anforderungen in Europa an die Bremsleistung und Temperaturstabilität der Reibsysteme, allen voran auf deutschen Autobahnen, setzen gewissermaßen aggressive Beläge voraus, die gleichzeitig zu einem entsprechend hohen Verschleiß führen. Insbesondere ist es der Verschleiß der Bremsscheibe, welcher durch die abrasive Wirkung der ECE-Bremsbeläge in den Vordergrund rückt (vgl. Abbildung 47).

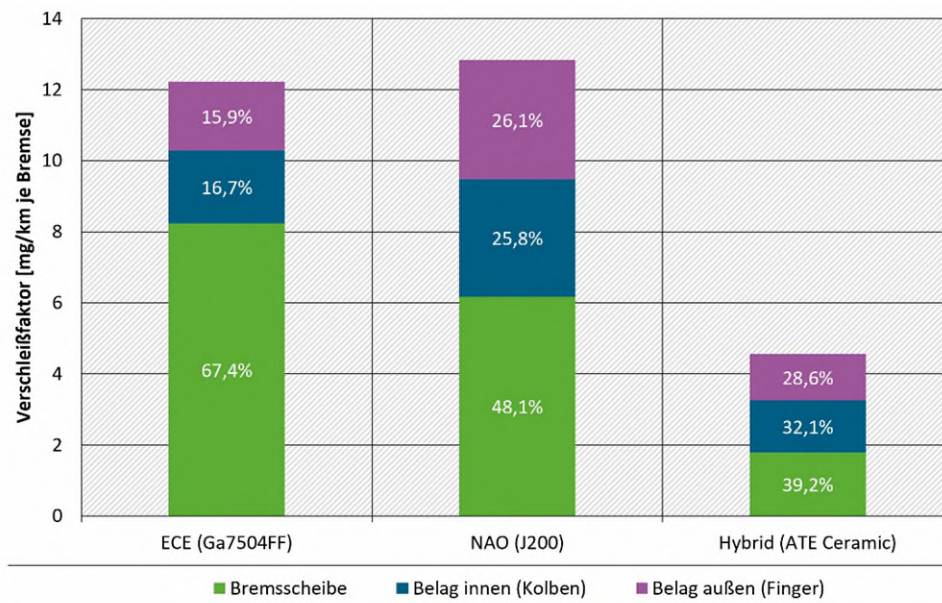
Durch die Verwendung von NAO-Bremsbelägen sind gegenüber der ECE-Referenz Emissionsreduktionspotenziale sowohl bei PM als auch PN messbar. Diese ursprünglich zur Komfortoptimierung (Verringerung von Geräuschen und Felgenverschmutzung) entwickelten Beläge bewirken einen geringeren Scheibenverschleiß, sind allerdings selbst weniger verschleißbeständig. Aus diesem Grund übersteigt der Gesamtverschleiß dieses Reibsystems wie in Abbildung 47 zu erkennen ist, letztlich die ECE-Referenz. Trotz ähnlichem Verschleißniveau äußert sich der Masseverlust der NAO-Reibpaarung messbar weniger feinstaubrelevant.

Abbildung 46: Emissionsfaktoren Vergleich der Bremsbelagqualitäten



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

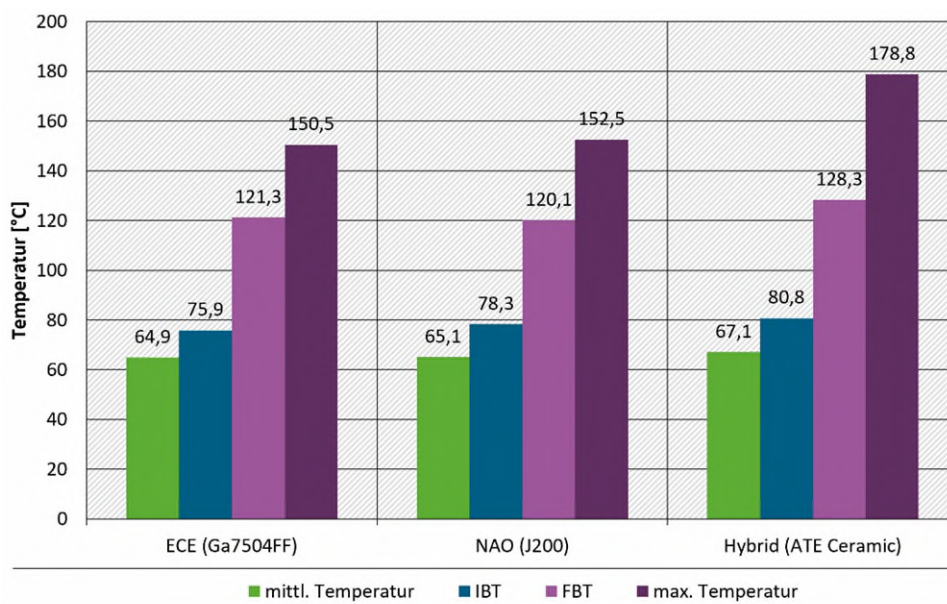
Abbildung 47: Verschleißfaktoren Vergleich der Bremsbelagqualitäten



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Erhebliche PM-Reduktionen sind bei den ATE Ceramic Bremsbelägen feststellbar. Der Emissionsfaktor der Partikelanzahl übersteigt dagegen sogar leicht die ECE-Referenz. Häufig kann ein solches Verhalten auf die Temperaturentwicklung und allen voran auf lokale Spitzentemperaturen zurückgeführt werden. Hohe Temperaturen begünstigen die Entstehung kleiner Partikel, die wiederum großen Einfluss auf die Gesamtpartikelanzahl besitzen. Dagegen sind sie bei der Feinstaubmasse kaum messbar. Abbildung 48 veranschaulicht vor allem eine erhöhte Spitzentemperatur der Ceramic Reibpaarung, die eine solche Argumentation im Ansatz stützt.

Abbildung 48: Temperaturen Vergleich der Bremsbelagqualitäten



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Vergleich bezüglich Rekuperation

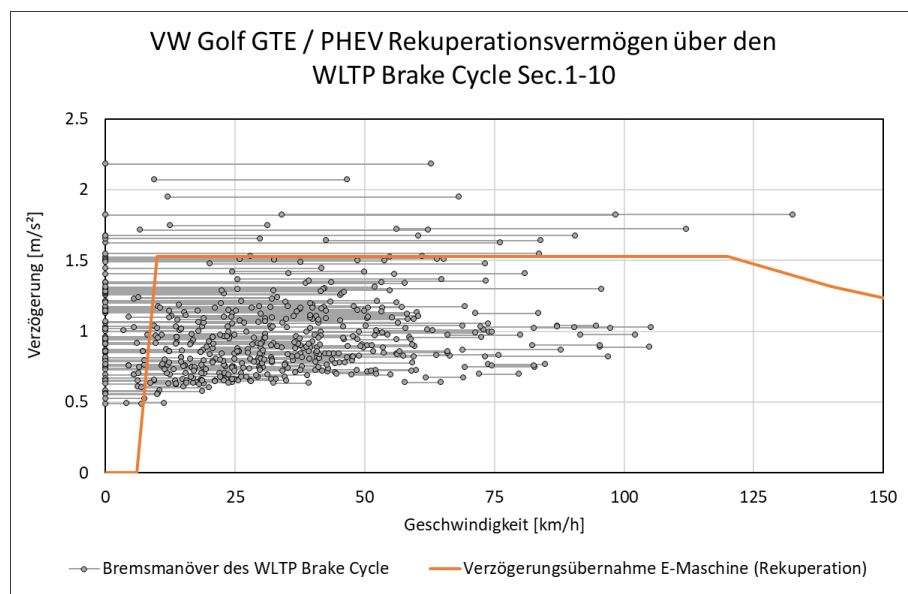
In einer Grenzwertbetrachtung lassen sich Bremsstaubemissionen auf den Wert null reduzieren, wenn die Reibungsbremse nicht verwendet wird. Die Fähigkeit elektrisch angetriebener Fahrzeuge, ein Bremsmoment durch die Generatorwirkung der E-Maschine (Rekuperation) zu erzeugen, führt zu erheblich geringerer Nutzung und weniger intensiver Beanspruchung der mechanischen Bremse. Das Potenzial zur Feinstaubreduktion hängt dabei vorrangig von der Leistungsfähigkeit der elektrischen Maschine in Kombination mit dem Energiespeicher (Batterie) ab.

Um dem Ziel dieser Untersuchungen gerecht zu werden, eine realitätsnahe Einordnung aktueller Systeme und Konzepte des europäischen Marktes vorzunehmen, wurde die Rekuperationsfähigkeit eines VW Golf GTE (PHEV) nachgebildet.

Aufgrund der Tatsache, dass noch keine definierte Methode für die Untersuchung von Bremsystemen elektrifizierter Fahrzeuge existiert, mussten einige Rahmenbedingungen und Annahmen vorab festgelegt werden. Zunächst geht man im Rahmen dieser Untersuchungen von der dauerhaft verfügbaren maximalen Rekuperationsleistung des Fahrzeugs aus. Das bedeutet, dass weder der Ladezustand des Akkus (SoC) noch diverse für die elektrische Leistungsfähigkeit relevante Umwelteinflüsse Berücksichtigung finden.

Da die tatsächliche Generatorkennlinie und das Blendingverhalten des Fahrzeugs nicht bekannt sind, wurde für die Simulation der Rekuperation eine Generatorleistung von 85 kW angenommen. Die maximal durch die E-Maschine realisierbare Verzögerung beträgt damit etwa $0,156 g$ (bzw. $1,53 \text{ m/s}^2$). Der Bereich des Blendings beim Verzögern niedriger Geschwindigkeiten findet zwischen 10 und 6 km/h statt. Damit ergibt sich das in Abbildung 49 dargestellte Rekuperationskennfeld und in Summe eine Bilanz aus 28 rein über die Reibungsbremse ($a > 0,156 g$), 128 geblendeten ($V_{\text{end}} < 10 \text{ km/h}$) und 147 allein durch die E-Maschine verzögerten Bremsmanövern.

Abbildung 49: Angenommenes Rekuperationskennfeld des VW Golf GTE für den WLTP Brake Cycle

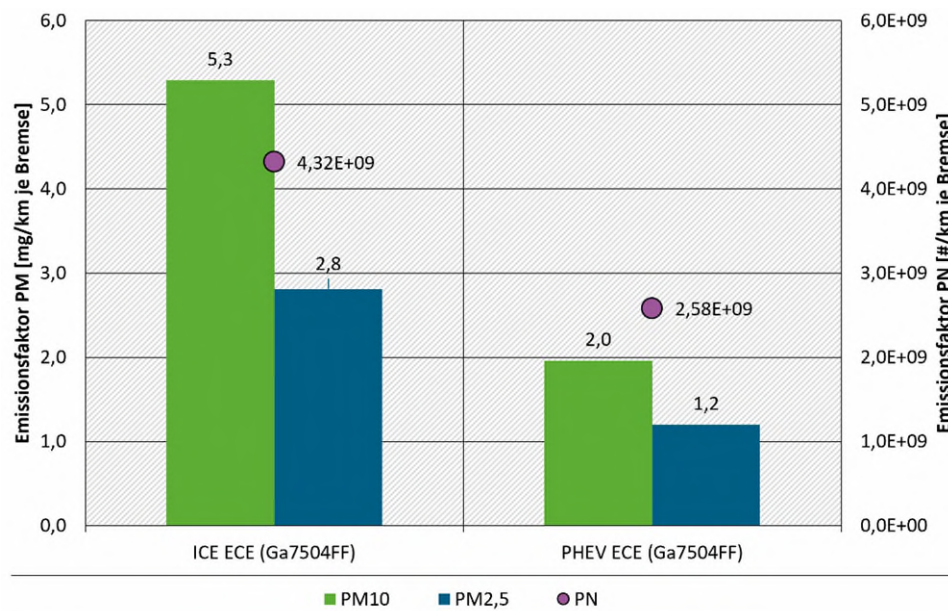


Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Als Bremsanlage wurde die bereits aus dem Bremsbelagvergleich bekannte Scheibenbremse der VW Golf VA verwendet. Verglichen wird an dieser Stelle das Emissionsverhalten der konventionell belasteten ECE-Reibpaarung (ICE) mit einer rekuperativ betriebenen ECE-Reibpaarung (PHEV) gleichen Typs. Um eine gleiche Ausgangslage für die Emissionstests herzustellen, wurde das Bedding der PHEV-Reibpaarung mittels konventionellem Belastungskollektiv durchgeführt. Dadurch ist sichergestellt, dass beide Reibpaarungen zur eigentlichen Emissionsmessung einen vergleichbaren Einlaufzustand (ca. 961 km WLTP-Brake Cycle - konventionell) besitzen. Gleichzeitig folgt daraus allerdings, dass ein Vergleich der Verschleißmassen nicht sinnvoll ist, da eine eindeutige Rückführbarkeit auf die rekuperative Belastung nicht gewährleistet ist.

Die Gegenüberstellung der Emissionsfaktoren zwischen konventioneller (ICE) und rekuperativer (PHEV) Betriebsweise ist Abbildung 50 zu entnehmen. Daraus wird ersichtlich, dass die ideale Rekuperation eines aktuell marktüblichen PHEV unter WLTP-Brake Vergleichsbedingungen eine Reduktion der Partikelmasse um ca. 60 % erreichen kann. Das Einsparpotenzial von ca. 40 % bei der Partikelanzahl fällt zwar etwas geringer aus, zeigt aber dennoch einen signifikanten Ansatz zur Bremsstaubreduktion auf.

Abbildung 50: Emissionsfaktoren Vergleich bezüglich Rekuperation



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Vergleich zwischen Vorder- und Hinterachse

Fahrphysikalisch sorgt die dynamische Achslastverteilung bei einem Bremsvorgang für eine Zunahme der Radlasten an der Vorderachse. Aus diesem Grund müssen die vorderen Bremsanlagen von PKW nicht selten mehr als zwei Drittel der zur Verzögerung benötigten Gesamtbremsleistung erzeugen. In der Folge werden größere Brems Scheiben eingesetzt und die Reibkontaktfläche steigt. Bereits die Dimension einer Bremsanlage besitzt Auswirkungen auf die Feinstaubemission (vgl. Abschnitt: Vergleich auf Grundlage der Fahrzeugdimension).

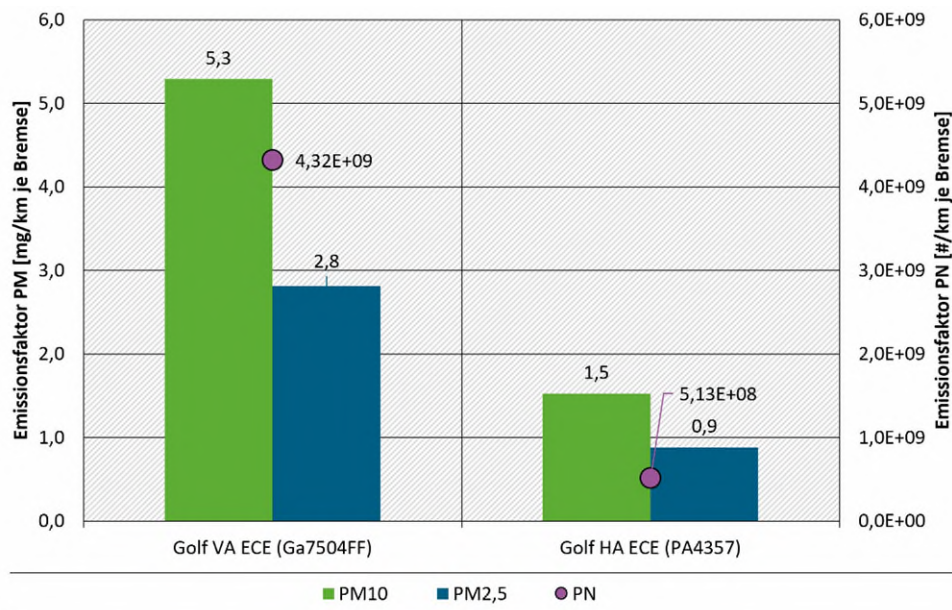
Zusätzlich führt das aus den Radlasten folgende höhere Massenträgheitsmoment der Vorderachse zu einem höheren Bremsleistungsbedarf, was die Partikelemission ebenfalls nachteilig beeinflusst.

Um die jeweiligen Anteile der Vorder- bzw. Hinterachse an der Gesamtbremsstaubemission eines Fahrzeugs aufzuzeigen, wurde im Rahmen dieser Kampagne die zum selben Fahrzeug (VW

Golf) gehörende Hinterachs-Scheibenbremsanlage untersucht und dem bereits vorgestellten Emissionsverhalten der VW Golf VA gegenübergestellt. Auch an dieser Stelle beruht der Vergleich auf den regulär erhältlichen Serienteilen mit ECE-Bremsbelägen.

Erwartungsgemäß können Abbildung 51 deutlich geringere Emissionsfaktoren der Hinterachsbremse verglichen mit der zugehörigen Vorderachsreibpaarung entnommen werden. Die PM-Emission der Hinterachse beträgt in diesem Fall etwa 23 % des Gesamtemissionsniveaus des Fahrzeugs. Bei der Partikelanzahl sind es lediglich 11 %.

Abbildung 51: Emissionsfaktoren Vergleich zwischen Vorder- und Hinterachse

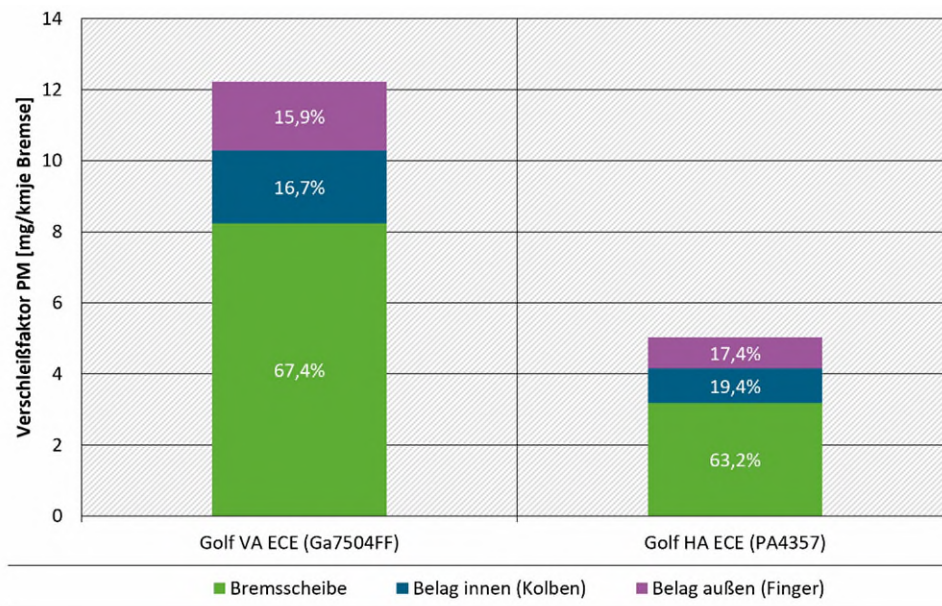


Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Anhand dieses Vergleiches mit einem Fahrzeug, das etwa ein Drittel der Verzögerung über die Hinterachsbremsen erzeugt (Bremskraftverteilung HA: 34 %), wird somit die zusätzliche Emissionsminderung durch die Dimension der Bremsanlage deutlich.

Beim Vergleich der Verschleißfaktoren stellt sich mit ca. 29 % ein der Partikelmasse ähnlicher Anteil der Hinterachse am Gesamtverschleiß ein. Neben der Gegenüberstellung des Absolutverschleißes zeigt Abbildung 52 erneut die Charakteristik von Reibpaarungen mit ECE-Bremsbelägen hinsichtlich der sich einstellenden Verschleißanteile. Die abrasiv wirkenden Beläge verursachen einen hohen Scheibenverschleiß, der häufig etwa zwei Drittel des Gesamtverschleißes ausmacht.

Abbildung 52: Verschleißfaktoren Vergleich zwischen Vorder- und Hinterachse

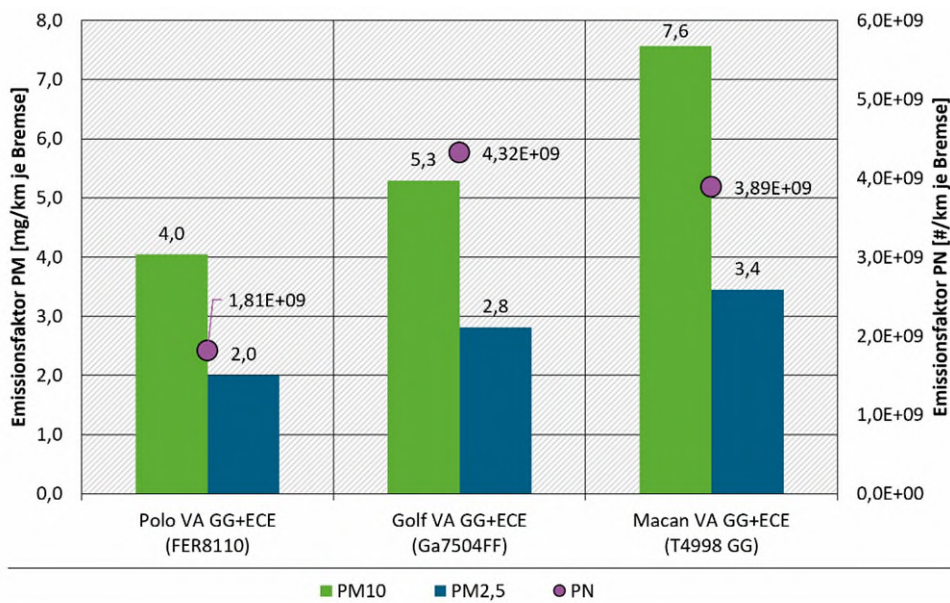


Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Vergleich auf Grundlage der Fahrzeugdimension

Wie beim Vergleich zwischen Vorder- und Hinterachse bereits erwähnt, ist das Emissionsverhalten von Bremsanlagen stark von der Dimension des Reibsystems geprägt. Große Kontaktflächen besitzen schließlich das Potenzial, in Summe ein höheres Feinstaubniveau zu produzieren. Da die Bewegungsenergie eines Fahrzeugs masseabhängig ist, sind schwerere Fahrzeuge in der Folge mit größeren, leistungsfähigeren Bremsanlagen ausgestattet, um die notwendige Energieumwandlung zur Verzögerung zu erreichen. Entsprechend verdeutlicht Abbildung 53 die Emissionszunahme mit steigender Fahrzeuggröße bzw. höherem Gesamtgewicht.

Abbildung 53: Emissionsfaktoren Vergleich auf Grundlage der Fahrzeugdimension

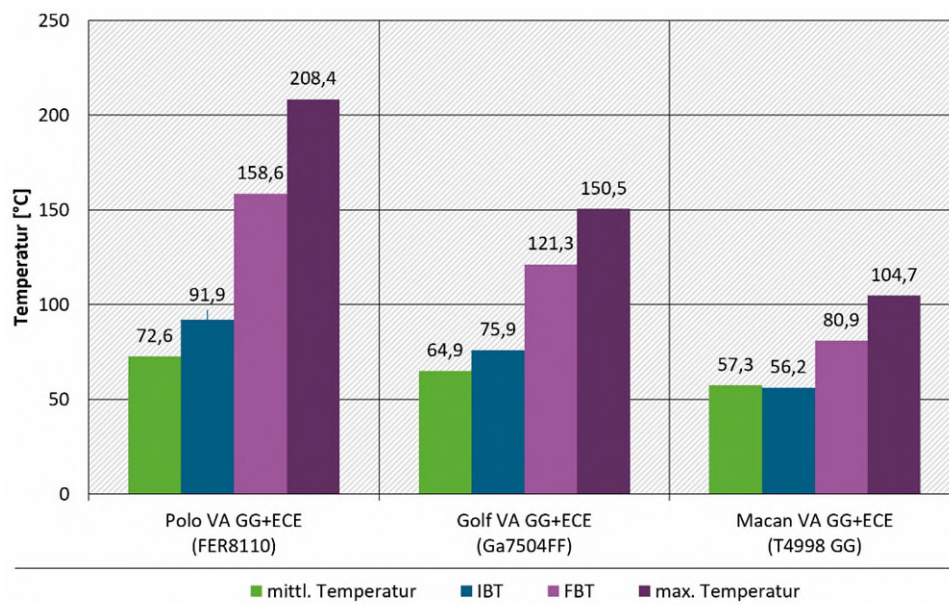


Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Die Serienbremsanlagen des Kleinwagens (VW Polo), Kompaktklasse (VW Golf) und des SUV (Porsche Macan) emittieren in der Reihenfolge ihrer Größen- und Gewichtszuordnung steigende Feinstaubmassen (PM). Die mit 390 mm Scheibendurchmesser größte Bremsanlage innerhalb dieser Messkampagne des Porsche Macan zeigt mit einem PM_{2,5}/PM₁₀-Verhältnis von 0,46 eine Tendenz zu größeren Partikeln verglichen mit Polo (0,5) und Golf (0,53). Diese Beobachtung liefert gleichzeitig einen Ansatz zur Erklärung der Entwicklung der Partikel-Anzahlemission (PN) der Porsche Macan Reibpaarung. Feinstaub größerer Partikeldurchmesser wirkt sich letztlich verhältnismäßig stärker auf das PM-Ergebnis als auf die Partikel-Gesamtanzahl aus.

Unterstützt wird die Annahme größerer Partikeldurchmesser der Porsche Macan Bremse unter Betrachtung der Temperaturentwicklung. Diese ist in Abbildung 54 dargestellt und zeigt, dass die große Brems Scheibe (höhere Masse und gute Wärmeleitfähigkeit) unter WLTP-Brake Belastung mit deutlich geringeren Temperaturen reagiert, als die Bremsen der Kleinwagen und Kompaktklasserfahrzeuge. Entsprechend ist davon auszugehen, dass die Emission anzahlintensiver ultrafeiner Partikel gering ausfällt. Bemerkenswert ist insbesondere die sehr geringe Maximaltemperatur der Porsche Macan Bremsanlage, wodurch wiederum eine gewisse Überdimensionierung verdeutlicht wird. Als vergleichsweise leistungsstarkes SUV ist schließlich auch die Bremsanlage des Macan für deutlich höhere Belastungen ausgelegt.

Abbildung 54: Temperaturen Vergleich auf Grundlage der Fahrzeugdimension

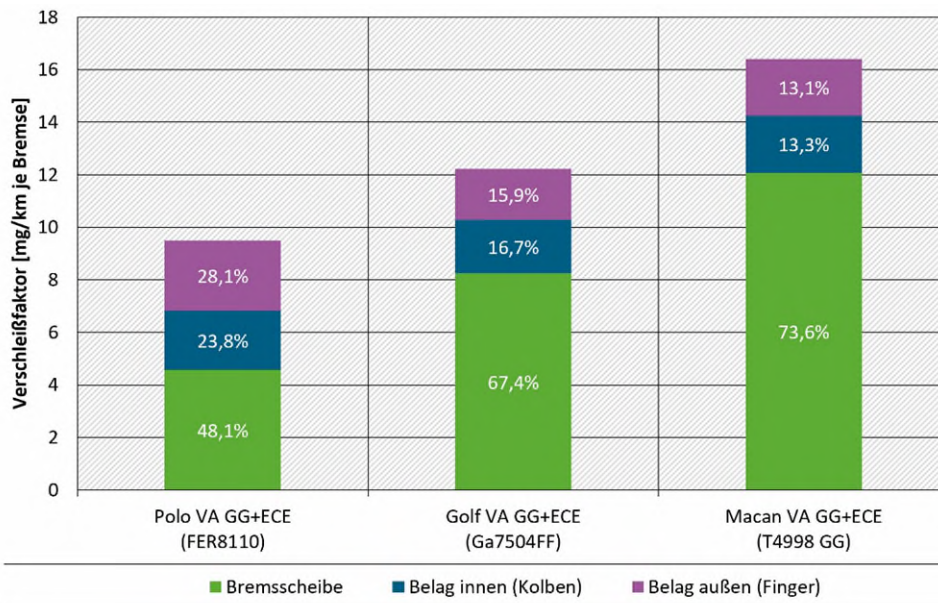


Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Einen weiteren Hinweis darauf, dass das Reibsystem des Porsche Macan dafür konzipiert wurde, auch bei sportlicher Fahrweise die nötigen Verzögerungen zu erreichen, geben die in Abbildung 55 dargestellten Verschleißanteile. Der mit über 73 % des Gesamtverschleiß zu Buche schlagende Scheibenverschleiß beweist, wie aggressiv die Zusammensetzung des Bremsbelags auf die Scheibe wirkt. Die sonst für ECE-Reibpaarungen gebräuchlichen zwei Drittel Scheibenverschleiß werden bei sportlichen Fahrzeugen häufig überschritten. Kleinwagen, die selten in Richtung Bremsleistung ausgelegt sind, verwenden dagegen oftmals Kombinationen von Reibpartnern, die ausgewogenere Verschleiß-anteile hervorbringen. So liegt auch bei diesem Vergleich der Anteil des Scheibenverschleißes der VW Polo Reibpaarung sogar unter 50 %.

Betrachtet man den Absolutverschleiß der Reibpaarungen, wird eine Korrelation zwischen Partikelmasse Fahrzeugdimension/Fahrzeuggewicht.

Abbildung 55: Verschleißfaktoren Vergleich auf Grundlage der Fahrzeugdimension



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Vergleich Minderungspotenzial alternativer Reibpaarungen

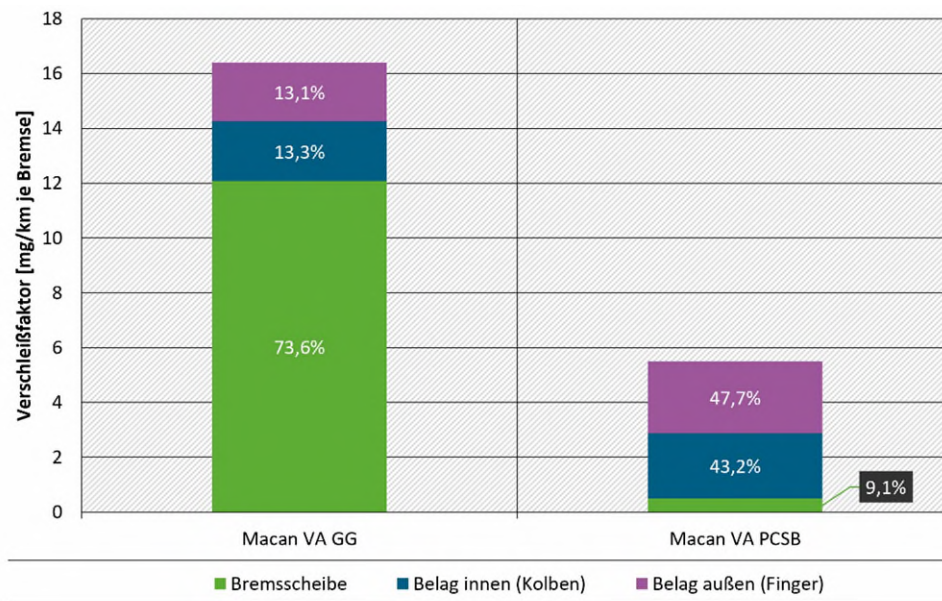
Der Grund für die Wahl des Porsche Macan als Vertreter des Oberklasse-SUV Segments innerhalb dieser Messkampagne besteht vorrangig in der bereits seit einiger Zeit serienreif verfügbaren hartmetallbeschichteten Bremsscheibe. Diese bei Porsche als „Porsche Surface Coated Brake“ (PSCB) bezeichnete, mit Wolframcarbid beschichtete Scheibe besitzt eine etwa zehnfach höhere Oberflächenhärte im Vergleich zu konventionellen Grauguss-Bremsscheiben (GG) (Porsche AG, 2017). Dadurch entsteht auf Seiten der Bremsscheibe eine hohe Verschleißbeständigkeit, die auch innerhalb dieser Untersuchungen nachgewiesen werden konnte (vgl. Abbildung 56).

Liegt bei der GG-Reibpaarung der Verschleißfaktor der Bremsscheibe bei 12,1 mg/km pro Bremse, so wurden für die PSCB-Scheibe lediglich 0,5 mg/km pro Bremse gemessen. Die Oberflächenhärtung durch den Auftrag von Wolframcarbid-Mischkristallen führt in diesem konkreten Fall also zu einer um Faktor 24 höheren Verschleißbeständigkeit.

Ausdrücklich hinzuweisen ist an dieser Stelle darauf, dass sich durch die Verwendung oberflächenbeschichteter Bremsscheiben die tribologischen Prozesse im Reibkontakt verändern. Aus diesem Grund ist es nötig, speziell auf die jeweilige Beschichtung angepasste Bremsbeläge zu entwickeln. Die Verwendung herkömmlicher ECE-Reibpaarungen ist in der Regel nicht zielführend. Deshalb gehören zur PSCB auch eigens konzipierten Bremsbeläge, die hier entsprechend verwendet wurden.

Im direkten Vergleich mit der GG-Referenz stellt sich bei den angepassten Belägen der PSCB-Reibpaarung ein um etwa 15 % höherer Verschleiß ein. Die anteiligen Verschleißwerte innerhalb der Reibpaarung fallen, bedingt durch die hohe Verschleißbeständigkeit der beschichteten Scheibe, zu Lasten der Bremsbeläge aus.

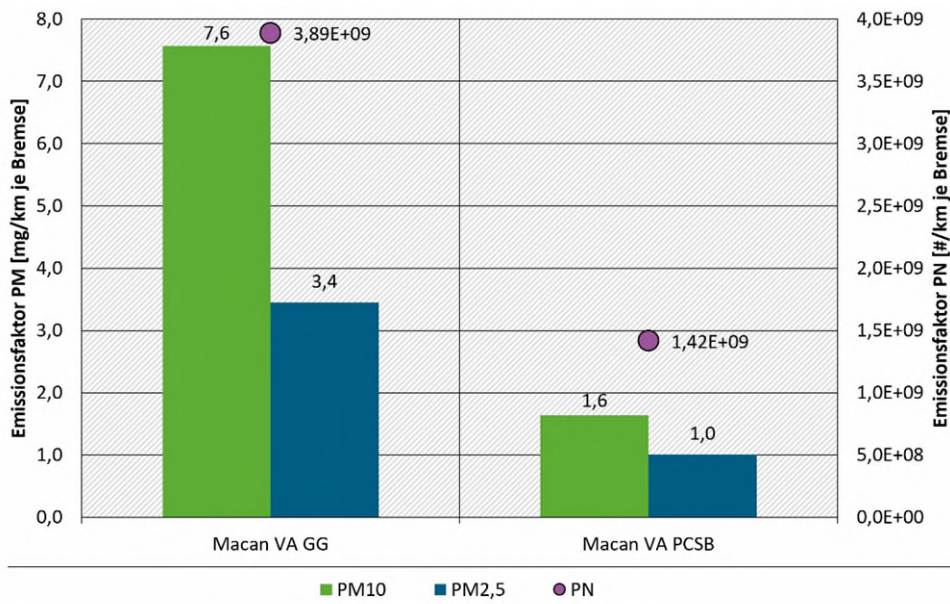
Abbildung 56: Verschleißfaktoren Vergleich Minderungspotenzial alternativer Reibpaarungen



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Infolge der Verschleißreduktion durch die Verwendung hartmetallbeschichteter Bremsscheiben sinkt auch das zugehörige Emissionsniveau deutlich. Abbildung 57 veranschaulicht eine PN-Einsparung von über 60 % in Bezug auf die GG-Referenz. Bei der Partikelmasse sind es sogar über 70 %.

Abbildung 57: Emissionsfaktoren Vergleich Minderungspotenzial alternativer Reibpaarungen



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Vergleich Bremssysteme

Den Abschluss der Untersuchungen bildet der Vergleich zwischen Scheiben- und Trommelbremse von Fahrzeugen der Kompaktklasse. Lange Zeit schien es, dass die Trommelbremse größtenteils vom Markt verdrängt wurde und nur noch als Hinterachsbremse in einigen schwach motorisierten Kleinwagen zu finden ist. Mit dem Wandel der Automobilindustrie hin zur Elektromobilität kehrt die Trommelbremse nun zurück. Zwar ist aufgrund der hohen Fahrzeug-gewichte für Vorderachsen weiterhin eine Scheibenbremse Stand der Technik, an der Hinterachse bietet dagegen die Trommelbremse vielversprechende Potenziale.

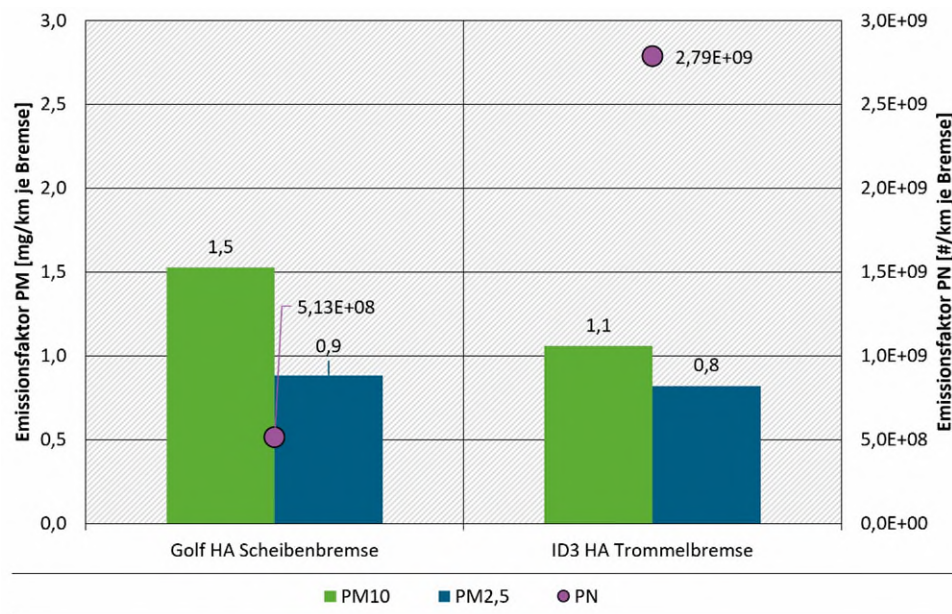
Zunächst einmal ist herauszustellen, dass die Verwendung elektrischer Antriebe auch die Entwicklungsschwerpunkte bei den Radbremsen verschiebt. Durch die Fähigkeit zur Rekuperation der häufig vorrangig an der Hinterachse verwendeten E-Maschinen ist für die Radbremse insbesondere der Bedarf an thermischer Stabilität in den Hintergrund gerückt. Weiterhin führt die seltenere und weniger intensive Nutzung der Reibungsbremse zu verstärkter Korrosion der Reibpartner, was nicht nur ein optisches Problem darstellt, sondern im Ernstfall sogar zur Gefahr werden kann.

Die beispielhaft genannten Aspekte liefern bereits Argumente für den Einsatz einer Radbremse, die baulich geschlossen und damit vor ihrer Umgebung weitestgehend geschützt ist. An diesem Punkt kommt auch das Ziel zur Emissionsreduktion ins Spiel. Die geschlossene Bauart der Trommelbremse bietet gleichzeitig das Potenzial, Bremsenabrieb und Feinstaubpartikel innerhalb der Trommel abzuscheiden und damit die Emission in die Umwelt einzudämmen. Die Qualität der Feinstaubabschirmung hängt letztlich davon ab, wie effektiv die Abdichtung zwischen rotierender Trommel und feststehendem Bremsenträger konzipiert wurde. Sogenannte Labyrinthdichtungen eignen sich nachweislich zur Eindämmung größerer Partikel. Sehr feine Partikelvorkommen verbleiben allerdings zumeist nicht vollständig innerhalb des Systems und sind auch weiterhin emissionstechnisch messbar.

Entsprechend gibt das der Vergleich zwischen der Scheibenbremse der VW Golf Hinterachse und der von der Hinterachse des VW ID3 stammenden Trommelbremse wieder (konventionelle Belastung beider Bremssysteme – keine Simulation der Rekuperation). In Abbildung 58 ist zu erkennen, dass die Trommelbremse in diesem Fall tatsächlich weniger PM₁₀ emittiert. Die Masseemission im Bereich von Partikeln kleiner 2,5µm (PM_{2,5}) liegt dagegen auf dem von der Scheibenbremse bekannten Niveau.

Für die vorliegende Trommelbremse scheint die Abdichtung bezüglich Feinstaub noch nicht optimal gelungen, was sich zunächst durch den Emissionsfaktor der PM_{2,5} Fraktion äußert und durch die im Vergleich zur Scheibenbremse deutlich erhöhte PN-Emission bestätigt. Der zu 2.79E+09 #/km pro Bremse ermittelte Emissionsfaktor der Trommelbremse liegt damit gar im Bereich der getesteten Vorderachsscheibenbremse des VW Golf.

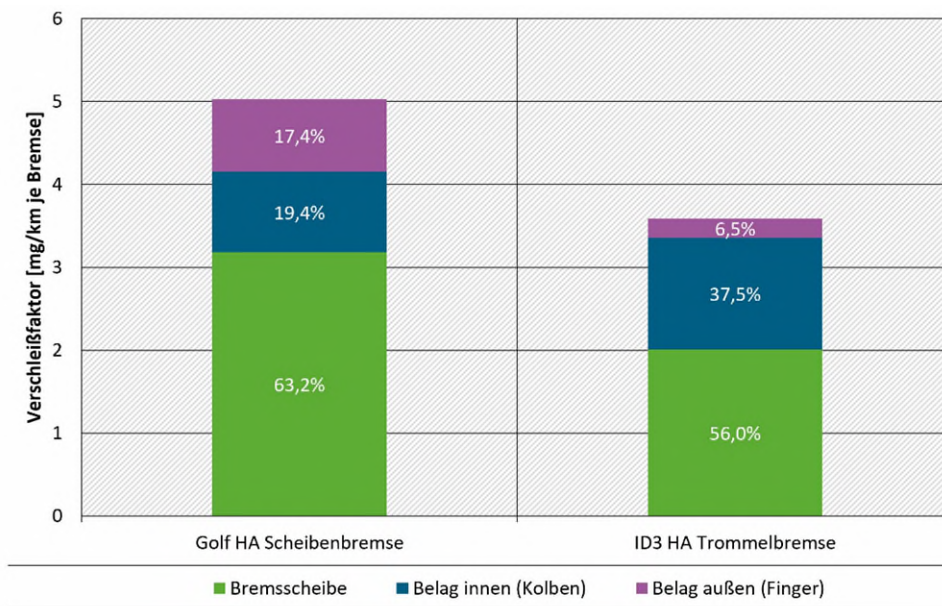
Abbildung 58: Emissionsfaktoren Vergleich Bremssysteme



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Bei der Beurteilung der Partikelanzahlemission ist zu berücksichtigen, dass sich bei Trommelbremsen häufig ein sehr lokales Tragbild einstellt. Durch das Simplex-Prinzip und die damit verbundene einseitige Selbstverstärkung wird die Bremsenergie zu einem Großteil an der auflaufenden (Primär-)Backe umgesetzt. Diese prinzipbedingte Besonderheit in Kombination mit dem Anlegeverhalten der Backen an die umlaufende Trommel bei den niedrigen Bremsdrücken des WLTP Brake Cycle sorgen für lokale Spitzentemperaturen. Diese Spitzentemperaturen, die durch ein einzelnes Thermoelement in der Trommel überhaupt nicht aufgelöst werden können, tragen aufgrund des hohen Harzanteils der Bremsbacken mehr noch als bei Scheibenbremsen letztlich zur Bildung von ultrafeinen Partikeln bei. Der angesprochene Belastungsunterschied zwischen den Backen der Trommelbremse wird auch in Abbildung 59 anhand der Verschleiß-anteile der auflaufenden (Primär-) und der ablaufenden (Sekundär-) Backe deutlich. Ein um etwa 30 % geringerer Gesamtverschleiß des Trommelbremssystems im Vergleich zur Scheibenbremse deutet allerdings gleichzeitig darauf hin, dass die PM10-Einsparungen bei diesem Bremssystem nicht vollständig auf der Abdichtung beruhen, sondern zum Teil auch durch eine höhere Verschleißbeständigkeit hervorgerufen werden.

Abbildung 59: Verschleißfaktoren Vergleich Bremssysteme

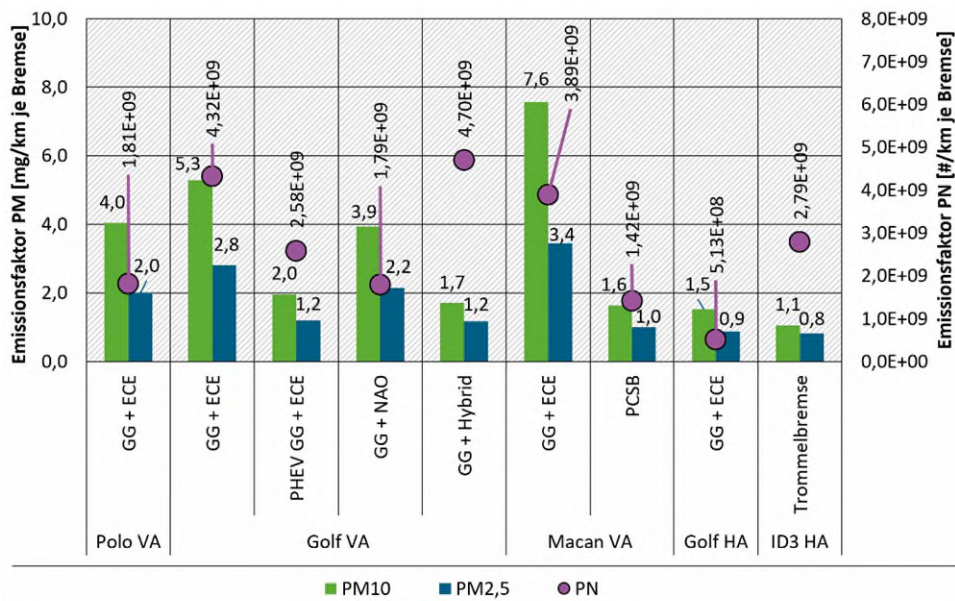


Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

Übersicht der Emissionsfaktoren in der Untersuchungsreihe „Marktvergleich“

In Abbildung 60 ist die Gegenüberstellung der PN- und PM-Emissionsfaktoren aller in der Messkampagne „Marktvergleich“ untersuchten Bremsen zusammengefasst. Letztlich ist noch einmal gut zu erkennen, wie insbesondere die emittierte Partikelmasse mit den Einflussgrößen Fahrzeuggewicht bzw. Bremsendimension korreliert. Die Ergebnisse der Partikelanzahl sind dagegen schwieriger einzuordnen. Unterschiede bei der chemischen Zusammensetzung der Bremsbeläge, dem Temperaturverhalten der Bremse und bei der Tragbildausprägung zwischen den Reibpartnern führen zu einer hohen Variation der PN-Emissionsfaktoren.

Abbildung 60: Übersicht der PN- & PM-Emissionsfaktoren aller untersuchten Bremsen



Quelle: eigene Darstellung, TU Ilmenau

4.3.4 Zusammenfassung und Einordnung der Messergebnisse

Die Ergebnisse der im Rahmen dieses Vorhabens am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Ilmenau durchgeführten Messungen zur Feinstaubemission von Reibungsbremsen liefern zunächst einen stichprobenartigen Überblick zur Einordnung des Emissionsniveaus typischer Bremssysteme des deutschen Fahrzeugmarktes. Daraus ist grundsätzlich eine Korrelation zwischen der Gesamtemission und dem Fahrzeuggewicht abzuleiten, da ein höherer Energieumsatz mit einem höheren Verschleiß der Reibpartner einhergeht.

Aufgrund höherer dynamischer Radlasten der Vorderachse während eines Bremsmanövers ist für dort eingesetzte Bremssysteme im Vergleich zur hinteren Fahrzeugachse ebenfalls eine signifikant stärkere Feinstaubfreisetzung auszumachen.

Um die Partikelemission der Hinterachsbremsen weiter zu reduzieren, wird u.a. der Einsatz von Trommelbremsen als vielversprechend betrachtet. Anzustreben ist dafür allerdings eine gezielte Abdichtung des in sich gekapselten Bremssystems.

Eines der größten Bremsstaubreduktionspotenziale geht aktuell von der Technologie des regenerativen Bremsens aus. Indem die Nutzung der Reibungsbremse minimiert und durch elektrisches Bremsen ersetzt wird, entstehen automatisch deutlich weniger Verschleißpartikel. Gleichzeitig verschieben sich dadurch die Anforderungen an Bremssysteme im Allgemeinen. Eine weitere Maßnahme zur Bremsstaubreduktion sind beschichtete Brems Scheiben, die neben ihrer enormen Verschleißbeständigkeit, die einen massiven Rückgang der Feinstaubemissionen bewirkt, auch die Eigenschaft besitzen, Korrosion in Folge der seltenen Verwendung der Reibungsbremse zu vermeiden.

Aufgrund der Tatsache, dass einige der beschriebenen Ansätze zur Emissionsreduktion erst durch die Neuentwicklung von Fahrzeugen und Bremssystemen verwirklicht werden können, sind darüber hinaus auch kurzfristige Lösungswege aufzuzeigen. Ein Beispiel in diesem Sinne stellt die Verwendung in Bezug auf Feinstaub optimierter Bremsbeläge dar. Das Potenzial zur Verringerung der Partikelemission von in internationalen Märkten eingesetzten NAO-Beläge kann durch die durchgeführten Messungen bestätigt werden. Ebenso bieten einige Hybrid-Bremsbeläge (z.B. auf Keramikbasis) vielversprechende Minderungspotenziale.

Unabhängig von der Materialwahl ist es darüber hinaus anzustreben, den auch ohne Betätigung der Bremse vorliegenden Restkontakt zwischen Bremsbelägen und -scheibe zu minimieren bzw. gänzlich zu vermeiden. Durch die Vermeidung der sogenannten Restbremsmomente können nicht nur Bremspartikel reduziert, sondern letztlich auch der Energieverbrauch zum Antreiben des Fahrzeugs minimiert werden. Eine Möglichkeit zur Realisierung des dafür benötigten Lüftspiels zwischen Belägen und Scheibe bieten passive Rückstellelemente (z.B. Federanordnungen aus Blech), die vergleichsweise einfach für viele Bremssysteme eingesetzt werden können.

Darüber hinaus sind aus den laborübergreifenden Messungen im Rahmen der PMP ILS Erkenntnisse ableitbar, die Anlaß zur Konkretisierung der Messmethode geben. Anhand der Streuung insbesondere der PM-Emissionsfaktoren zwischen den einzelnen Laboren wird deutlich, dass Anpassungen der protokollseitigen Definitionen und Qualitätskriterien nötig sind, um stabile und vergleichbare Ergebnisse erzielen zu können. Einige Ansätze mit Blick auf eine Vereinheitlichung des Messaufbaus wurden bereits in der aktuellen Fassung der Methodik umgesetzt bzw. weiter konkretisiert (Bremsenposition und -umhausung, Kanalanordnung, Sampling-Position, ...). Zudem wurde für die Messung der Partikelmasse die Verwendung von separaten Filterhaltern mit vorgeschalteten Zyklonen für den jeweiligen Trenndurchmesser vorgeschrieben. In-Stack-Messungen mittels kalibrierter Kaskadenimpaktoren sind dadurch nicht länger konform.

Um an der Zählereinheit vorliegende Partikelanzahlkonzentrationen oberhalb des für das jeweilige Messgerät zertifizierten Bereichs zu vermeiden, sollte für zukünftige Untersuchungen eine Vorverdünnung des Aerosols vorgesehen werden.

Gleichzeitig sind möglichst konstante Luft- und Umgebungsbedingungen anzustreben, um zum einen Einflüsse durch eine Variation der Lufttemperatur – oder feuchte zu vermeiden und zum anderen die Partikelhintergrundkonzentration generell auf einem geringen Niveau zu halten.

Mit dem Ziel der Einsparung von Prüfstandszeiten wurde ferner der eigentliche Hauptemissionstest, der sich zur Bestimmung der ausgewiesenen Emissionsfaktoren an die fünf Wiederholungen des WLTP Brake Cycle des Beddings anschließt, von drei weiteren Zyklen auf einen einzigen reduziert. Vor dem Hintergrund toleranzbehafteter und statistisch schwankender tribologischer Prozesse bzw. Messsysteme muss diese Entscheidung kritisch betrachtet werden. Liefert eine mehrfache Wiederholung mit anschließender Mittelwertbildung zwar eine bessere statistische Absicherung, so erhöht sich dadurch allerdings auch die simulierte Kilometerleistung der jeweiligen Bremse. Letzteres kann zur Folge haben, dass ein nach fünf Zyklen des WLTP Brake Cycle (ca. 961 km) noch nicht abgeschlossener Einlaufprozess (Bedding) über die folgenden Zyklen zu einem weiteren Emissionsrückgang führt. In diesem Sinne gewährleistet die Methode zwar nicht automatisch eine Aussage zum konstanten Emissionsverhalten einer vollständig eingelaufenen Reibpaarung, bildet aber aufgrund der über den Einlaufprozess sinkenden Emissionsfaktoren bei einer verfrühten Messung in der Regel ein worst-case Szenario ab, was letztlich zu größerem Abstand von zu erwartenden Grenzwerten der EU7-Regulierung führen sollte.

Der Gedanke an einen unvollständigen Einlaufprozess kommt insbesondere auch bei Messungen beschichteter Scheiben auf. Sehr verschleißbeständige Reibpartner benötigen entsprechend lange, um einen stabilen eingelaufenen Zustand zu erreichen.

Ebenfalls werden hohe Bedding-Laufzeiten bei gering belasteten Trommelbremsen benötigt. Die Ausbildung des für einen eingelaufenen Zustand typischerweise vorliegenden 90 % Traganteils wird mitunter erst deutlich nach der fünffachen Durchführung des WLTP-Brake Cycles erreicht. Eine speziell für diese Reibsysteme angedachte Methodik existiert zu diesem Zeitpunkt nicht, wodurch grundsätzlich auch auf das Ziel einer worst-case Beschreibung zurückgegriffen wird.

Ein zusätzlicher und sicherlich aufgrund der vielfältigen Einflussmöglichkeiten auf das Emissionsergebnis nicht minder wichtiger Aspekt besteht weiterhin in der Berücksichtigung rekuperationsfähiger Fahrzeuge innerhalb der Messmethode. Da bereits in naher Zukunft der Großteil der neu- und weiterentwickelten Fahrzeuge auf unterschiedliche Art und Weise elektrifiziert sein werden, ergibt sich bereits jetzt der Bedarf, den methodischen Rahmen zur Bewertung des Emissionsverhaltens der in diesen Fahrzeugen verwendeten Bremsen festzulegen. Die Berücksichtigung über einen reinen Korrekturfaktor hat hier zu stark vereinfachenden Charakter.

Abschließend bleibt festzustellen, dass die Messung von Feinstäuben vielfältigen Einflussfaktoren unterliegt und nur mittels strenger Anforderungen und präziser Versuchsdurchführung in einen methodisch und für die Grenzwertgesetzgebung geeigneten Rahmen gebracht werden kann.

5 Organisation und Durchführung von Fachgesprächen sowie Beratung des UBA

5.1 Fachgespräche und Projektbesprechungen

5.1.1 Fachgespräche

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zwei Fachgespräche auf nationaler Ebene durchgeführt, eines speziell zu Reifenemissionen und ein weiteres zu Bremsenemissionen. Die Zielstellungen waren eine nationale Beratung zu den jeweiligen Methodenentwürfen der entsprechenden UNECE-Gremien, der UNECE GRBP/GRPE TFTA für Reifenemissionen und der UNECE GRPE PMP IWG für Bremsenemissionen, sowie die Vorstellung und Diskussion der dem jeweiligen Thema zugehörigen Messkampagne aus diesem Forschungsvorhaben (s. Kapitel 3 und 4). Weiterhin wurde dem Kreis der Teilnehmenden die Möglichkeit gegeben, Impulsvorträge zu den jeweiligen Standpunkten und Meinungen zu halten, welche anschließend ebenfalls diskutiert wurden.

Zum Kreis der Teilnehmenden gehörten dabei Vertreterinnen*Vertreter aus Behörden, Verbänden, technischen Diensten sowie der Industrie und der Wissenschaft.

In diesen Fachgesprächen wurden relevante Aspekte und Fragen im Zusammenhang mit den jeweiligen Emissionsquellen umfassend behandelt und diskutiert. Ziel war es, ein tiefgehendes Verständnis für die spezifischen Herausforderungen und Möglichkeiten im Bereich der Reifen- bzw. Bremsenemissionen zu entwickeln und Expertenmeinungen sowie Fachkenntnisse zu diesem Thema zusammenzutragen. Diese Fachgespräche dienten als Plattform für den Austausch von Informationen, Erfahrungen und Meinungen zwischen allen involvierten Parteien sowie Fachleuten, um einen fundierten Einblick in die Thematik zu erhalten und mögliche Lösungsansätze zu erarbeiten.

► Nationales Fachgespräch zu Reifenemissionen

Das Fachgespräch zu Bremsenemissionen wurde am 13.11.2023 im virtuellen Rahmen durchgeführt. Die Agenda des Fachgesprächs ist der Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 16: Nationales Fachgespräch zu Reifenemissionen

Agenda

TOP

Begrüßung zum Fachgespräch

Vorstellung aller Teilnehmenden

Vorstellung des UBA-Forschungsprojektes an der TU Ilmenau

- Ergebnispräsentation der Messkampagne zu Reifenabrieb

Themenblock 1:

„Umweltauswirkungen von Reifenemissionen und technische Minderungsmaßnahmen an der Primärquelle“

- Impulsvortrag des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung GmbH (UFZ)
„Reifenabrieb in der Umwelt – Mehr Fragen als Antworten“
- Impulsvortrag des Deutschen Zentrums für Luft- & Raumfahrt e.V. (DLR)
„Erfahrungen bei der Charakterisierung von Reifenemissionen am Rollenprüfstand und auf der Straße“

TOP

Themenblock 2:

„Aktuelle Entwicklung der UNECE GRBP/GRPE TFTA Reifenverschleißmethode“

- Einführungspräsentation der TU Ilmenau
„Einführung zur Methode zur Reifenabriebbestimmung in realer Fahrumgebung“
- Impulsvortrag des Verbandes der Europäischen Automobilhersteller (ACEA)
„Beitrag zum nationalen Fachgespräch zu Reifenemissionen“

Themenblock 3:

„Sicht der Fahrzeug- und Reifenindustrie“

- Impulsvortrag des Wirtschaftsverbandes der deutschen Kautschukindustrie e.V. (wdk) & der ETRTO
„Design for a representative tyre abrasion rate on-vehicle test method“

Themenblock 4:

„Weiterentwicklung und Möglichkeiten zur Erweiterung einer Regulierung von Reifenemissionen“

- Impulsvortrag der AVL List GmbH
„From Tire Abrasion to Tire Emission“
- Impulsvortrag der ZF Friedrichshafen AG
„Reifenabriebprüfung im Labor“

Zusammenfassung des Fachgesprächs und Verabschiedung

► Nationales Fachgespräch zu Bremsenemissionen

Das Fachgespräch zu Bremsenemissionen wurde am 22.03.2023 im virtuellen Rahmen durchgeführt. Die Agenda des Fachgesprächs ist der Tabelle 17 zu entnehmen.

Tabelle 17: Nationales Fachgespräch zu Bremsenemissionen

Agenda

TOP

Begrüßung zum Fachgespräch

Vorstellung aller Teilnehmenden

Vorstellung des UBA-Forschungsprojektes an der TU Ilmenau

- Ergebnispräsentation der Messkampagne zu Bremsenabrieb

Einführungspräsentation des VDA e.V. für

Impulsvortrag der AUDI AG

„Regulation of Brake Particle Emissions“

Impulsvortrag des TÜV Verbandes e.V.

„Themen- und Fragenkomplexe der Technischen Dienste“

Impulsvortrag der Porsche AG

„Bremsenemissionen und Reifenabrieb – Eine Gegenüberstellung“

Offener Austausch zu den Themenkomplexen

- Weiterentwicklung der UN-GTR – offene Punkte
- Minderungspotentiale marktverfügbarer Technologien
- Bremsenemissionen als signifikante Größe der Partikelemissionen des Straßenverkehrs
- Messtechnische Herausforderungen im Rahmen der UN-GTR

Zusammenfassung des Fachgesprächs und Verabschiedung

Die Inhalte und die Diskussionsthemen sowie der Diskussionsverlauf wurden dokumentiert und dem Kreis der Teilnehmenden zur Verfügung gestellt.

5.1.2 Projektbesprechungen

Im Verlauf des Forschungsvorhabens wurden drei Projektbesprechungen im Rahmen von Vor-Ort-Terminen an der TU Ilmenau durchgeführt, in denen die zum Zeitpunkt der Termine aktuellen Fortschritte dem Auftraggeber vorgestellt wurden. An diesen Terminen haben seitens des Auftraggebers Vertreterinnen*Vertreter des Bundesministeriums für Umwelt, Verbraucherschutz und nukleare Sicherheit (BMUV) sowie des Umweltbundesamtes (UBA) teilgenommen.

Projektbesprechungen

- ▶ 1. Projektbesprechung (Kickoff-Meeting) im Februar 2021
- ▶ 2. Projektbesprechung im April 2022
- ▶ 3. Projektbesprechung im Juli 2023

Die in den Projektbesprechungen vorgestellten und diskutierten Inhalte wurden jeweils protokolliert und allen Teilnehmenden zur Verfügung gestellt.

Zudem wurden in einem regelmäßigen Turnus von zwei Wochen Rücksprachen zum Projekt gehalten, in denen aktuelle Inhalte diskutiert wurden.

5.2 Beratung von UBA/BMUV im Rahmen der Erarbeitung einer deutschen Position im Rahmen der weiteren Arbeiten im Verfahren der Methodenentwicklung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde an EU-weiten Gremiensitzungen der UNECE teilgenommen, um die Methodenentwicklung zur Messung und die Aktivitäten für eine daraus abgeleitete Regulierung von Reifen- und Bremsenemissionen zu verfolgen und aktiv mitzugestalten.

► Reifenemissionen

Hinsichtlich des Themenkomplexes der Reifenemissionen wurden, beginnend mit der Gründung der Task Force im April 2022, die Sitzungen der UNECE GRBP/GRPE TFTA begleitet, welche in einem regelmäßigen Turnus von ca. 4 Wochen abgehalten wurden. In diesem Gremium wurden im Zeitraum bis zum Stand dieses Berichts zunächst diverse Vorschläge etablierter Methoden unterschiedlicher Stakeholder, und anschließend mehrere Versionen des Entwurfs der Methodenentwicklung veröffentlicht, die jeweils inhaltlich analysiert und bewertet wurden. Dabei erkannter Überarbeitungsbedarf der jeweiligen Entwürfe wurde in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber gegenüber dem Gremium kommentiert bzw. innerhalb des Gremiums diskutiert. Die Analysen wurden dabei aus den Ergebnissen der Messkampagne (s. Abschnitt 3) gestützt.

Aus der Arbeit des Gremiums wurde zum Stand des Berichts, nach 18 abgehaltenen Sitzungen, ein vorläufiger Entwurf eines Anhangs für die UNECE R.117 abgeleitet, welcher dem übergeordneten Gremium, der GRBP, im Februar 2024 vorgestellt werden soll.

► Bremsenemissionen

Für den Themenkomplex der Bremsenemissionen wurden, da dieses Gremium seine Arbeit bereits vor dem Beginn dieses Forschungsvorhabens aufnahm, während der Projektlaufzeit Sitzungen der UNECE GRPE PMP IWG begleitet, welche in einem regelmäßigen Turnus von ca. 2-4 Wochen abgehalten wurden. In diesem Gremium wurden bis zum Stand dieses Berichts mehrere Versionen des Entwurfs der Methodenentwicklung veröffentlicht, die jeweils inhaltlich analysiert und bewertet wurden. Dabei erkannter Überarbeitungsbedarf der jeweiligen Entwürfe wurde in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber gegenüber dem Gremium kommentiert bzw. innerhalb des Gremiums diskutiert. Die Analysen wurden dabei aus den Ergebnissen der Messkampagne sowie der Teilnahme an einer Laborvergleichsstudie (s. Abschnitt 4) gestützt. Zudem wurden die Sitzungen der innerhalb des Gremiums gegründeten Task Forces 1-4 begleitet.

Aus der Arbeit des Gremiums wurde ein finaler Entwurf einer UN-GTR abgeleitet, welcher dem übergeordneten Gremium, der GRPE, im Januar 2023 im Rahmen der 87. Sitzung vorgestellt und von diesem angenommen wurde. Seitdem erfolgt eine konsequente Weiterentwicklung der Methode hins. einzelner Details, wie z.B. der Bestimmung der Verrechnungskoeffizienten für regenerative Bremssysteme.

In einem regelmäßigen Turnus von ca. 1-2 Wochen wurde der Auftraggeber über die jeweiligen Ergebnisse der begleiteten Gremiensitzungen zusammenfassend informiert und es wurden die vorgestellten Inhalte diskutiert. Weiterhin wurde der Auftraggeber über die Fortschritte der eigenen Messkampagnen informiert.

6 Quellenverzeichnis

- ADAC e. V. (2023). ADAC test: Summer tyres in the dimension 205/55 R16 91 V. ADAC e. V.
<https://wiki.unece.org/download/attachments/198673973/TA-12-05%20ADAC%20Summer%20Tyre%202023%20TO33115%20en-GB.pdf>
- Ardanón, R. (2022). Study on Tyres Abrasion Test Method: Durability Investigation. IDIADA.
https://wiki.unece.org/download/attachments/160694435/TA-01-05%2020220428%20Tyre%20Abrasion_TF.pdf
- Augsburg, K., Hesse, D., Feißel, T. & Wenzel, F. (2018, Mai). CFD based Analysis of Particle-Air Interaction within a Sampling Device for Brake Dust Emissions. Eurobrake 2018, Den Haag, Niederlande. EB2018-VDT-031
- Bachmann, Th. (1998). Wechselwirkungen im Prozeß der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. Zugl.: Darmstadt, Techn. Hochsch., Diss., 1998. Berichte aus dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt: Bd. 360. VDI-Verlag Düsseldorf 1998
- DEKRA Automobil GmbH. (2018). Die PTI – eine Erfolgsgeschichte. <https://www.dekra-roadsafety.com/de/die-pti-eine-erfolgsgeschichte/> (20.05.2025)
- ETRTO. (2022) Tyre Abrasion Rate test development. ETRTO.
https://wiki.unece.org/download/attachments/172851252/TA-03-03%20ETRTO-Abrasion-Test-for-GRBP-TFTA%202022_06_17.pdf
- EU-COM. (2022). Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Emissionen und der Dauerhaltbarkeit von Batterien (Euro 7) und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009. (Text von Bedeutung für den EWR). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52022PC0586>
- Farwick zum Hagen, F. H., Mathissen, M., Grabiec, T., Hennicke, T., Rettig, M., Grochowicz, J., Vogt, R. & Benter, T. (2019). On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions. *Atmospheric Environment*, 217, 116943. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116943>
- Feißel, T., Büchner, F., Kunze, M., Rost, J., Ivanov, V., Augsburg, K., Hesse, D. & Gramstat, S. (2022). Methodology for Virtual Prediction of Vehicle-Related Particle Emissions and Their Influence on Ambient PM10 in an Urban Environment. *Atmosphere*, 13(11), 1924. <https://doi.org/10.3390/atmos13111924>
- Feißel, T., Hesse, D., Augsburg, K. & Gramstat, S. (2020, Juli). Measurement of Vehicle Related Non-Exhaust Particle Emissions Under Real Driving Conditions. EuroBrake 2020, Barcelona, Spanien.
<https://doi.org/10.46720/eb2020-stp-039>
- Giechaskiel, B., Grigoratos, T., Dilara, P., Karageorgiou, T., Ntziachristos, L. & Samaras, Z. (2024). Light-Duty Vehicle Brake Emission Factors. *Atmosphere*, 15(1), 97. <https://doi.org/10.3390/atmos15010097>
- Giechaskiel, B., Melas, A., Martini, G., Dilara, P. & Ntziachristos, L. (2022). Revisiting Total Particle Number Measurements for Vehicle Exhaust Regulations. *Atmosphere*, 13(2), 155.
<https://doi.org/10.3390/atmos13020155>
- Grigoratos, T. (2022). Brake Particle Emissions: Interlaboratory Study - Background. Joint Research Centre.
<https://wiki.unece.org/download/attachments/161841417/PMP%20Item%202bi%20-%20ILS%20Introduction.pdf>
- Grigoratos, T. & Giechaskiel, B. (2022) Draft GTR – Proposed Way Forward. Joint Research Centre.
<https://wiki.unece.org/download/attachments/169017967/Draft%20GTR%20-%20Proposed%20way%20forward.pdf>

- Grigoratos, T., Mamakos, A., Arndt, M., Lugovyy, D., Anderson, R., Hafenmayer, C., Moisis, M., Vanhanen, J., Frazee, R., Agudelo, C. & Giechaskiel, B. (2023). Characterization of Particle Number Setups for Measuring Brake Particle Emissions and Comparison with Exhaust Setups. *Atmosphere*, 14(1), 103. <https://doi.org/10.3390/atmos14010103>
- Grigoratos, T. & Mamakos, A. (2022) Brake Particle Emissions – High Level Results on PM Data from the ILS. Joint Research Centre. <https://wiki.unece.org/download/attachments/161841417/PMP%20Item%20bv%20-%20PM%20overview%20ILS.pdf>
- Grigoratos, T. & Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: a review. *Environmental science and pollution research international*, 22(4), 2491–2504. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>
- Hesse, D. & Augsburg, K. (2019). Real Driving Emissions Measurement of Brake Dust Particles. *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/2019-01-2138>
- Hesse, D., Augsburg, K., Feißel, T., & Sommer J. (2019, Mai). Real driving emissions measurement of brake dust particles. Eurobrake 2019 Dresden, Deutschland. EB2019-FBR-017
- Hesse, D., Feißel, T., Kunze, M., Bachmann, E., Bachmann, T. & Gramstat, S. (2022). Comparison of Methods for Sampling Particulate Emissions from Tires under Different Test Environments. *Atmosphere*, 13(8), 1262. <https://doi.org/10.3390/atmos13081262>
- Huber, M. P., Fischer, P., Mamakos, A., Steiner, G. & Klug, A. (2022). Measuring Brake Wear Particles with a Real-Driving Emissions Sampling System on a Brake Dynamometer. *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/2022-01-1180>
- Kraftfahrt-Bundesamt. (o. J.). Typgenehmigungserteilung. https://www.kba.de/DE/Themen/Typgenehmigung/Typgenehmigungserteilung/typgenehmigungserteilung_node.html (20.05.2025)
- Kraftfahrt-Bundesamt. (o. J.). Was ist Marktüberwachung? https://www.kba.de/DE/Themen/Marktueberwachung/Allgemein/marktueberwachung_allgemein_node.html (20.05.2025)
- Kunze, M., Feißel, T., Ivanov, V., Bachmann, T., Hesse, D. & Gramstat, S. (2022). Analysis of TRWP Particle Distribution in Urban and Suburban Landscapes, Connecting Real Road Measurements with Particle Distribution Simulation. *Atmosphere*, 13(8), 1204. <https://doi.org/10.3390/atmos13081204>
- Leister, G. (2015). Fahrzeugräder - Fahrzeugsreifen. (2. Auflage). Springer Vieweg Wiesbaden.
- Mamakos, A. (2022). Time-Based Files - PN emissions analysis. AVL List GmbH. <https://wiki.unece.org/download/attachments/161841417/PMP%20Item%20biii%20-%20Time%20Based%20Files%20-%20High%20Level%20Analysis.pdf?api=v2>
- Mathissen, M., Grochowicz, J., Schmidt, C., Vogt, R., Zum Farwick Hagen, F., Grabiec, T., Steven, H. & Grigoratos, T. (2018). WLTP-based Real-World Brake Wear Cycle. (V1) [Dataset]. Mendeley Data. <https://doi.org/10.17632/DKP376G3M8.1>
- OECD. (2020). Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge. <https://doi.org/10.1787/4a4dc6ca-en>
- Porsche AG. (2017). Hart wie Diamant. <https://newsroom.porsche.com/de/christophorus/porsche-cayenne-turbo-surface-coated-brake-pscb-bremse-matthias-leber-weissach-14299.html> (20.05.2025)
- Rexeis, M. & Hausberger, S. (2009). Trend of vehicle emission levels until 2020 – Prognosis based on current vehicle measurements and future emission legislation. *Atmospheric Environment*, 43(31), 4689–4698. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.034>

- Ricciardi, V., Schiele, M., Hesse, D., Hauschild, P. & Augsburg, K. (2020, Juli). Artificial Neural Network Regression Models for the Prediction of Brake-related Emissions. EuroBrake 2020, Barcelona, Spanien. <https://doi.org/10.46720/eb2020-stp-050>
- Sartorius AG. (o. J.). Cubis Manual Mass Comparator. <https://shop.sartorius.com/de/p/cubis-manual-mass-comparator/MCM40K3> (20.05.2025)
- Silvestro, D. (2022). ADAC Tyre test: Tyre abrasion - On road tests. ADAC e. V. https://wiki.unece.org/download/attachments/166724916/TA-02-02%20Study_ADAC_tyre_abrasion_110522_en-GB.pdf
- Storch, L., Hamatschek, C., Hesse, D., Feist, F., Bachmann, T., Eichler, P., & Grigoratos, T. (2023). Comprehensive Analysis of Current Primary Measures to Mitigate Brake Wear Particle Emissions from Light-Duty Vehicles. *Atmosphere*, 14(4), 712. <https://doi.org/10.3390/atmos14040712>
- Umweltbundesamt (2025). Detaillierte Inventartabellen 1990-2023 [Dataset]. EEA Eionet CDR. <https://cdr.eionet.europa.eu/de/un/clrtap/inventories/envz68jiq>
- UNECE (o.J.). WP.29 – Introduction. <https://unece.org/wp29-introduction> (20.05.2025)
- UNECE (21. Juni 2023). UN Global Technical Regulation No. 24: Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles (UN GTR ECE/TRANS/180/Add.24). <https://unece.org/sites/default/files/2025-01/ECE-TRANS-180-Add.24e.pdf>
- UNECE PMP. (2020). Non-Exhaust Brake Emissions - Laboratory testing - Part 1: Inertia Dynamometer Protocol to Measure and Characterise Brake Emissions Using the WLTP-Brake Cycle. UNECE. <https://unece.org/DAM/trans/doc/2020/wp29grpe/GRPE-81-12e.pdf>
- UNECE PMP. (2023). (PMP) Final Status Report for the development of the UN GTR on brake particulate emissions. UNECE. <https://unece.org/sites/default/files/2023-01/GRPE-87-41e.pdf>
- UNECE PMP TF2. (2021). Minimum Specifications for Measuring and Characterizing Brake Emissions. <https://wiki.unece.org/download/attachments/128421335/PMP%20Brake%20Protocol%20-%20Testing%20Specifications.pdf>
- UNECE GRBP/GRPE TFTA. (2023). (TFTA) Proposal for Supplement 02 to the 04 series of amendments to UN Regulation No. 117 (Tyre rolling resistance, rolling noise and wet grip). UNECE. <https://unece.org/sites/default/files/2024-11/ECE-TRANS-WP29-GRBP-2024-10e.pdf>
- Verordnung (EG) 715/2007. Verordnung (EG) 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, Amtsblatt der Europäischen Kommission (2007 & i.d.F.v. 01.09.2020). <http://data.europa.eu/eli/reg/2007/715/oj2023/851>
- Verordnung (EU) 2016/427. Verordnung (EU) 2016/427 der Kommission vom 10. März 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6) (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Kommission (2016). <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/427/oj>
- Verordnung (EU) 2019/1020. Verordnung (EU) 2020/740 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 über Marktüberwachung und die Konformität von Produkten sowie zur Änderung der Richtlinie 2004/42/EG und der Verordnungen (EG) Nr. 765/2008 und (EU) Nr. 305/2011 (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Kommission (2019). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1020/oj>

Verordnung (EU) 2020/740. Verordnung (EU) 2020/740 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 2020 über die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz und andere Parameter, zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/1369 und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1222/2009 (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Kommission (2020).

<http://data.europa.eu/eli/reg/2020/740/oj>

Verordnung (EU) 2023/851. Verordnung (EU) 2023/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Kommission (2023). <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/851/oj>

WHO. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.

<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>