



Projektbericht: “Realrive ISO-TRWP“

Autor: Prof. Dr.-Ing. Danilo Engelmann Version
und Datum: 31.12.2025 | Version 1.0b

Inhaltsverzeichnis

Abstract:	3
1 Motivation des Forschungsprojekts ISO-TRWP	4
1.1 Stand der Forschung zum Thema TRWP	5
2 Versuchsfahrzeug und Messinfrastruktur	5
2.1 Reifen-Messfahrzeug MoReLab	5
2.2 Messtechnische Randbedingungen	7
2.2.1 Isokinetisch Probenentnahme	7
2.3 Teststrecke und Versuchsdurchführung	9
2.3.1 Variierte Testparameter	10
3 Versuchsergebnisse	11
4 Zusammenfassung	14
5 Ausblick	15
6 Literatur und Quellen	16
7 Abkürzungsverzeichnis	16
8 Abbildungsverzeichnis	16
9 Tabellenverzeichnis	17

Abstract:

Deutsch:

Im Projekt ISO-TRWP wurden Reifen-/Strassenabriebpartikel (TRWP) unter realen Strassenbedingungen und zugleich fahrdynamisch kontrolliert untersucht. Hierzu kam das speziell entwickelte Reifen-Messfahrzeug MoReLab mit isokinetischer Nahfeld-Probenahme zum Einsatz, um trägheitsbedingte Verzerrungen der Grössenverteilungen zu minimieren und die Vergleichbarkeit über unterschiedliche Fahrzustände sicherzustellen. Die Fahrten auf der Strecke Biel-Pieterlen bei 40 km/h auf trockener Oberfläche (SRT > 65) erfassten die grössenaufgelöste Partikelanzahlkonzentration im Bereich 0,018–18 µm, während Schlupf, Schräglaufwinkel (0°/2°/4°), Radlast (3 000/4 000 N) und Reifenluftdruck (1,5/2,5/3,5 bar) variiert wurden. Es wurde gezeigt, dass erhöhte Scherbeanspruchungen insbesondere durch Schlupf und Schräglaufwinkel die Gesamtanzahlkonzentration deutlich steigern und den Anteil feiner Partikel erhöhen, wohingegen die Variation von Radlast und Reifenluftdruck im betrachteten Fenster keine signifikanten Änderungen der Verteilungsform oder des Konzentrationsniveaus bewirkt. Unter konstant hohem Schlupf wurden eine kontinuierliche Reifenerwärmung und gleichzeitig ein abnehmender Emissionstrend über die Zeit beobachtet; ein lokaler Peak (≈ 80 s) wird Fahrbahnverunreinigungen zugeschrieben. Insgesamt ergibt sich die Sensitivitätsordnung Schlupf/Schräglaufwinkel > Radlast ≈ Reifendruck. Das MoReLab-Konzept bildet damit eine belastbare Brücke zwischen Laboruntersuchungen und On-Road-Messungen und schafft eine Grundlage für die Standardisierung und Modellierung der TRWP-Entstehung.

Français:

Dans le cadre du projet ISO-TRWP, les particules d'usure pneu-chaussée (TRWP) ont été étudiées sous des conditions routières réelles tout en restant contrôlées du point de vue de la dynamique du véhicule. Pour cela, le véhicule de mesure de pneu MoReLab, spécialement développé, a été utilisé avec un prélèvement isocinétique au voisinage du pneu, afin de minimiser les distorsions liées à l'inertie dans les distributions de taille et d'assurer la comparabilité entre différents états de conduite. Les essais réalisés sur le tronçon Biel-Pieterlen à 40 km/h, sur chaussée sèche (SRT > 65), ont mesuré la concentration numérique de particules en fonction de la taille dans la plage 0,018–18 µm, tandis que le glissement longitudinal, l'angle de dérive (0°/2°/4°), la charge à la roue (3 000/4 000 N) et la pression des pneus (1,5/2,5/3,5 bar) étaient variés. Il a été montré que des sollicitations de cisaillement accrues – en particulier via le glissement et l'angle de dérive – augmentent nettement la concentration totale en nombre et la part de particules fines, alors que la variation de la charge à la roue et de la pression des pneus, dans la fenêtre considérée, n'entraîne pas de modification significative de la forme des distributions ni du niveau de concentration. À glissement élevé maintenu constant, un échauffement continu du pneu a été observé conjointement à une tendance décroissante des émissions au cours du temps; un pic local (≈ 80 s) est attribué à des impuretés de la chaussée. Il en résulte un ordre de sensibilité glissement/angle de dérive > charge à la roue ≈ pression des pneus. Le concept MoReLab constitue ainsi un pont robuste entre essais de laboratoire et mesures sur route et fournit une base pour la normalisation et la modélisation de la formation des TRWP.

English :

Within the ISO-TRWP project, tire-road wear particles (TRWP) were investigated under real-world road conditions while maintaining controlled vehicle dynamics. A purpose-built tire measurement vehicle (MoReLab) with isokinetic near-tire sampling was employed to minimize inertia-related distortions in size distributions and to ensure comparability across driving states. Tests on the Biel-Pieterlen section at 40 km/h on a dry surface (SRT > 65) captured the size-resolved particle number concentration in the 0.018–18 µm range, while longitudinal slip, slip (yaw) angle (0°/2°/4°), wheel load (3,000/4,000 N), and tire pressure (1.5/2.5/3.5 bar) were varied. Increased shear loading—especially through slip and slip angle—was shown to markedly raise the total number concentration and the share of fine particles, whereas changes in wheel load and tire pressure within the investigated windows did not produce significant shifts in distribution shape or concentration level. Under constant high slip, a continuous tire warming was observed alongside a decreasing emission trend over time; a local peak (≈ 80 s) is attributed to road surface contamination. Overall, the sensitivity ordering emerges as slip/slip angle > wheel load ≈ tire pressure. The MoReLab concept thus forms a robust bridge between laboratory and on-road measurements and establishes a basis for standardization and modeling of TRWP formation.

1 Motivation des Forschungsprojekts ISO-TRWP

Nicht-auspuffbedingte Emissionen (Non-Exhaust Emissions) gewinnen im Zuge der Elektrifizierung des Strassenverkehrs zunehmend an Bedeutung. Insbesondere Tire and Road Wear Particles (TRWP) stellen heute eine der dominierenden Quellen verkehrsbedingter partikulärer Emissionen dar. TRWP entstehen durch den mechanischen Abrieb von Reifen im Kontakt mit der Fahrbahn und bestehen aus einer komplexen Mischung aus Reifenmaterial, Strassenabrieb und umweltrelevanten Additiven.

Neben der messtechnischen Erfassung von TRWP ist auch die Reifenentwicklung ein zentraler Hebel zur Reduktion nicht-auspuffbedingter Partikelemissionen. Reifen können grundsätzlich hinsichtlich ihres Abriebverhaltens und der daraus resultierenden Partikelemissionen optimiert werden. Diese Optimierung darf jedoch unter keinen Umständen zu Einschränkungen der Fahrsicherheit führen. Sicherheitsrelevante Eigenschaften wie Bremsweg, Spurhaltevermögen, Fahrstabilität und Nasshaftung besitzen oberste Priorität und stellen unverrückbare Randbedingungen dar. Eine fundierte Reduktion von TRWP erfordert daher ein tiefes physikalisches Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Reifenmaterial, Fahrbahn, Fahrzustand und Partikelentstehung, um Zielkonflikte zwischen Emissionsminderung und Verkehrssicherheit systematisch zu vermeiden.

Trotz der quantitativen Relevanz von TRWP-Emissionen bestehen nach wie vor erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der repräsentativen Erfassung, Quantifizierung und Charakterisierung dieser Partikel unter realitätsnahen Fahrbedingungen.

Ein zentrales methodisches Problem bisheriger Messansätze liegt in der Partikelentnahme im unmittelbaren Reifen-Fahrbahn-Kontaktbereich. Viele existierende Konzepte basieren auf Messfahrzeugen in konventioneller PW-Bauweise oder auf stationären Laboraufbauten. Diese Ansätze sind entweder nur eingeschränkt realitätsnah oder erlauben keine saubere Trennung und gezielte Variation fahrdynamischer Einflussgrössen wie Radlast, Schlupf, Geschwindigkeit oder Beschleunigung.

Der innovative Ansatz von ISO-TRWP besteht in der Partikelabsaugung an einem speziell entwickelten Reifen-Testfahrzeug, anstelle einer Integration in ein konventionelles PW-Messfahrzeug. Dieser Aufbau ermöglicht es, fahrdynamische Parameter gezielt und weitgehend unabhängig voneinander zu kontrollieren, ohne den Charakter der Messung als reale Strassenmessung aufzugeben. Damit schliesst das Projekt die Lücke zwischen hochkontrollierten Laboruntersuchungen und wenig kontrollierbaren Realfahrmessungen. Gleichzeitig erlaubt das Konzept eine systematische Untersuchung der Einflüsse von Fahrzustand, Reifen- und Strassenparametern auf die Entstehung und Freisetzung von TRWP.

Zu den zentralen Herausforderungen, die im Rahmen des Projekts adressiert werden, zählen:

Die Entwicklung einer robusten und praxistauglichen ISO-kinetischen Entnahmeeinheit im hochdynamischen Strömungsfeld nahe dem Reifen, die Sicherstellung der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messungen unter variablen Fahrbedingungen, die Reduktion systematischer Messartefakte bei der Erfassung von TRWP-Partikeln, sowie die Schaffung einer methodischen Grundlage im Bereich der TRWP-Messung.

Das Projekt «ISO-TRWP» wird in enger Zusammenarbeit zwischen der Berner Fachhochschule (BFH), der PALAS AG (Karlsruhe) als ausgewiesenem Experten für aerosolmesstechnische Systeme sowie dem Bundesamt für Umwelt (BAFU, Schweiz) als Fördergeber durchgeführt.

1.1 Stand der Forschung zum Thema TRWP

Aktuelle Forschungsarbeiten zur Emission von Tire and Road Wear Particles (TRWP) zeigen, dass on-road-Messungen mit instrumentierten Fahrzeugen grundsätzlich geeignet sind, reale Emissionsbedingungen abzubilden.

In mehreren Studien werden Partikel während realer Fahrten auf öffentlichen Strassen gesammelt und anschliessend mittels chemischer Marker (z. B. Py-GC-MS) oder gravimetrischer Verfahren analysiert. Die Stärke dieser Ansätze liegt in ihrer hohen Realitätsnähe, da reale Verkehrsbedingungen, Strassenoberflächen und Umwelteinflüsse berücksichtigt werden, z.B. [1],[2].

Allerdings zeigt ein systematischer Vergleich der Literatur, dass der Schwerpunkt der bisherigen Arbeiten überwiegend auf der Partikelmesstechnik liegt, während die fahrdynamischen Einflussgrössen nur eingeschränkt oder rein deskriptiv erfasst werden. Parameter wie Geschwindigkeit, mittlere Beschleunigung oder Strassenkategorie werden häufig dokumentiert, jedoch selten in ein physikalisch oder statistisch fundiertes Modell der TRWP-Entstehung überführt [1], [4].

Insbesondere relevante fahrdynamische Regime – etwa definierte Schlupfzustände, kombinierte Längs- und Querkräfte, Brems- vs. Antriebsbetrieb oder transienter Fahrzustände – werden in den meisten Studien nicht gezielt variiert oder unabhängig kontrolliert. Damit bleibt unklar, in welchem Masse beobachtete Emissionsunterschiede auf Reifenmechanik, Kontaktzustände oder Resuspensionseffekte zurückzuführen sind. Eine explizite Regime-Analyse, wie sie aus der Reifentechnik oder Fahrdynamik bekannt ist, fehlt bislang weitgehend.

Deutsche und österreichische Forschungsprojekte (z. B. TU Braunschweig/Continental) erweitern zwar die on-road-Messansätze durch verbesserte Nähe zur Emissionsquelle und zusätzliche Sensorik, jedoch zeigen auch diese Arbeiten bislang keine systematische Kopplung zwischen gemessenen Partikelemissionen und klar definierten fahrdynamischen Lastfällen [3]. Die fahrdynamischen Daten dienen primär der Kontextualisierung, nicht der modellbasierten Analyse.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die zentrale Forschungslücke weniger in der Partikelerfassung selbst liegt, sondern in der fehlenden kontrollierten Erfassung und Modellierung fahrdynamischer Einflussgrössen. Für eine belastbare Quantifizierung der TRWP-Entstehung unter realen Bedingungen sind Messkonzepte erforderlich, die es erlauben, definierte fahrdynamische Regime reproduzierbar einzustellen, ohne den Charakter realer Strassenmessungen zu verlieren. Diese Lücke adressieren neuartige Ansätze mit spezialisierten Messfahrzeugen und kontrollierbaren Reifenlastzuständen.

2 Versuchsfahrzeug und Messinfrastruktur

Zur Untersuchung von Tire and Road Wear Particles (TRWP) unter realitätsnahen und gleichzeitig kontrollierbaren Bedingungen wurde im Projekt ISO-TRWP ein speziell konzipiertes Reifen-Messfahrzeug eingesetzt. Ziel war es, die Entstehung und Freisetzung von TRWP im unmittelbaren Reifen-Fahrbahn-Kontaktbereich zu erfassen und dabei die Einschränkungen konventioneller PKW-basierter Messansätze zu überwinden. Die eingesetzte Messinfrastruktur bildet die Grundlage für eine reproduzierbare und methodisch belastbare Untersuchung nicht-auspuffbedingter Partikelemissionen im realen Strassenbetrieb.

2.1 Reifen-Messfahrzeug MoReLab

Das im Projekt eingesetzte Messfahrzeug MoReLab (Mobiles Reifenlabor) wurde speziell für die Untersuchung der fahrdynamischen Parameter des Reifens und deren Verhalten entwickelt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Fahrzeugen in PKW-Bauweise erlaubt MoReLab eine gezielte und weitgehend unabhängige Variation wesentlicher fahrdynamischer Parameter wie Geschwindigkeit, Radlast und Lenkwinkel. Dabei erfasst das MoReLab die am untersuchten Rad auftretenden Kräfte und

Momente in allen drei Raumrichtungen. Diese Messgrößen ermöglichen eine detaillierte Charakterisierung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts und dienen gleichzeitig zur eindeutigen Zuordnung der gemessenen Partikelemissionen zu definierten mechanischen Belastungszuständen des Reifens. Der Antrieb des zu untersuchenden Reifens erfolgt hydraulisch, wodurch beliebige Schlupfzustände gezielt und reproduzierbar eingestellt werden können. Auf diese Weise lassen sich sowohl Antriebs- als auch Verzögerungssituationen unabhängig vom restlichen Fahrzeugantrieb realisieren. Die hydraulische Regelung erlaubt eine präzise Vorgabe des longitudinalen Schlupfs über einen breiten Betriebsbereich hinweg. Gleiche Möglichkeiten ergeben sich für den Schräglaufwinkel und die Achslast des Reifens, beide lassen sich auf vorgegebene Werte regeln und halten. Die erfassten/regulierbaren fahrdynamischen Parameter des Reifens am MoReLab sind in Tabelle 1 aufgeführt:

Tabelle 1 : Aufgezeichnete fahrdynamische Parameter und Messwerte des MoReLabs

Kategorie	Fahrdynamischer Parameter	Beschreibung
Radkräfte	Longitudinalkraft F_x	Kraft in Fahrtrichtung (Antrieb / Verzögerung)
	Querkraft F_y	Kraft quer zur Fahrtrichtung (Kurvenfahrt)
	Normalkraft F_z	Radlast am Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn
Radmomente	Rollmoment M_x	Moment um die Längsachse
	Nickmoment M_y	Moment um die Querachse
	Giermoment M_z	Moment um die Hochachse
Schlupfzustände	Longitudinalschlupf s_x	Frei einstellbarer Schlupf im Antriebs- und Bremsbetrieb
	Kombinierter Schlupf	Überlagerung von Längs- und Querkraften
Antrieb / Verzögerung	Antriebsmoment	Hydraulisch erzeugtes Drehmoment am Messrad
	Verzögerungsmoment	Hydraulisch eingeregelttes Bremsmoment ohne mechanische Bremse
Bewegungszustände	Fahrgeschwindigkeit	Reale Fahrgeschwindigkeiten auf öffentlicher Strasse
	Beschleunigung / Verzögerung	Transiente Längsdynamik
	Querbeschleunigung	Fahrzustände mit Kurvenfahrt
Lastvariation	Radlastvariation	Einstell- und erfassbare Änderungen der Normalkraft
Betriebsregime	Stationäre Fahrzustände	Konstante Geschwindigkeit und konstante Schlupfzustände
	Transiente Fahrzustände	Lastwechsel, Schlupfänderungen, Beschleunigungsphasen
Temperatur	Reifentemperatur	Die Temperatur der Reifenlauffläche wird an drei Stellen gemessen

Zu erwähnen ist, dass für den simulierten Bremsfall die Schlupfeinstellung ausschliesslich über das hydraulische System selbst erfolgt. Dadurch kann auf eine Verzögerung durch mechanische Bremscheiben verzichtet werden. Diese Vorgehensweise ist insbesondere für TRWP-Untersuchungen von zentraler Bedeutung, da so die Entstehung von Bremsabriebpartikeln ausgeschlossen werden kann und eine klare Abgrenzung der gemessenen Partikelemissionen auf reinen Reifen- und Strassenabrieb gewährleistet ist.

Die offene und modulare Fahrzeugarchitektur von MoReLab ermöglicht die flexible Integration einer Absaugungs- und unterschiedlicher Messtechniksysteme im unmittelbaren Umfeld des untersuchten Reifens. Insbesondere die Positionierung der Absaugung nahe am Reifen-Fahrbahn-Kontaktbereich ist entscheidend, um die lokal freigesetzten Partikel möglichst unbeeinflusst zu erfassen. Gleichzeitig erlaubt das Fahrzeugkonzept eine klare Abgrenzung zwischen Reifenemissionen und möglichen Störeinflüssen aus anderen Fahrzeugquellen.

Somit soll eine vorteilhaftere Situation gegenüber einem konventionellen Aufbau mit Pkw-Fahrzeug geschaffen werden, um die fahrdynamischen Einflussparameter am Reifen zu identifizieren und sie mit der Abreissituation von Reifen und Strasse in Verbindung zu bringen.



Abbildung 1 : Versuchsbereites MoReLab-Fahrzeug mit eingebauter Prototypen-Partikelabsaugung

2.2 Messtechnische Randbedingungen

Die Erfassung von TRWP im Nahfeld des Reifens ist mit stark inhomogenen und hochdynamischen Strömungsverhältnissen verbunden. In diesem Bereich überlagern sich die fahrzeuginduzierte Anströmung, durch die Reifenrotation erzeugte Geschwindigkeitsanteile sowie lokale Einflüsse der Fahrbahn. Dadurch entstehen räumlich und zeitlich variierende Strömungsfelder mit ausgeprägten Gradienten der Geschwindigkeit und Turbulenz, vgl. Abbildung 2.

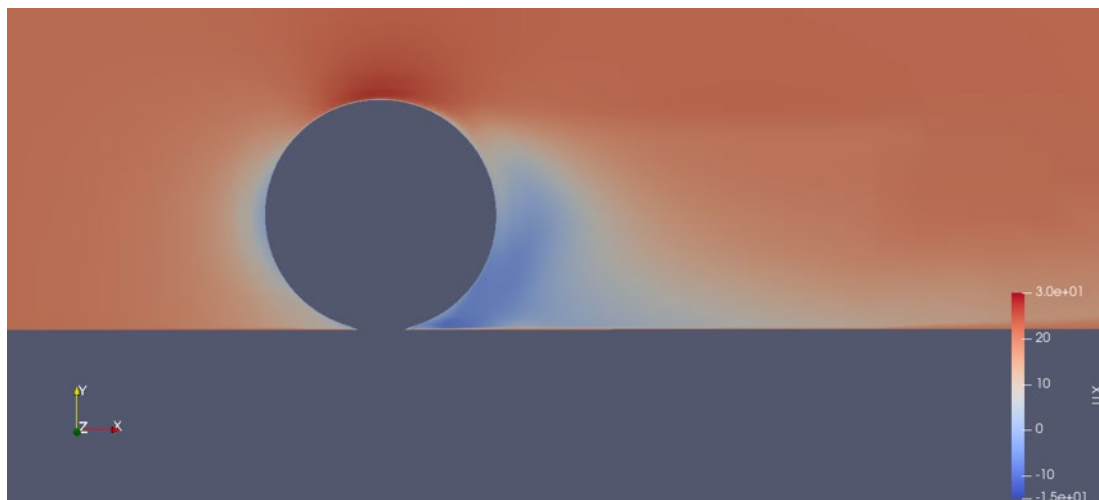


Abbildung 2 : Vereinfachte CFD-Studie zur Abschätzung des Strömungsnachlaufs am Reifen

Vor diesem Hintergrund werden wir im weiteren Vorgehen eine möglichst isokinetische Absaugung realisieren. Ziel ist es, die Eintrittsgeschwindigkeit an der Probenahmeöffnung so einzustellen, dass sie der für den Messort relevanten lokalen Strömungsgeschwindigkeit im Reifen-Nahfeld entspricht. Durch diese Annäherung an isokinetische Bedingungen sollen trägheitsbedingte Effekte bei der Partikelentnahme, insbesondere für grössere TRW-Partikeln, minimiert und eine möglichst repräsentative Erfassung der freigesetzten Partikel erreicht werden.

2.2.1 Isokinetisch Probenentnahme

Die Einstellung der Isokinetik erfolgt dabei in Abhängigkeit von der Reisegeschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs, indem der Absaugvolumenstrom entsprechend geregelt wird: Für eine gegebene Querschnittsfläche der Probenahmeöffnung wird der Volumenstrom so gewählt, dass die resultierende Eintrittsgeschwindigkeit die Zielgeschwindigkeit (abgeleitet aus der Fahrtgeschwindigkeit bzw. der

charakteristischen Strömungsgeschwindigkeit im Messbereich am Reifen) abbildet.

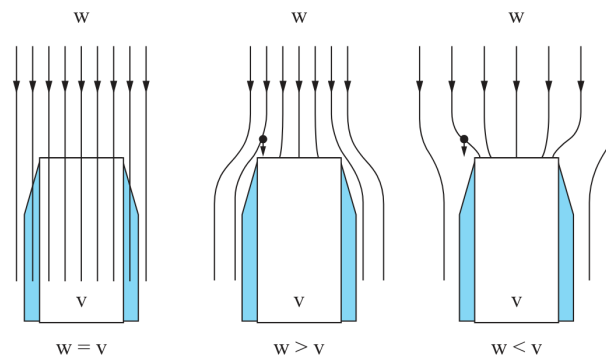


Abbildung 3 : Schamtische Darstellung für isokinetischer, sowie unter- und über-isokinetische Probenahme [5]

Bei isokinetischer Probenahme ($w = v$), gleiche Geschwindigkeit der Partikel w und Absauggeschwindigkeit v , werden alle Partikel im Öffnungsquerschnitt erfasst, vgl. Abbildung 3. Bei unterisokinetischer Entnahme ($w > v$) gelangen träge Partikel in die Probenentnahme, obwohl ihre Stromlinien vorbeiführen würden, was zu einer Überrepräsentation grosser Partikel führt. Bei überisokinetischer Entnahme ($w < v$) folgen grosse Partikel den Stromlinien nicht und werden unterrepräsentiert. Auf diese Weise wird eine vergleichbare Probenahme über unterschiedliche Fahrzustände hinweg ermöglicht, während gleichzeitig Rückwirkungen des Absaugaufbaus auf das lokale Strömungsfeld so gering wie möglich gehalten werden.

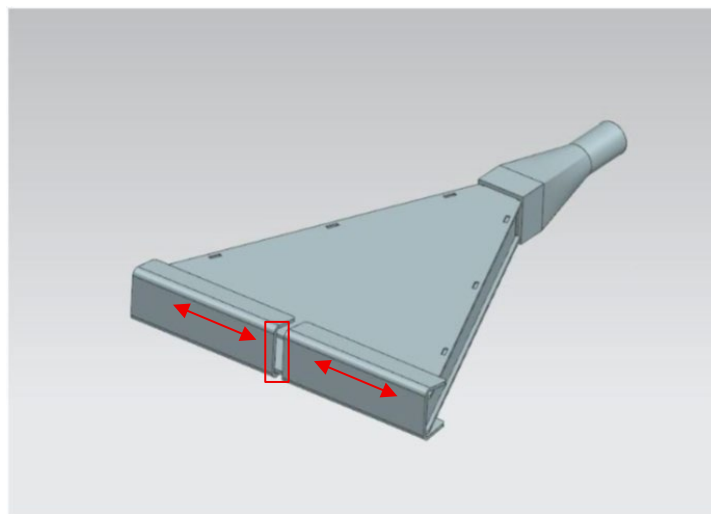


Abbildung 4 :Konzept der Absaugung mit einstellbarer variabler Querschnittsfläche (rote Markierung) der Probenentnahme über Blenden

Die realisierte Probenentnahme erfolgt am MoReLab über einen Trichter im Reifennachlauf (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 5), der mittels variabler Blenden eine einstellbare Querschnittsfläche freigibt (siehe Abbildung 4). Diese Blenden ermöglichen sowohl einen zentrischen als auch einen exzentrischen Querschnitt einzusteleln. Durch ihre Positionierung lassen sie eine flexible horizontale Anordnung der Ansaugöffnung im Strömungsfeld des Reifennachlaufs zu. Die vertikale Position sowie der Abstand zum Reifen werden über die Positionierung der Befestigungshebel (vgl. Abbildung 5) der Absaugung eingestellt. Die Ansaugquerschnitt kann so variabel positioniert werden, dass unterschiedliche Öffnungsquerschnitte realisiert werden können. Dadurch ist es möglich, verschiedene Bereiche des Nachlaufs gezielt zu untersuchen, um eine repräsentative Probenahme sicherzustellen.



Abbildung 5 : Aufbau der Probenentnahme am MoReLab

Für die Partikelmessungen im MoReLab wurden die optischen Aerosolspektrometer PROMO LED 2000 und PROMO LED 2300 der Firma PALAS eingesetzt. Das PROMO LED 2000 analysiert Partikelgrößen im Bereich von 0,145–100 µm bei Konzentrationen von < 1 bis 10⁶ Partikeln/cm³. Das Gerät arbeitet mit einem Volumenstrom von 5 l/min und bietet Echtzeitdaten mit 1 s-Auflösung. Seine LED-Lichtquelle und T-Apertur gewährleisten eine hohe Klassiergenauigkeit sowie eine niedrige Koinzidenzrate. Das PROMO LED 2300 deckt den gleichen Größenbereich (0,145–100 µm) ab, misst jedoch bis zu 20.000 Partikeln/cm³. Beide Geräte wurden im Rahmen der Untersuchungen getestet, um Erfahrungen mit unterschiedlichen Messbereichen und Betriebsparametern zu sammeln. Das Ziel dieses Prozesses ist die Beobachtung und Analyse der verschiedenen Partikelgrößenverteilungen und Konzentrationsbereiche. Dies ermöglicht eine umfassende Charakterisierung der Partikel im Nachlauf. Die Kombination Versuchsfahrzeug mit kontrollierten fahrdynamischen Parametern und klar definierten messtechnischen Randbedingungen bildet die Grundlage für die im Projekt durchgeführten Vergleichsuntersuchungen und die Bewertung der entwickelten Absaugungskonzepts.

2.3 Teststrecke und Versuchsdurchführung

Die Fahrversuche wurden auf einer ländlichen Teststrecke zwischen Biel und Pieterlen (47°10'07.2"N 7°18'26.3"E) durchgeführt, die eine Länge von 1,6 km und einen Höhenunterschied von etwa 4 m aufweist und ist in Abbildung 6 dargestellt.

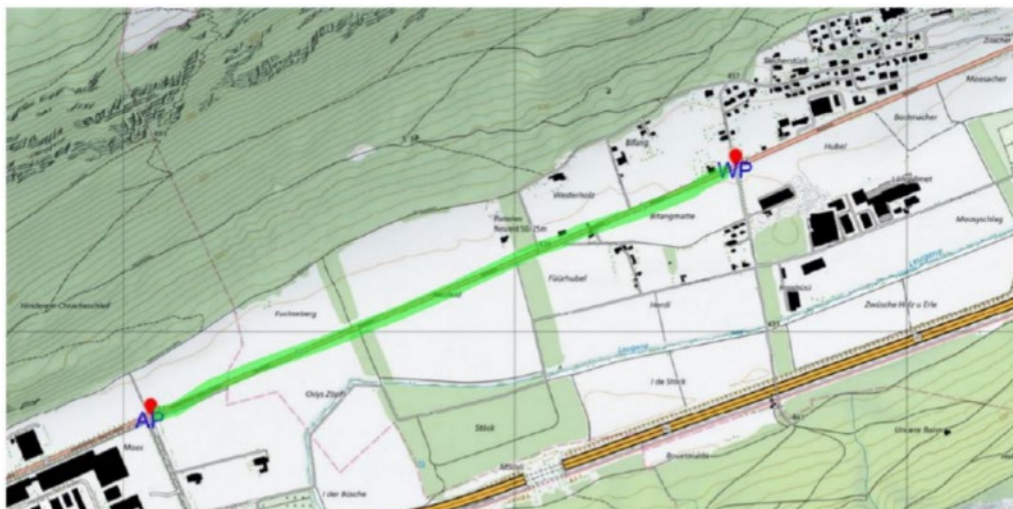


Abbildung 6 : Teststrecke zwischen Biel und Pieterlen

Zur Referenz wurden Zero-Messungen sowohl mit als auch ohne Bodenkontakt des Rades durchgeführt, um den Einfluss des Reifens auf die Partikelemissionen zu isolieren. Die Versuche erfolgten bei konstanter Geschwindigkeit von 40 km/h, was dem durchschnittlichen Fahrtempo auf Schweizer Strassen entspricht. Die Fahrt erfolgte jeweils vom Startpunkt (AP) bis zum Wendepunkt (WP) und dann wieder zurück zum Startpunkt (AP), vgl. Abbildung 6.

Vor jeder Testfahrt wurde der Reibwert der Fahrbahn mit einem SRT-Pendel ermittelt, ein sogenannter Skid Resistance Tester, ein standardisiertes Prüfgerät zur Bestimmung der Griffigkeit bzw. Reibungszahl von Strassenoberflächen. Die Messungen erfolgten an drei definierten Punkten der Teststrecke: am Anfang, in der Mitte und am Ende. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass mögliche Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit entlang der Strecke berücksichtigt werden können.

2.3.1 Variierte Testparameter

Im Rahmen der Fahrversuche wurden drei zentrale Einflussgrössen systematisch variiert, um deren Wirkung auf die Partikelemissionen zu untersuchen:

Schräglaufwinkel:

Der Schräglaufwinkel beschreibt die Abweichung der Reifenlaufrichtung von der tatsächlichen Fahrtrichtung. Er beeinflusst die seitliche Kraftübertragung und damit die mechanische Beanspruchung des Reifens. Variierte Werte: 0°, 2°, 4°.

Längsschlupf:

Im Rahmen der Fahrversuche wurde der Schlupf systematisch variiert. Die Spannweite reichte von nahezu 0% Schlupf, was im Bereich der Rollreibung liegt (vollständige Haftung ohne nennenswerte Relativbewegung zwischen Reifen und Fahrbahn), bis hin zum Haftbeiwert des jeweiligen Reifens, also dem Grenzbereich, in dem die maximale Haftreibung erreicht wird, bevor Gleitreibung einsetzt.

Radlast:

Die Radlast bestimmt den Anpressdruck des Reifens auf die Fahrbahn und wirkt sich direkt auf den Abrieb und die Partikelbildung aus. Variierte Werte: 3000 N, 4000 N.

Reifendruck:

Der Reifendruck beeinflusst die Kontaktfläche zwischen Reifen und Strasse sowie die Verformung des Reifens. Variierte Werte: 1,5 bar, 2,5 bar, 3,5 bar.

Die Parameter Schräglaufwinkel, Schlupf, Radlast und Reifendruck wurden variiert, um deren Einfluss auf die mechanische Beanspruchung des Reifens und die Partikelemission zu analysieren. Alle in den Versuchen berücksichtigten Parameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2 : Tabelle der variierten Parameter

Parameter	Varierte Werte	Möglicher Einfluss auf Partikelemission
Schräglaufwinkel	0° / 2° / 4°	Erhöht seitliche Kräfte → erhöhte Scherkräfte
Schlupf	Ca. 0% (Rollreibung) bis Haftbeiwert	Höherer Schlupf → erhöhte Scherkräfte
Radlast	3000 N / 4000 N	Höhere Last → grössere Kontaktfläche
Reifendruck	1.5 bar / 2.5 bar / 3.5 bar	Niedriger Druck → grössere Aufstandsfläche

3 Versuchsergebnisse

Die nachfolgenden Ergebnisse basieren auf Fahrversuchen unter den Bedingungen auf der in Abschnitt 2.3 definierten Strecke zwischen Biel und Pieterlen. Die Strecke war trocken, die Lufttemperatur betrug etwa 25 °C, und der gemessene SRT-Wert (Skid Resistance Tester) lag bei > 65, was eine hohe Griffbarkeit der Oberfläche sicherstellt. Ziel der Auswertung ist es, die Einflüsse der variierten Parameter: Schräglaufwinkel, Radlast, Reifendruck und Schlupf, auf die Partikelemissionen zu quantifizieren. Der Schlupf wurde dabei von nahezu 0 % (Rollreibung) zu höheren Werten variiert.

Schlupf und Temperatur:

Mit zunehmendem Schlupf wurden deutlich höhere Partikelkonzentrationen gemessen, was die publizierten Inhalte bestätigt. Die erfassten Werte lagen im Bereich von etwa 50 bis 500 Partikeln pro Kubikzentimeter, was den Einfluss erhöhter Scherkräfte im Reifen-Fahrbahn-Kontakt auf die Partikelbildung unterstreicht. Es ist jedoch hervorzuheben, dass diese Konzentrationen wesentlich geringer sind als die typischen Werte bei klassischen Verbrennungsmotor-Emissionen.

Es ist festzustellen, dass bei einem konstanten Schlupfwert nahe des maximalen Haftbeiwerts, wie in Abbildung 7 dargestellt, mit zunehmender Versuchsdauer eine Erwärmung des Reifens erfolgt. Gleichzeitig weisen die gemessenen Emissionen insgesamt einen abnehmenden Trend auf.

Nach etwa 80 s ist jedoch ein ausgeprägter lokaler Peak in den Emissionswerten erkennbar. Dieser Anstieg ist auf Verunreinigungen der Fahrbahn zurückzuführen, die während der Versuchsfahrt festgestellt wurden und kurzfristig erhöhte Messwerte verursachten.

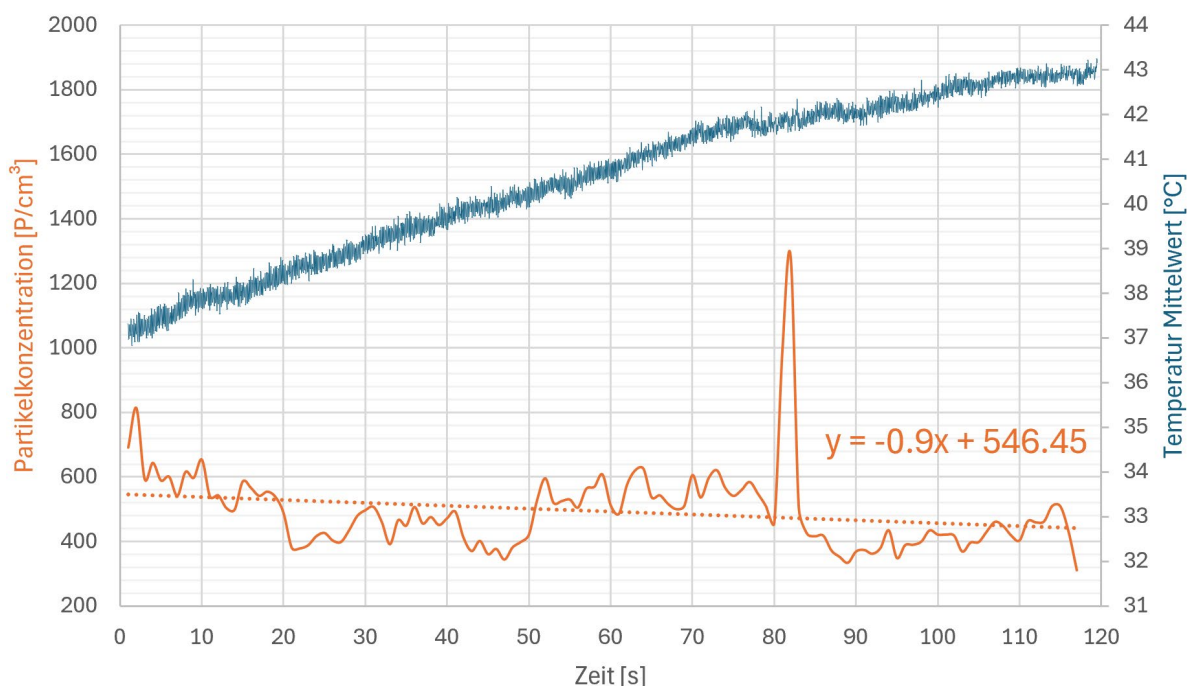


Abbildung 7: Mittlere Temperatur und Partikelanzahlkonzentration über der Zeit für hohe Schlupfwerte

Schräglaufwinkel:

Die Untersuchung des Einflusses des Schräglaufwinkels auf die Partikelanzahlkonzentration erfolgte auf Basis der gemessenen Partikelgrößenverteilungen für drei unterschiedliche Schräglaufwinkel von 0°, 2° und 4°, vgl. Abbildung 8.

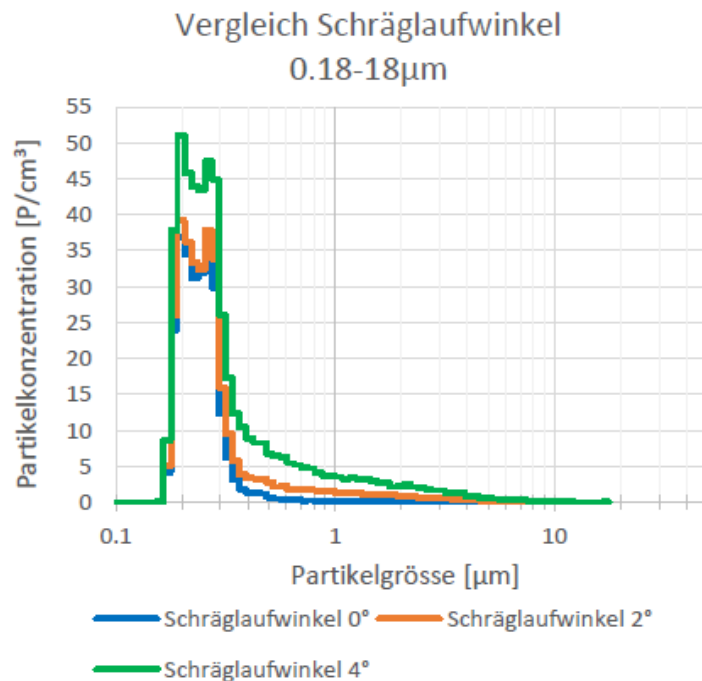


Abbildung 8: Partikelanzahlkonzentration über der Partikelgrösse für verschiedene Variationen des Schräglaufwinkels (0-4°).

Für jede dieser Einstellungen wurde eine separate Partikelgrößenverteilung ermittelt, es zeigt sich, dass mit zunehmendem Schräglaufwinkel eine Zunahme der Partikelanzahlkonzentration über nahezu den gesamten erfassten Partikelgrößenbereich zu verzeichnen ist. Bereits beim Übergang von 0° auf 2° Schräglaufwinkel ist eine moderate Erhöhung der Partikelkonzentration erkennbar, während bei einem Schräglaufwinkel von 4° die höchsten Konzentrationen gemessen wurden.

Gewichtskraft:

Der Einfluss der Gewichtskraft auf die Partikelanzahlkonzentration wurde durch Variation der Radlast untersucht. Hierzu wurden Messungen bei zwei unterschiedlichen Gewichtskräften von ca. 3000 N und 4000 N durchgeführt. Für beide Lastfälle wurden jeweils Partikelgrößenverteilungen im relevanten Partikelgrößenbereich ermittelt und miteinander verglichen, vgl. Abbildung 9.

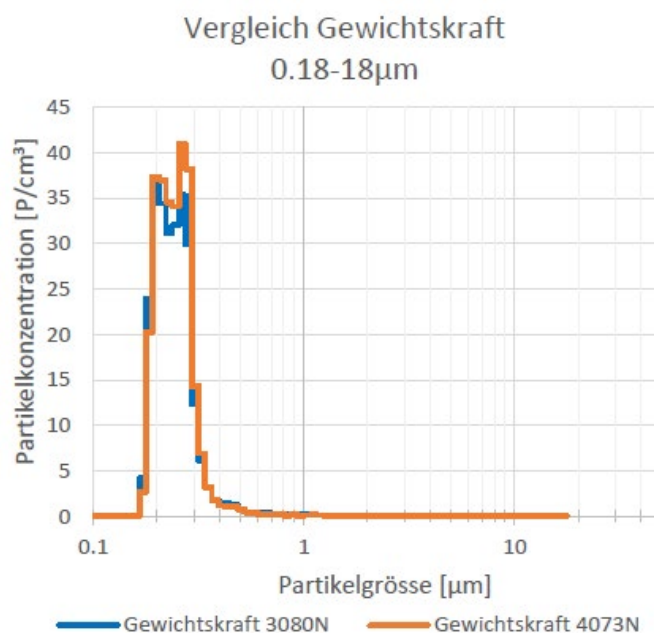


Abbildung 9: Partikelanzahlkonzentration über der Partikelgrösse für verschiedene Variationen der Gewichtskraft (3000 N/4000 N)

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Partikelgrößenverteilungen für beide Gewichtskräfte nur geringfügig unterscheiden. Über den betrachteten Partikelgrößenbereich hinweg weisen die Verteilungen eine sehr ähnliche Form sowie vergleichbare Partikelanzahlkonzentrationen auf. Eine signifikante Veränderung der Gesamtpartikelkonzentration oder eine Verschiebung der dominanten Partikelgrößen kann zwischen den beiden Lastzuständen nicht festgestellt werden.

Auch im Bereich feiner Partikel bleiben die gemessenen Konzentrationen weitgehend konstant, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Erhöhung der Gewichtskraft von 3000 N auf 4000 N unter den betrachteten Versuchsbedingungen keinen massgeblichen Einfluss auf die Partikelemissionscharakteristik ausübt. Die beobachteten Abweichungen liegen innerhalb eines ähnlichen Verteilungsbereichs und lassen sich als messtechnisch bzw. prozessbedingt einordnen.

Reifenluftdruck:

Der Einfluss des Reifenluftdrucks auf die Partikelanzahlkonzentration wurde anhand der in Abbildung 10 dargestellten Messungen untersucht. Hierzu wurden drei unterschiedliche Luftdruckvariationen von 1.5 bar, 2.5 bar und 3.5 bar betrachtet. Für jede Druckeinstellung wurden Partikelgrößenverteilungen im Größenbereich von 0.018 μm bis 18 μm erfasst und ausgewertet.

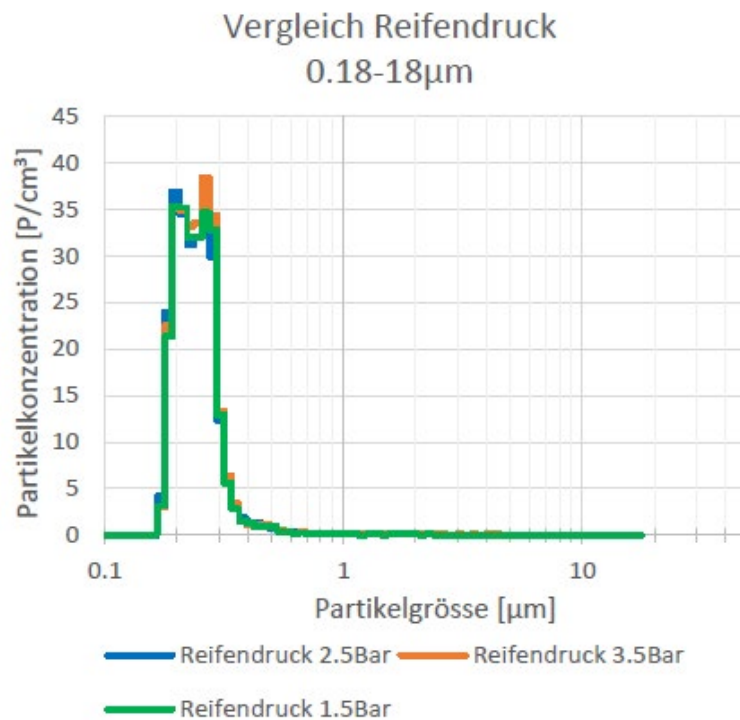


Abbildung 10: Partikelanzahlkonzentration über der Partikelgröße für verschiedene Variationen des Reifenluftdrucks (1.5 Bar, 2.5 Bar, 3.5 Bar)

Die Ergebnisse zeigen, dass über alle drei untersuchten Luftdruckstufen hinweg keine wesentlichen Unterschiede in der Partikelanzahlkonzentration festgestellt werden können. Die Partikelgrößenverteilungen weisen eine sehr ähnliche Form auf und liegen über den gesamten betrachteten Partikelgrößenbereich innerhalb eines vergleichbaren Konzentrationsniveaus. Weder eine signifikante Änderung der Gesamtpartikelanzahl noch eine Verschiebung der dominanten Partikelgrößen ist erkennbar. Auch im Bereich feiner Partikel bleibt die Anzahlkonzentration über die untersuchten Luftdruckvariationen hinweg nahezu konstant. Die beobachteten Abweichungen zwischen den einzelnen Messreihen bewegen sich innerhalb eines ähnlichen Verteilungsbereichs und sind als gering einzustufen.

4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die im Rahmen der Fahrversuche gewonnenen Ergebnisse zusammengeführt und in ihrem physikalischen Kontext eingeordnet. Ziel ist es, die beobachteten Zusammenhänge zwischen den variierten Fahrzuständen (Schlupf, Schräglaufwinkel, Radlast, Reifenluftdruck) und der Partikelanzahlkonzentration sowie der grössenaufgelösten Verteilung im Messbereich 0,018–18 µm (vgl. Abb. 7–10) prägnant darzustellen. Die Zusammenfassung erfolgt unter den dokumentierten Randbedingungen der Versuche (Strecke Biel–Pieterlen, 40 km/h, trockene Oberfläche, SRT > 65, Umgebungstemperatur ca. 25 °C) und dient als Grundlage für die nachfolgenden Diskussion und Schlussfolgerungen.

Schräglaufwinkel

Mit steigendem Schräglaufwinkel (0° → 2° → 4°) wird eine Zunahme der Partikelanzahlkonzentration über nahezu den gesamten Grössenbereich beobachtet. Besonders ausgeprägt zeigt sich die Zunahme in der feinen Partikelfraktion. Das Verhalten wird als erwartungskonform eingestuft, da mit steigendem Winkel höhere tangential Relativbewegungen und lokale Scherkräfte im Reifen-Fahrbahn-Kontakt erzeugt werden, wodurch die Freisetzung von Abriebpartikeln begünstigt und deren Fragmentierung intensiviert wird. Zusammenfassend wird der Schräglaufwinkel im untersuchten Fenster als signifikanter Einflussfaktor auf Gesamtanzahl und grössenaufgelöste Verteilung der Partikelemissionen identifiziert.

Radlast / Gewichtskraft

Für die untersuchten Laststufen (3000 N und 4000 N) werden sehr ähnliche Verteilungsformen und vergleichbare Konzentrationsniveaus festgestellt. Signifikante Änderungen der Gesamtanzahlkonzentration oder Verschiebungen der dominanten Grössenfraktion werden nicht nachgewiesen. Innerhalb dieses Lastfensters scheinen die durch die veränderte Aufstandsfläche und Kontaktbedingungen induzierten Effekte nicht hinreichend, um eine systematische Erhöhung der Scherbeanspruchung – und damit eine messbare Veränderung der Anzahlkonzentration – auszulösen. In der Gesamtschau wird die Radlastvariation im vorliegenden Bereich als untergeordneter Einfluss bewertet.

Reifenluftdruck

Über die untersuchten Druckstufen (1,5 bar / 2,5 bar / 3,5 bar) bleiben Form und Niveau der Partikelgrössenverteilungen im Bereich 0,018–18 µm nahezu unverändert. Es wird weder eine statistisch belastbare Änderung der Gesamtanzahl noch eine Verschiebung der dominanten Grössenfraktion festgestellt. Die innerhalb dieses Druckfensters zu erwartenden Anpassungen von Kontaktflächendruck und Laufflächenverformung werden unter den gegebenen Fahr- und Schlupfbedingungen nicht mit einer messbaren Änderung der Scherbeanspruchung in Verbindung gebracht. Der Einfluss des Reifenluftdrucks wird daher als untergeordnet eingestuft.

Unter den dokumentierten Randbedingungen der Fahrversuche wurde gezeigt, dass die grössenaufgelöste Partikelanzahlkonzentration im Bereich 0,018–18 µm primär durch kontaktmechanische Scherbeanspruchungen bestimmt wird. Insbesondere Schlupf und Schräglaufwinkel wirken als dominierende Einflussgrössen: Mit zunehmender tangentialer Relativbewegung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt wird eine deutliche Zunahme der Gesamtanzahlkonzentration sowie eine Erhöhung der feinen Partikelfraktion beobachtet. Demgegenüber werden für die Radlast und den Reifenluftdruck innerhalb der untersuchten Bereiche keine signifikanten Veränderungen der Verteilungsform oder des Konzentrationsniveaus festgestellt.

Die Ergebnisse werden als physikalisch plausibel eingeordnet:

Quer- und Längsregime mit erhöhten Schubspannungen begünstigen die Freisetzung und Fragmentierung von Abriebmaterial stärker als die hier moderat variierten Änderungen von Normalkraft und Kontaktflächendruck. Zeitlich lokale Emissionsspitzen (z. B. um ≈ 80 s) werden als externe Störereignisse (Fahrbahnverunreinigungen) klassifiziert und sollten in der Datenauswertung gekennzeichnet sowie robustheitsgeprüft werden.

5 Ausblick

Aus anwendungsbezogener Sicht wird abgeleitet, dass emissionsmindernde Strategien vorrangig an der Reduktion scherverstärkender Fahrzustände anzusetzen haben (glatte Längsdynamik, moderater Lenkeinsatz, Vermeidung hoher Schlupfwerte), während Reifendruckanpassungen innerhalb üblicher Betriebsfenster und moderate Lastvariationen im betrachteten Bereich keine wirksamen Stellhebel darstellen. Für die Reifenentwicklung wird nahegelegt, Werkstoffe und Laufflächengeometrien zu priorisieren, die Fragmentierung unter Scherbeanspruchung reduzieren, ohne sicherheitsrelevante Eigenschaften (Bremsweg, Spurhaltung, Nasshaftung) zu kompromittieren.

Methodisch wird festgehalten, dass das MoReLab-Konzept mit isokinetischer Probenahme eine belastbare Brücke zwischen kontrollierten Laborbedingungen und realen Strassenmessungen schlägt. Die hier präsentierte regimebasierte Bewertung liefert eine fundierte Grundlage für die Standardisierung von TRWP-Messungen und die modellgestützte Quantifizierung der Partikelentstehung. Die Gültigkeit der Befunde bezieht sich auf die beschriebenen Betriebs- und Umweltbedingungen; für erweiterte Parameterbereiche, kombinierte Regime und abweichende Fahrbahn-/Reifencharakteristika wird eine Weiterführung der Untersuchungen empfohlen.

Insgesamt wird damit eine klare Sensitivitätsordnung etabliert und eine praxisnahe Orientierung für Emissionsminderung, Messprotokolle und Reifenauslegung bereitgestellt, die eine sicherheitskonforme Reduktion nicht-auspuffbedingter Partikelemissionen unterstützt.

6 Literatur und Quellen

- [1] T. De Oliveira et al., “Realistic assessment of tire and road wear particle emissions and their influencing factors on different types of roads,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 465, 133301, 2024.
- [2] S.-H. Bae et al., “Characteristics of tire-road wear particles generated under realistic pavement conditions,” *Science of the Total Environment*, vol. 944, 173948, 2024.
- [3] TU Braunschweig & Continental, “On-road measurement of tire wear particles using instrumented vehicles,” Project report / press communication, 2025.
- [4] RWTH Aachen University, “Measurement methods for non-exhaust emissions from road traffic,” Technical report, 2025.
- [5] <https://www.sigrist.com/de/GlossaryEntry/Isokinetik/>; Zugriff am Dezember 2025

7 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AP	Anfangspunkt (Startpunkt der Teststrecke)
BAFU	Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
BFH	Berner Fachhochschule
CFD	Numerische Strömungsmechanik
GC-MS	Gaschromatographie-Massenspektrometrie
LED	Leuchtdiode (Teil der Geräteserie „PROMO LED“)
MoReLab	Mobiles Reifenlabor (Reifen-Messfahrzeug)
PW	Personenwagen (PW-Bauweise)
Py-GC-MS	Pyrolyse-GC-MS
SRT	Skid Resistance Tester (Griffigkeitskennwert/Prüfgerät)
TRWP	Reifen-/Strassenabriebpartikel
TU	Technische Universität (z. B. TU Braunschweig)
WP	Wendepunkt (Umkehrpunkt der Teststrecke)
ISO-TRWP	Projektbezeichnung „ISO-TRWP“

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Versuchsbereites MoReLab-Fahrzeug mit eingebauter Prototypen-Partikelabsaugung	7
Abbildung 2 : Vereinfachte CFD-Studie zur Abschätzung des Strömungsnachlaufs am Reifen	7
Abbildung 3 : Schamtische Darstellung für isokinetischer, sowie unter- und über-isokinetische Probenahme [5]	8
Abbildung 4 :Konzept der Absaugung mit einstellbarer variabler Querschnittsfläche (rote Markierung) der Probenentnahme über Blenden	8
Abbildung 5 : Aufbau der Probenentnahme am MoReLab	9
Abbildung 6 : Teststrecke zwischen Biel und Pieterlen	9
Abbildung 7: Mittlere Temperatur und Partikelanzahlkonzentration über der Zeit für hohe Schlupfwerte	11
Abbildung 8: Partikelanzahlkonzentration über der Partikelgrösse für verschiedene Variationen des Schräglaufwinkels (0-4°).	12
Abbildung 9: Partikelanzahlkonzentration über der Partikelgrösse für verschiedene Variationen der Gewichtskraft (300 kN/400 kN)	12
Abbildung 10: Partikelanzahlkonzentration über der Partikelgrösse für verschiedene Variationen des Reifenluftdrucks (1.5 Bar,2.5 Bar,3.5 Bar)	13

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Aufgezeichnete fahrdynamische Parameter und Messwerte des MoReLabs	6
Tabelle 2 : Tabelle der variierten Parameter	10

Versionskontrolle

Version	Datum	Beschreibung	Autor
1.0	12.2025	Version 1.0	Danilo Engelmann