



# Feinstaubemissionen trockenlaufender Friktionssysteme in Fahrzeugen

Alexander Sutschet<sup>1</sup> · Katharina Bause<sup>1</sup> · Arne Bischofberger<sup>1</sup> · Sascha Ott<sup>1</sup>

Eingegangen: 6. Februar 2023 / Angenommen: 31. März 2023  
© Der/die Autor(en) 2023

## Zusammenfassung

Nicht nur der Verbrennungsmotor eines Fahrzeuges emittiert Feinstaub, auch durch das Bremsen und Abrollen des Reifens entstehen solche gesundheitsschädlichen Kleinstpartikel. Deshalb rücken wissenschaftliche Untersuchungen des Bremsstaubes immer mehr in den Fokus. Im PMP (Particle Measurement Program) wird daher bereits an einer Regulierung der Bremsemissionen von PKW und leichten Fahrzeugen gearbeitet. Auch existieren bereits technische Lösungen wie bspw. Filter [1], Absauganlagen [2] oder auch andere Bremsenbauformen wie Trommelbremsen [3] oder nasslaufende Systemen [4] um Feinstaubemissionen von Bremsen zu minimieren oder gar zu eliminieren. Die bisherigen Lösungen sind jedoch entweder kostenintensiv, aufwendig oder befinden sich noch in der Konzeptphase. Auch die Verlagerung der Bremsfunktion in den Antriebsstrang, wie in [5] ist ein möglicher Ansatz, um der Feinstaubemission in die Umweltentgegenzuwirken. Dies bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass es bisher keine gesetzlichen Grundlagen für solche Ansätze gibt. Allein auf Deutschlands Straßen befinden sich derzeit knapp 60 Mio. Fahrzeuge [6] mit konventionellem Radbremsystemen. Daher ist es von essenzieller Bedeutung die Partikelentstehungsmechanismen bestehender Systeme zu verstehen. Dazu gehört die Betrachtung wann, wie, und unter welchen Bedingungen Feinstaub entsteht. Mit diesem Wissen kann dann ein Nutzen für die Entwicklung von Bremsystemen geschaffen werden und ggf. Anpassungen für Fahrzeuge im Feld ermöglicht werden. Durch die Analyse der Verschleißpartikel können auch Erkenntnisse über Reibvorgänge im Friktionssystem gewonnen werden. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Messung und Beschreibung von Verschleißpartikel vorgestellt. Mit der Methode soll tiefergehendes Wissen über die Entstehungsmechanismen von Verschleißpartikeln im Friktionskontakt gewonnen werden. Des Weiteren soll zukünftig der Einsatz der Methode die Messung von Verschleißpartikeln als Informationsquelle für das vorliegende Reibverhalten im Friktionskontakt dienen. Dafür erweitern die Autoren den (Kupplungs- und) Bremsprüfstand des IPEK – Institut für Produktentwicklung um ein Probenahmesystem von Verschleißpartikel. Das zu untersuchende Friktionssystem wird in einer Blechkonstruktion umschlossen und so gegen die Umwelt abgeschirmt. Das Gehäuse wird über ein Rohrsystem zur Partikelführung an die Partikelmesseinheiten angebunden. Ein Gebläse erzeugt ein Volumenstrom in dem Rohrsystem, wodurch sich die entstehenden Partikel während einer Bremsung in dem Rohrsystem fortbewegen und dort gemessen werden können. Mit dieser Methode können Einflussparameter auf die Feinstaubentstehung ermittelt und gezielt Maßnahmen zur Reduktion dieser Emissionen abgeleitet werden: Denkbar sind betriebszustandsabhängige Anpassungen der Steuerung und Regelung des Betätigungsvorganges sowie konstruktive Maßnahmen inklusiver der Anpassung der Reibpartner.

---

✉ Alexander Sutschet  
alexander.sutschet@kit.edu

<sup>1</sup> IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe, Deutschland

## Particulate matter emissions from dry-running friction systems in vehicles

### Abstract

Not only the combustion engine of a vehicle emits particulate matter, but also the braking and rolling of the tire produces such small particles that are harmful to health. For this reason, scientific studies of brake dust are increasingly coming into focus. The PMP (Particle Measurement Program) is therefore already working on regulating brake emissions from passenger cars and light vehicles. Technical solutions such as filters [1], exhaust systems [2] or other brake designs such as drum brakes [3] or wet-running systems [4] already exist to minimize or even eliminate particulate emissions from brakes. However, the solutions to date are either costly, complex, or still in the conceptual phase. Relocating the brake function to the powertrain, as in [5], is also a possible approach to counteract the particulate matter problem. However, this has the disadvantage that there is yet no legal basis for such approaches. On Germany's roads alone, there are currently almost 60 million vehicles [6] with conventional wheel braking systems. Therefore, it is essential to understand the particle generation mechanisms of existing systems. This includes considering when, how, and under what conditions particulate matter is generated. This knowledge can then be used to benefit the development of braking systems and, if necessary, enable adaptations for vehicles in the field. By analyzing the wear particles, knowledge can also be gained about friction processes in the friction system. In this paper, a method for measuring and describing wear particles is presented. The method shall be used to gain deeper knowledge about the formation mechanisms of wear particles in the friction contact. Furthermore, in the future the use of the method the measurement of wear particles shall serve as a source of information for the existing friction behavior in the friction contact.

The method is intended to provide more in-depth knowledge about the formation mechanisms of wear particles in the friction contact. Furthermore, the application of the method allows to use the wear particles as a source of information for the friction behavior. For this purpose, the authors extend the (clutch and) brake test rig of IPEK – Institute for Product Development by a sampling system of wear particles. The friction system to be investigated is enclosed in a sheet metal structure and thus shielded from the environment. The housing is connected to the particle measuring unit via a pipe system for particle guidance. A blower generates a volume flow in the pipe system, whereby the resulting particles move in the pipe system during braking and can be measured there. This method can be used to determine parameters influencing the formation of particulate matter and to derive specific measures for reducing these emissions: Operating-condition-dependent adjustments to the control and regulation of the actuation process are conceivable, as are design measures including the adaptation of the friction partners.

### 1 Motivation

Die Abgasemissionen von Kraftfahrzeugen werden in der Europäischen Union durch die Euro-Norm reguliert. In dieser Norm sind Grenzwerte der Emissionen verbrennungsmotorischer Prozesse festgelegt. Es werden unter anderem Grenzwerte für Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN) festgelegt. Erst im Jahr 2025 sollen die Emissionen nicht-verbrennungsmotorischer Prozesse im Rahmen der Euro 7 Norm reguliert werden. Allerdings ist bereits heute Reifenabrieb der größte Emittent von Mikroplastik in die Umwelt [7]. Auch zeigen erste Studien in Realversuchen, dass die Emissionen von Reifenabrieb um bis zu Faktor 1000 höher sind als die Grenzwerte der Verbrennungsemissionen [8]. Auch Bremsabrieb wurde bisher nicht reguliert. Medizinische Studien zeigen jedoch, dass Bremsstaub gesundheitsschädigend wirkt und das Risiko für Atemwegserkrankungen erheblich erhöht [9]. Bei Betrachtung der Entwicklung der PM<sub>10</sub> Emissionen im baden-württembergischen Verkehr ist zu erkennen, dass die abgasbedingte Emissionen die letzten beiden Jahrzehnten stark rückläufig sind ([10]; Abb. 1).

Dies hängt unter anderem mit der weit fortgeschrittenen Entwicklung der Katalysator-technologie zusammen. Beispielsweise konnte durch die Einführung des Otto-Partikelfilters in der Euro 6d-Temp Norm die Partikelemissionen von Millionen Fahrzeugen in Europa und China signifikant reduziert werden [11]. Es kann damit gerechnet werden, dass solche verbrennungsmotorischen Partikelemissionen zukünftig eine untergeordnete Rolle spielen. Anders verhält es sich mit nicht-verbrennungsmotorischen Feinstaubemissionen, welche durch Reifen- und Bremsabrieb emittiert werden. Diese Emissionen werden auch als non-exhaust emissions (NEE) bezeichnet und konsequenterweise auch von batterieelektrischen Fahrzeugen emittiert. Aufgrund des Trends zu größeren und schwereren Fahrzeugen (welche mehr NEE emittieren) [12], kann davon ausgegangen werden, dass diese Emissionen zukünftig die primäre Quelle von Partikelemissionen von Kraftfahrzeugen sein werden. Allerdings gibt es erst in den letzten Jahren vermehrt Forschungsaktivitäten zu Feinstaubemissionen von Reifen und Bremsen. Vor allem im Kontext der Elektromobilität ist der Themenkomplex kaum betrachtet. Beispielsweise wird, durch die Möglichkeit des elektrischen Brem-

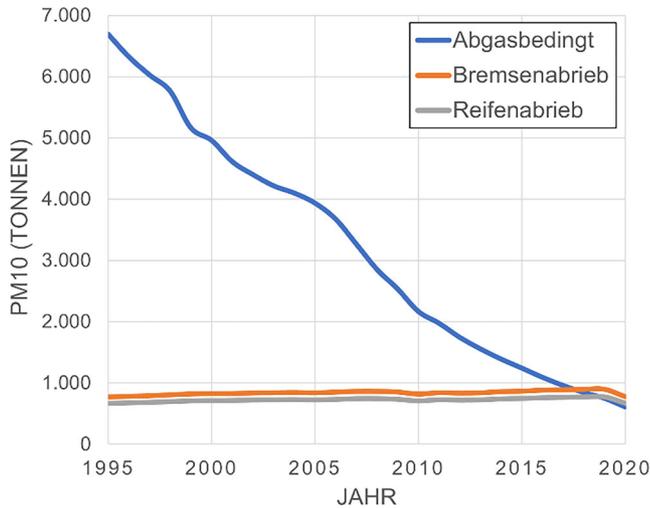


Abb. 1 Feinstaub (PM<sub>10</sub>)-Emissionen des Straßenverkehrs seit 1995 in Baden-Württemberg [10]

sens in Elektrofahrzeugen, die mechanische Bremse seltener eingesetzt. Dadurch werden die reibaktiven Schichten auf dem Bremsbelag und der Bremsscheibe seltener konditioniert und korrodieren dadurch schneller [13]. Die mechanische Bremse wird somit hauptsächlich bei starken bis sehr starken (Sicherheitsbremsungen) Verzögerungen eingesetzt, gilt es jedoch trotz Veränderung der Reibschicht eine Mindestreibungszahl zu garantieren. Der Einfluss des Korrosionszustandes einer Bremse auf die Feinstaubemissionen ist bisher nicht bekannt.

## 2 Analyse des Stands der Technik und der Forschung

Derzeit werden die Grundlagen zur Homologation, der nicht verbrennungsmotorisch bedingten Feinstaubemissionen erarbeitet. Im Bereich des Reifenabriebs ist bisher nicht

definiert, wie genau die Regulierung aussehen wird. Anders verhält es bei der Regulierung von Bremsenstaub. Unter der Schirmherrschaft der UNECE-Arbeitsgruppe für Umweltverschmutzung und Energie (GRPE) [14] wurde eine informelle Arbeitsgruppe zum Particle Measurement Program (PMP) eingerichtet. Diese setzt sich unter anderem aus OEM, Zulieferern und Hersteller von Bremsenprüfständen zusammen und legt die technischen Grundlagen zur Regulierung von Bremsenfeinstaub fest. Im Jahr 2025 soll die Umsetzung der Regulierung im Rahmen der Euro 7 Abgasnorm mit aufgenommen werden. In einem Proposal Draft der Arbeitsgruppe wird ein Vorschlag zur Messung der Feinstaubemissionen von Bremsen vorgestellt. In diesem Proposal Draft geht hervor, dass die Bremsen an einem Dynamometerprüfstand, wie in Abb. 2 zu sehen, untersucht werden sollen. Die Bremse wird in einer Edelstahlkonstruktion eingehaust und ein geschlossenes Rohrsystem installiert. Durch ein Gebläse wird ein konstanter Volumenstrom aufgebaut und so die Feinstaubpartikel aus der Bremse abgetragen. Diese werden an einem 90°-Bogen gemessen und gesammelt. Dabei werden als Bewertungs- und Regulierungsgröße die Partikelanzahl (Particle Number, PN) und die Partikelmasse (Particle Mass, PM) herangezogen. Dabei werden die Partikel grundsätzlich gravimetrisch gemessen. Für die Bewertung der Bremspartikelemissionen wurde ein Zertifizierungs-Zyklus, der sogenannte WLTP-Brake Test, entwickelt. Dieser wird mehrfach durchfahren und ist mit 192 km Länge deutlich umfangreicher als der WLTP-Zyklus (23 km).

Obwohl es noch keine gesetzlichen Vorgaben zur Einhaltung von Bremsenfeinstaubgrenzwerten existieren, bereiten sich Hersteller von Bremsenprüfständen auf die bevorstehende Regulierung vor. Vorgeschlagen wird ein Grenzwert von 7 mg/km ab 2025 und 3 mg/km ab 2035. Aus der Analyse des Stands der Technik und Forschung lassen sich zwei Ansätze ableiten, die derzeit zur Anwendung kommen:

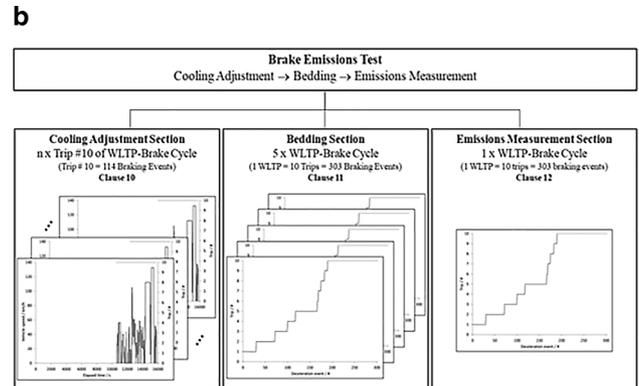
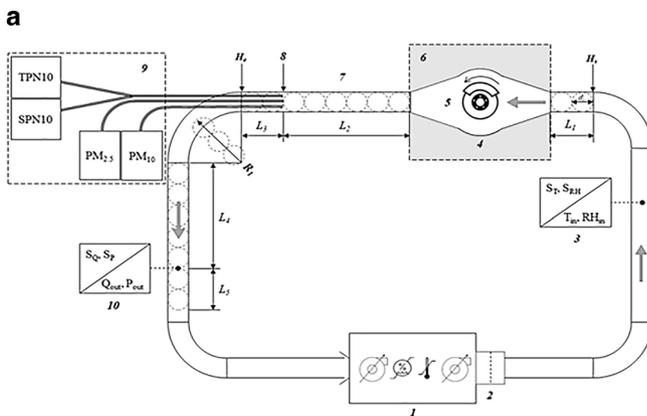


Abb. 2 Prüfstandskonzept des PMP zur Durchführung der Bremsenemissionsprüfung im Labor (a) und Struktur der Bremsenemissionsprüfungen für Fahrzeuge (b) [15]

### i. Veränderung der Feinstaubentstehung

Ein Ansatz ist die Verhinderung der Entstehung von Feinstaubemissionen durch Bremsen. Dabei wird vor allem bei hybrid- und batterieelektrischen Fahrzeugen auf die Betriebsstrategie gesetzt. Durch Rekuperation oder auch kombiniertes Bremsen können die Emissionen bereits heute sehr stark gesenkt werden. Im WLTP-Brake Zyklus (s. Abb. 2 rechts) können Elektrofahrzeuge bis zu 90% der Verzögerungen durch elektrisches Bremsen realisieren [16]. Auch setzen Bremsenhersteller auf neue Bremsmaterialien und Herstellungsverfahren. So können durch Beschichtungsverfahren von gängigen Gussbrems scheiben bis zu 90% der Feinstaubemissionen reduziert werden [17]. Allerdings sind solche Verfahren aufwendig und erhöhen die Produktionskosten.

Auch werden bereits nasslaufende Bremssysteme zur Vermeidung der Entstehung der luftgetragenen Partikel wie in [4] eingesetzt. Der Verschleiß, welcher zwangsläufig im Friktionssystem entsteht, wird durch das Öl gebunden und nicht in die Umwelt emittiert.

Betrachtet man die Funktion Bremsen als gesamtsystemische Funktion des Antriebssystems inklusive der Steuerung und Regelung, ergeben sich weitere Möglichkeiten zur Realisierung dieser. So wurde in [5] gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, die Bremsfunktion in ein schaltbares Mehrganggetriebe eines elektrischen Antriebsstrangs zu verlagern, um eine erhöhte Gesamtsystemeffizienz zu erreichen. Es existieren bisher keine gesetzlichen Grundlagen für solche Ansätze im Fahrzeugbereich. Im Sonder- und Landmaschinenbau hingegen sind solche Antriebsstrangtopologien weit verbreitet. Oftmals sind die Bremsen von Traktoren als nasslaufende Lamellenbremsen an der Hinterachse ausgeführt [18]. Im nasslaufenden System kann durch das Öl in der Bremse die Wärme gut abgeführt werden und es entstehen keine Bremsemissionen. Nachteilig

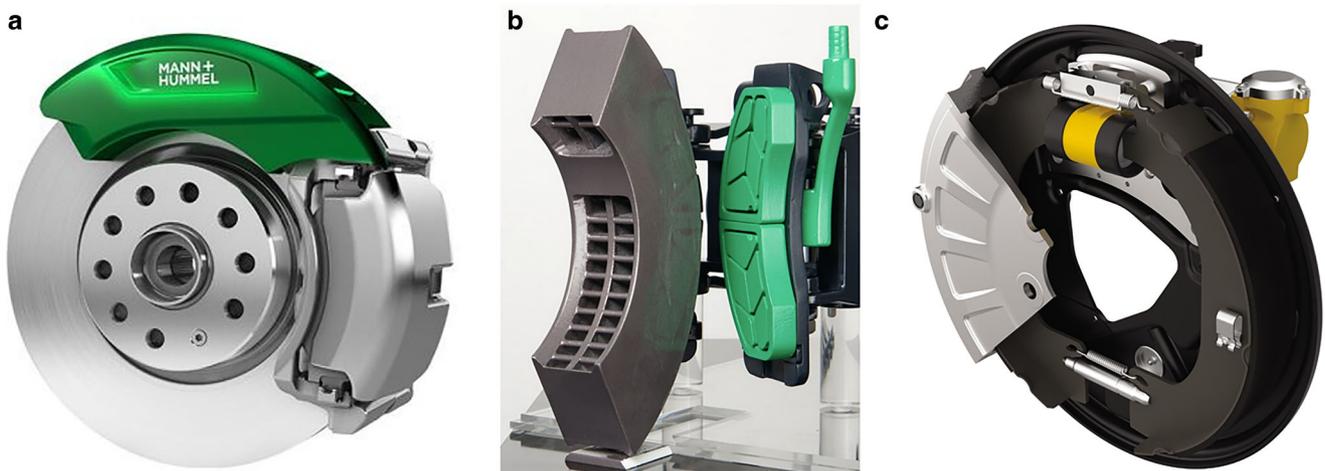
sind die geringen Reibungszahlen im Friktionssystem und die Schleppverluste im Betrieb.

### ii. Verhindern des Feinstaubaustritts in die Umwelt

Ein anderer Ansatz der Feinstaubreduzierung kann durch zusätzliche technische Systeme realisiert werden. Diese Systeme verringern nicht grundsätzlich die Feinstaubemissionen der Bremse, verhindern jedoch, dass diese aus der Bremse austreten und in die Umwelt gelangen. So existieren bereits Lösungen wie beispielsweise passive Filter [1] oder aktive Absauganlagen [2]. Nachteilig an solchen Ansätzen ist der Nachrüstaufwand. Vor allem muss die Absauganlage als aktives technisches System mit in das Steuergerät des Fahrzeugs integriert werden.

Aber auch andere Bremsenbauformen wie Trommelbremsen werden vermehrt in Elektrofahrzeugen eingesetzt. Durch die gekapselte Bauart gelangt im Vergleich zu Scheibenbremsen deutlich weniger Feinstaub in die Umwelt [3]. (Abb. 3).

Die bisherigen Lösungen zur Feinstaubreduzierung sind entweder kostenintensiv, aufwendig oder befinden sich noch in der Konzeptphase. Da sich aber jedoch im Feld knapp 60 Mio. Fahrzeuge [6] mit konventionellen Bremssystemen befinden (und in den nächsten Jahren befinden werden), ist es von essenzieller Bedeutung die Partikelentstehungsmechanismen bestehender Systeme zu verstehen. Dazu gehört die Betrachtung wann, wie, und unter welchen Bedingungen Feinstaub entsteht. Mit diesem Wissen kann dann ein Nutzen für die Entwicklung von Bremssystemen geschaffen werden und ggf. Anpassungen für Fahrzeuge im Feld ermöglicht werden.



**Abb. 3** Scheibenbremse mit Filter (a) [1], Anlage zur Absaugung der Bremsemissionen (b) [2] und Trommelbremse (c) [3]

### 3 Fazit zur Analyse des Standes der Technik und Forschung

Scheibenbremsen sind die am meist eingesetzte Bremsbauart in Fahrzeugen und haben sich aufgrund ihrer Vorteile wie eine einfache Bauweise, eine gute Zugänglichkeit und Bremsdosierbarkeit am Markt durchgesetzt. Durch die offene Bauweise werden bei Bremsungen die Feinstaubpartikel in die Umwelt emittiert. Eine Abkapselung ist nicht ohne weiteres konstruktiv umsetzbar da dies weitere Auswirkungen wie bspw. erhöhte Temperaturen, notwendige Abdichtungen etc. nach sich ziehen würde. In der heutigen Betrachtungsweise werden Feinstaubemissionen von Bremsen als Auswirkungen und negative Folgen der Bremse gesehen. Zwar leisten Maßnahmen in Form technischer Nachrüstungen (Filter, Absauganlagen) Abhilfe, doch kompensieren diese lediglich die Nachteile.

Um durch gezieltes Auslegen die Emission bereits in deren Entstehung zu reduzieren, ist Wissen über die Entstehungsmechanismen und -bedingungen im Friktionskontakt notwendig, dies umfasst auch die Betrachtung der Aktuierung sowie der zugehörigen Ansteuerungs- und Regelalgorithmen. Die Modellvorstellungen hinter der Feinstaubentstehung sind bis heute nicht grundlegend erforscht. Im Rahmen dieses Beitrags wird eine Methode zur Ergründung und Aufbau von Wissen über die Entstehungsmechanismen und Einflussgrößen von Feinstaubemissionen in trockenlaufenden Friktionssysteme vorgestellt.

### 4 Forschungsmethode: Untersuchungsumgebung, Partikelmessung und -beschreibung

Ziel der Methode ist es, die Zusammenhänge zwischen Beanspruchung und Partikelemissionen in trockenlaufenden Friktionssystemen quantitativ beschreiben zu können. Zudem sollen über die Messung der Verschleißpartikel auf Vorgänge im Reibsystem gezogen werden. Grundlage der Methode bildet die Validierungsumgebung, welche durch die Modellbildung im Verständnis des IPEK-X-in-the-Loop Ansatzes erstellt wird [19], an dem Friktionssysteme und deren Feinstaubemissionen untersucht werden können. Der zweite Teil der Methode besteht aus der Untersuchung der Partikelemissionen einerseits während der Versuche und andererseits nach den Versuchen.

#### 4.1 Modellbildung und Validierungsumgebung

Die Autoren setzen einen Kupplungs- und Bremsenprüfstand in einer Konfiguration mit einem Schwungmassenmodul für die Untersuchungen trockenlaufender Friktionssysteme ein. Diese ermöglicht es, die thermomechanischen

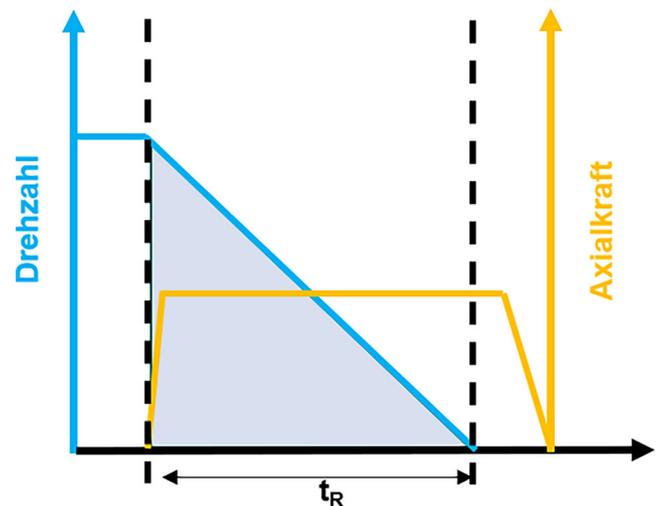


Abb. 4 Idealisierte Bremschaltung

Belastungen, die im Friktionskontakt auftreten, sowie die Wechselwirkungen mit dem Restsystem verschiedener Anwendungen abzubilden. Am Prüfstand können Friktionssysteme mit spezifischen Bremsarbeiten von  $10 \text{ J/mm}^2$  und spezifische Bremsleistungen von bis zu  $9 \text{ W/mm}^2$  beansprucht werden. Am Schwungmassenmodul sind stufenweise Trägheiten von bis zu  $3 \text{ kgm}^2$ , Drehzahlen bis zu  $6000 \text{ U/min}$  und Kräfte bis  $10 \text{ kN}$  einstellbar. Dadurch können alle typischen Bremsungen von Mittelklassefahrzeugen abgebildet werden.

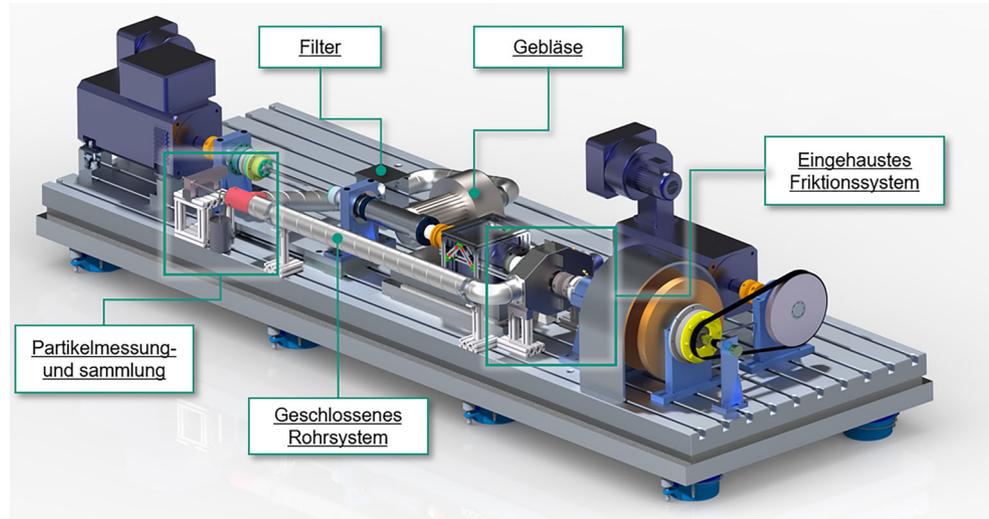
Durch das Schalten einer Elektromagnetkupplung wird die Verbindung der Schwungmasse zum Antrieb getrennt. Die Pressung im Friktionssystem wird über ein Axialkraftsteller eingeleitet. Der Prüfstand wird im Bremsbetrieb gefahren. Eine idealisierte Bremschaltung ist in Abb. 4 zu sehen. Am TRP-Trockenreibprüfstand sind Feinstaubmessungen des eingesetzten Friktionssystem möglich. Dies ist in Abb. 5 gezeigt und wird im Folgenden näher vorgestellt.

Das Friktionssystem ist in einer Edelstahlkonstruktion eingehaust und ein geschlossenes Rohrsystem aufgebaut. Ein Gebläse erzeugt einen konstanten Volumenstrom in diesem Rohrsystem, sodass während der Bremsung entstandene Partikel durch das Rohrsystem bis zur Partikelmessung und sammelungsstelle getragen werden. In der Einhausung befinden sich Umlenkbleche, sodass die thermische Verfälschung durch den Volumenstrom des Gebläses minimiert wird. Die Partikelmess- und sammelstelle befindet sich an einem  $90^\circ$ -Bogen.

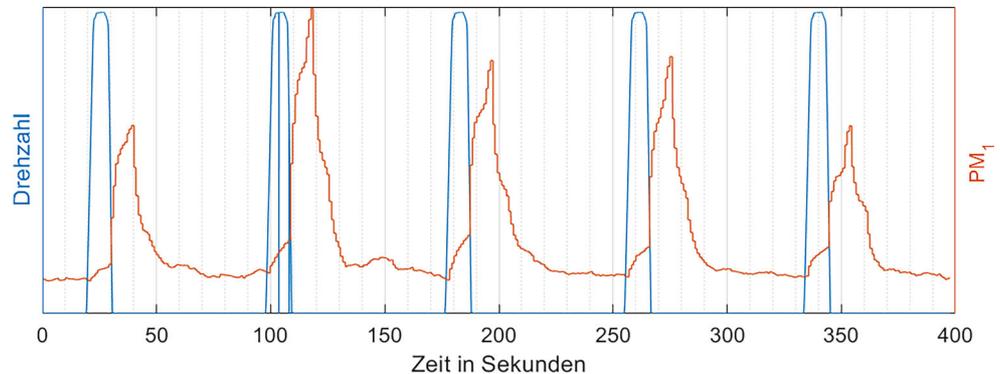
#### 4.2 Partikelmessung und -sammlung

An dem  $90^\circ$ -Bogen des Rohrsystems misst ein Aerosolspektrometer dauerhaft isokinetisch die Partikelbelastung im Rohrsystem. Entstehen bei einer Bremsung Verschleißpartikel werden diese detektiert. In Abb. 6 ist eine Versuchs-

**Abb. 5** TRP-Trockenreibprüfstand mit Erweiterung zur Messung und Sammlung von Feinstaub trockenlaufender Friktionssysteme



**Abb. 6** Bremsversuche mit Partikelaustoß



reihe zu sehen, in denen fünf Bremsungen mit geringen Beanspruchungen durchgeführt wurden. Die blaue Kurve zeigt das Drehzahlsignal der Schwungmasse. Die orangene Kurve zeigt den PM<sub>1</sub>-Wert. Es ist zu erkennen, dass es bei jeder Schaltung zu einem schlagartigen Anstieg der Partikelbelastung kommt und diese über einen Zeitraum von ca. 10 s abfällt.

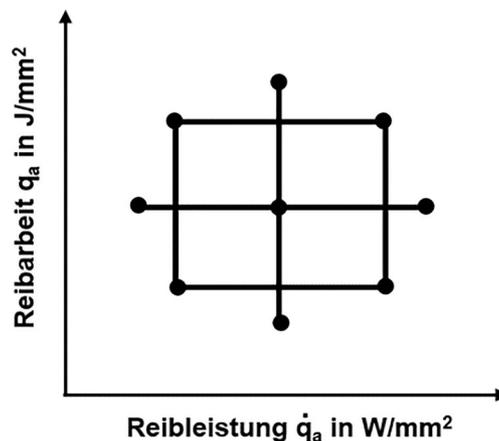
Ebenso sammelt ein dreistufiger (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>) Kaskadenimpaktor die Verschleißpartikel. Auch hier ist eine Messlanze in den 90°-Bogen eingeführt und nimmt eine isokinetische Stichprobe. Die Partikel werden in Petrischalen aufgefangen und nach den Versuchen digitalmikroskopisch untersucht. Dies bietet zusätzlich die Möglichkeit in zukünftigen Untersuchungen die chemische Zusammensetzung der Partikel untersuchen zu können.

### 4.3 Versuchsplanung

Im Folgenden wird die Vorgehensweise der Partikelmessung verschiedener Laststufen und Friktionssysteme vorgestellt. Durch das Variieren von Gleitgeschwindigkeiten, Pressungen und Massenträgheiten, lassen sich verschiedene Laststufen (spez. Reibarbeiten und -leistungen) einstellen.

So können die Einflussfaktoren auf die Partikelentstehung systematisch untersucht werden. (Abb. 7).

Es wurde ein Ablaufplan erarbeitet, aus dem die Vorgehensweise bei der Durchführung der Laststufen hervorgeht. Der Ablaufplan ist in Abb. 8 zu sehen. Im ersten Schritt wird das Friktionssystem gewogen. Danach wird das Friktionssystem mit den jeweilig typischen Einlaufpa-



**Abb. 7** Verschiedene Laststufen im Parameterraum



Abb. 8 Ablaufplan für eine Laststufe

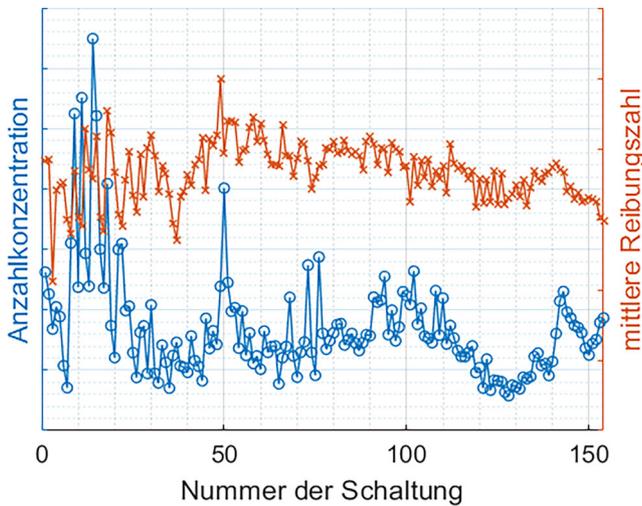


Abb. 9 Erste Messergebnisse

parameter eingelaufen um, reibaktiven Schichten aufzubauen. Diese Parameter werden aus Untersuchungen abgeschlossener Forschungsvorhaben abgeleitet. Die Impaktorfolien werden gewechselt und das Friktionssystem gewogen, um die Verschleißrate mithilfe der eingetragenen Energie zu berechnen. Die Durchführung der Laststufe wird mit bis zu 100 Schaltungen durchgeführt. Nach der Durchführung der Laststufen werden erneut die Impaktorfolien ausgebaut und die Verschleißrate gemessen. Für jede Laststufe wird ein

neues Friktionssystem herangezogen und neu eingelaufen, um den Einfluss der vorangegangenen Laststufen zu eliminieren. Die Laststufen des Friktionssystems werden nach der in [20] gewählten Methode bestimmt. Es werden bewusst Laststufen mit für das Friktionssystem geringen Beanspruchungen gewählt und Laststufen aus dem sog. Misuse-Bereich, in welchem die Leistungsgrenze überschritten wird.

#### 4.4 Erste Ergebnisse

Es wurden erste Versuche mit der vorgestellten Prüfmethodik durchgeführt. Dafür wurden 150 Lastschaltung mit den Einlaufparametern des Friktionssystems durchgeführt. In Abb. 9 ist die gemessene Anzahlkonzentration und die mittlere Reibungszahl in jeder Laststufe zu sehen. Es ist zu erkennen, dass in den ersten 20 Schaltungen erhöhte mittlere Reibungszahlen und Partikelkonzentrationen gemessen werden. Beide Werte pendeln sich im Laufe der Schaltungen auf ein nahezu stabiles Niveau ein.

In Abb. 10 ist ein Vorgehen zur nachgelagerten Messung zu sehen. Links ist das Original digitalmikroskopische Aufnahme zu sehen. Das Bild wird in das LAB-Format transformiert und der L-Kanal des Bildes dargestellt. Durch eine Nearest-Neighbor-Klassifikation wird jeder Pixel des Bildes entweder als Partikel oder als Hintergrund zugeordnet. Im nächsten Schritt werden die Partikel segmentiert und gelabelt. Dadurch können die Partikelgrößen und die Partikelanzahl ausgelesen und so die Partikelgrößenverteilung berechnet werden.

#### 5 Fazit

In dieser Arbeit wird der aktuelle Stand der Gesetzgebung zur Messung von nicht-verbrennungsmotorischer Feinstaubemissionen aufgezeigt. Außerdem werden unterschiedliche Maßnahmen zur Verringerung dieser Emissionen analysiert und bewertet. Ebenso wird eine Methodik zur Messung Feinstaubemissionen trockenlaufender Friktionssysteme vorgestellt. Die Grundlage dafür bildet ein Schwungmassenprüfstand, der um ein Partikelmesssystem erweitert wurde. Ebenso wird eine Vorgehensweise zur Durchführung



Abb. 10 Vorgehen bei der digitalmikroskopischen Auswertung der Partikel

der Laststufen vorgestellt, in der der Einfluss der Beanspruchung auf die Emissionswerte untersucht werden kann.

In zukünftigen Untersuchungen gilt es die Methode und die Auswertungen weiter zu schärfen und die Durchführung der Laststufen, um den Einfluss des Beanspruchungskollektivs auf die Feinstaubemissionen zu bestimmen. Dafür ist es vorgesehen Korrelationsanalysen zwischen Beanspruchungskollektiv und Partikelaustritt durchzuführen. Außerdem sind Untersuchungen mit weiteren üblicherweise eingesetzten Frikionsmaterialien aus dem PKW- und Industriebereich geplant, um den Einfluss des Materials auf die Feinstaubemissionen zu ermitteln. Langfristig werden die Betrachtungen um die Wechselwirkungen des Frikionssystems, der Bremspaarung, mit der Aktorik sowie der Ansteuerung- und Regelungsalgorithmen erweitert werden.

**Funding** Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Literatur

- MANN+HUMMEL Bremsstaubpartikelfilter. <https://oem.mann-hummel.com/de/oem-produkte/feinstaubfilter/bremsstaubpartikelfilter.html>. Zugegriffen: 8. Nov. 2022
- Tallano Lösungen Zur Verringerung Der Feinstaubemissionen | Tallano. <https://www.tallano-technologies.com/de/>. Zugegriffen: 15. Jan. 2023
- Continental Automotive Continental Automotive. <https://www.continental-automotive.com/DE/Passenger-Cars/Passenger-Cars-Home/HighlightTopics/Zukunft-der-Trommelbremse>. Zugegriffen: 8. Nov. 2022
- DLRARTICLE DLR Portal ZEDU-1: Das im Betrieb umweltfreundlichste Auto der Welt. [https://www.dlr.de/content/de-artikel/news/2022/03/20220928\\_zedu-1-das-im-betrieb-umweltfreundlichste-auto-der-welt.html](https://www.dlr.de/content/de-artikel/news/2022/03/20220928_zedu-1-das-im-betrieb-umweltfreundlichste-auto-der-welt.html). Zugegriffen: 8. Nov. 2022
- Albers A, Bause K, Reichert U, Ott S (2017) Effects of driving functions' reorganization on subsystems in electric drive systems. In: Bargende M, Reuss H-C, Wiedemann J (Hrsg) Proceedings, Bargende, Reuss et al. (Hg.) 2017 – 17. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentchnik. Springer Vieweg, Wiesbaden
- Umweltbundesamt Entwicklung des Kraftfahrzeugbestands. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeugbestand#lange-der-verkehrswege> Zugegriffen: 20. Jan. 2023
- Bertling J, Hamann L, Bertling R (2018) Kunststoffe in der Umwelt
- (2020) Press release: Pollution from tyre wear 1,000 times worse than exhaust emissions. <https://www.emissionsanalytics.com/news/pollution-tyre-wear-worse-exhaust-emissions>. Zugegriffen: 20. Jan. 2023
- Selley L et al (2020) Brake dust exposure exacerbates inflammation and transiently compromises phagocytosis in macrophages. *Metalomics: integrated biometal science* 12(3):371–386. <https://doi.org/10.1039/c9mt00253g>
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg Feinstaub (PM10)-Emissionen des Straßenverkehrs in Baden Württemberg seit 1995. <https://www.statistik-bw.de/Umwelt/Luft/11a07aub.jsp>. Zugegriffen: 20. Jan. 2023
- Rose D, Boger T, Wu H, Ingram-Ogunwumi R (2021) MTZ Motortech Z. <https://doi.org/10.1007/s35146-021-0709-2>
- Kraftfahrbundesamt Jahresbilanz. [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Jahresbilanz\\_Neuzulassungen/jahresbilanz\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Jahresbilanz_Neuzulassungen/jahresbilanz_node.html). Zugegriffen: 23. Jan. 2023
- Awe SA (2019) Developing Material Requirements for Automotive Brake Disc. *MCMS*. <https://doi.org/10.33552/MCMS.2019.02.000531>
- (2023) Working Party on Pollution and Energy—Introduction | UNECE. <https://unece.org/transport/vehicle-regulations/working-party-pollution-and-energy-introduction>. Zugegriffen: 20. Jan. 2023
- Informal Working Group on non-exhaust for Particulate Measurement Programme (2022) Proposal for a new UN GTR on laboratory measurement of brake emissions for light-duty vehicles
- Filer G (2022) Bremsen-Partikelmesssystem für Nicht-Abgas-Emissionen im Rahmen der Euro 7. *ATZ Automobiltech*. <https://doi.org/10.1007/s35148-022-1512-1>
- Utsch P (2021) Paradigm shift in the world of brake technology
- Geimer M, Pohlandt C (2014) Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. KIT Scientific, Karlsruhe (<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0072-394436>)
- Albers A, Behrendt M, Klingler S, Matros K (2016) Handbuch Produktentwicklung – Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess (Kapitel 6). In: Lindemann U (Hrsg) Handbuch Produktentwicklung. Carl Hanser, München, S 541–569
- Albers A, Ott S, Klotz T (2018) Abschlussbericht FVA Forschungsvorhaben Nr. 737 I: Anwendungsfallsspezifische Leistungsgrenzen von Frikionspaarungen mit organischen, -sintermetallischen, -keramischen oder kombinierten Frikionswerkstoffen