

BrakeClean: Produkt- und Prozessentwicklung für nachhaltige Bremsen im Automobilbereich

Die stetige Reduktion von Feinstaub im Fahrzeugabgas durch eine entsprechende Nachbehandlung z. B. mit Katalysatoren führt dazu, dass nichtmotorische Emissionen wie Straßen-, Reifen- und Bremsenabrieb immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit rücken. Insbesondere der Bremsenabrieb weist aufgrund der zunehmenden mittleren Fahrzeuggewichte trotz des steigenden Anteils an Fahrzeugen mit Energierückgewinnung durch Rekuperation einen zunehmenden Anteil an den Gesamtfahrzeugaussparungen auf. Eine europäische gesetzliche Reglementierung besteht bisher nur für die Abgasemissionen, jedoch sollen mit der 2025 in Kraft tretenden Euro-7-Norm erstmalig auch Grenzwerte für die PM₁₀- und PM_{2,5}-Emissionen des Bremsenabriebs eingeführt werden.

Um dazu beizutragen, diese Grenzwerte einhalten zu können, wird im vom BMWK geförderten Projekt BrakeClean, das am 01.01.2023 startete, das Bremssystem an sich auf potentielle Stellschrauben zur Reduktion von Feinstaubemissionen hin untersucht. Um gleichzeitig auch die CO₂-Emissionen bei der Herstellung zu senken, soll die zu entwickelnde Bremse das Produkt einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft sein, indem eine gewichtsreduzierte und verschleißarme Bremsscheibe in Sandwichform entwickelt wird. Der Trägerkörper der Bremsscheibe wird dabei aus Sekundäraluminium in einem Ein-Schritt-Gießverfahren hergestellt. Auf die Trägerkörperoberfläche wird eine partikelverstärkte Reibfläche aus einem Metall-Matrix-Komposit (Vorderachse) bzw. Aluminium-Matrix-Komposit (Hinterachse) stoffschlüssig über Sinterverfahren aufgebracht. Im Endbearbeitungsprozess wird die Bremsscheibe auf eine definierte Dicke abgedreht und gleichzeitig ein Tribofilm mit neuartiger Bearbeitungstechnik auf die Reibfläche aufgetragen. Das Aufbringen des Tribofilms ist notwendig, um eine sofortige Bremswirkung zu gewährleisten, denn dieser Bremsprozess beruht im Wesentlichen auf der Adhäsion und nicht länger alleinig auf der Reibung. Hierdurch soll nicht nur die Lebensdauer der Bremsscheibe deutlich erhöht, sondern auch die Staubbildung minimiert werden.

Während verschiedene Projektpartner am Herstellungsprozess der Bremsscheiben beteiligt sind, ist IUTA für die Messung und Evaluierung der Bremsstaubemissionen verantwortlich. Das Messverfahren folgt dabei einem Vorschlag für eine standardisierte Methode zur Bestimmung von Emissionsfaktoren (EF). Die Arbeitsgruppe Particle Measurement Program (PMP) hat dafür die Prüfvorschrift UN Global Technical Regulations (GTR) No. 24 ausgearbeitet.

Um eine repräsentative Probenahme des Bremsstaubs gewährleisten zu können, sieht die Prüfvorschrift vor, das gesamte Bremssystem an einem Schwungmassenprüfstand vollständig einzuhausen. Die simulierte Trägheit des Fahrzeugs mit Schwungmassen ermöglicht zudem realistische Bremszeiten und Belastungen. Über die Steuerung der Wellendrehzahl und des Bremsvorgangs (Bremsdruck, Verzögerungszeiten) können spezifische Fahrzyklen wie z. B. der Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure (WLTP) nachgebildet werden.

Die Bremse wird von zuvor konditionierter und gefilterter Luft überströmt. Zu- und abluftseitig von der eingehausten Bremse befindet sich ein Stutzen, der den Übergang zu einer Rohrströmung ermöglicht. Für eine gleichmäßige Anströmung der Bremse muss eine geeignete Strömungsgleichrichtung erfolgen. Ausgelegt und optimiert wurden Gleichrichter verschiedener Geometrien wie z. B. Lochbleche mit unterschiedlichen Lochdurchmessern und Teilungen, Drahtgitter und Filtermatten. Die Durchführung von Simulationen wurde zusätzlich von experimentellen Untersuchungen unterstützt. So konnte ein Gleichrichter ermittelt werden, der trotz geringen Druckverlustes für eine hohe Gleichmäßigkeit der Anströmung sorgt. Beim Bremsvorgang freigesetzter Abrieb strömt luftgetragen in den Abluftkanal und kann nach Homogenisierung der Strömung an vier gleichmäßig über den Rohrquerschnitt verteilten isokinetischen Teilstromprobenahmen entnommen werden. Der vollständige Aufbau mitsamt der Zu- und Abluftverrohrung und der Einhausung der Bremse wurde mit Unterstützung von CFD-Simulationen ausgelegt und konstruiert. Der Aufbau soll Anfang des Jahres 2024 erfolgen.

Zur Bestimmung der EF müssen messtechnisch folgende Aspekte berücksichtigt werden: Die EF beziehen sich zum einen auf die im Mittel pro Kilometer von der Bremse emittierte Masse der Feinstaubfraktionen PM_{10} und $PM_{2,5}$, basierend auf dem jeweiligen Fahrzyklus. Zum anderen soll die emittierte Partikelanzahl pro gefahrenem Kilometer angegeben werden. Zur Bestimmung der PM_{10} - und $PM_{2,5}$ -Massenkonzentrationen dienen Partikelsammler mit vorgeschalteten Trägheitsabscheidern. Die beprobten Quarzfilter werden vor und nach der Beladung gewogen. Durch Kenntnis des Verhältnisses von Kühlluft- zu Probenahmenvolumenstrom kann die gesamte während des spezifischen Fahrzyklus emittierte Partikelmasse bestimmt werden. Die Filter lassen sich nach der Wägung zudem chemisch analysieren, um die Zusammensetzung des Bremsstaubs quantitativ beurteilen zu können. Zur Bestimmung der gesamten Anzahlkonzentration für Partikel > 10 nm wird ein Kondensationspartikelzähler verwendet.

Zur zeit- und größen aufgelösten Erfassung der Emissionen kommen ein Fast Mobility Particle Sizer und ein optisches Partikelspektrometer zum Einsatz. Die Kombination deckt den gesamten Größenbereich von 5,6 nm bis 10 μ m mit einer Zeitauflösung von bis zu 1 Hz ab. Des Weiteren wird ein Kaskadenimpaktor genutzt, um feiner aufgelöste Größenbereiche (14 Trennstufen im Bereich von 15 nm – 10 μ m) chemisch und/oder rasterelektronenmikroskopisch analysieren zu können. Die aufgeführte Messtechnik konnte vollständig aus Projektmitteln beschafft und der komplette Prüfaufbau, der am Schwungmassenprüfstand eines Projektpartners betrieben wird, aufgebaut werden. Die Hauptuntersuchungen sollen mit den aluminiumbasierten Brems scheiben u. a. mit unterschiedlichen Dimensionen der Scheibe und verschiedenen Zusammensetzungen des Tribofilms erfolgen. Als Referenz sollen zudem herkömmliche Grauguss scheiben untersucht werden.

Neben den Bremsenuntersuchungen am Schwungmassenprüfstand soll ein neuartiges, kompaktes Bremsstaubmesssystem entwickelt werden, das in Testfahrzeuge integriert und auf einem Rollenprüfstand eingesetzt werden kann. Dieses Messsystem soll schließlich mit den Ergebnissen der GTR-konformen Einhausung am

Schwungmassenprüfstand verglichen werden. Eine große Herausforderung stellt der begrenzte Bauraum im Radkasten dar, wodurch die Einhausung der Bremse miniaturisiert werden muss. Aufgrund dessen strömt ein niedrigerer Luftvolumenstrom über die Bremse, was zu erhöhten Bremsscheibentemperaturen führen kann. Ebenso können Partikelverluste in zu scharfen Krümmungen der Transportleitungen drastisch zunehmen. Hier müssen Vorkehrungen wie z. B. eine externe Kühlung oder Geometrieanpassungen getroffen werden, um diese Effekte bestmöglich zu reduzieren. Eine weitere große Herausforderung stellt die Abdichtung der Einhausung dar, da eine Leckage zur Vermischung des sauber zugeführten Kühlluftstroms mit nicht sauberer Außenluft führen kann. Die Umsetzung der miniaturisierten Einhausung im Fahrzeug ist für das zweite Projektjahr geplant.

Förderhinweis:

Das Projekt BrakeClean wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Förderprogramm Innovative Fahrzeuge gefördert und von der TÜV Rheinland Consulting GmbH administrativ begleitet.



**Finanziert von der
Europäischen Union**
NextGenerationEU

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages