

SESSION **3.2, Prof. Michael Koch**
Sustainable Mobility
Power Management and Emission Reduction
Advanced Brake and Suspension Systems

Characterization of particulate emissions of vehicle wheel brakes

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Augsburg

Head of Department

Technical University Ilmenau
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Automotive Engineering
PF 10 05 65
D-98684 Ilmenau
Phone: +49 (0) 3677 69 3842
Email: klaus.augsburg@tu-ilmenau.de

PhD student Rüdiger Horn

Scientific-Technical Coordinator

Technical University Ilmenau
Thuringian Centre of Innovation in Mobility
PF 10 05 65
D-98684 Ilmenau
Phone: +49 (0) 3677 69 3890
Email: ruediger.horn@tu-ilmenau.de

PhD student Hannes Sachse

Scientific Assistant

Technical University Ilmenau
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Automotive Engineering
PF 10 05 65
D-98684 Ilmenau
Phone: +49 (0) 3677 69 1894
Email: hannes.sachse@tu-ilmenau.de

Abstract

The more and more restrictive environmental legislation requires a consideration of emitters beyond traditional combustion engine. At this, the particulate emissions of the brake play a crucial role. A future reduction will be possible only under consideration of the particles from the friction zone between brake disc and pads.

Target is the characterization of these emissions by developing methods for analyses of expansion and agglomeration. This will be the basis for a future development of measures to reduce emissions.

Firstly, physical analyses were made for characterization. Therefore latest measuring technologies were used, such as scanning electron microscopy and laser light scattering systems. Methods were developed and implemented for sample preparation and study of influence parameters at an air-conditioned brake and chassis test bench. Hence the brake particles were profound analyzed. This resulted in boundary conditions for subsequent researches. Measure of particle loaded flow could be executed with the Particle Image Velocimetry. Furthermore the brake was simulated for the analyses of not measurable properties with computational fluid dynamics and validated with the above mentioned optical measuring system.

Novelty value

Till today a holistic visualization of brake emissions, which combines analyses of particle loaded flow with physical examinations, couldn't be found in published papers yet.

1. Einleitung

Vor dem Hintergrund eines größer werdenden Umweltinteresses und der stetigen Verschärfung der Abgasnormen rücken bisher unbeachtete Emittenten in den Focus der Entwicklung. Galt bisher der Verbrennungsmotor als Hauptverursacher von Emissionen, so haben die Fortschritte der letzten Jahrzehnte auf dem Gebiet der Abgasnachbehandlung das Verhältnis zwischen den Emissionsquellen deutlich verschoben. Eigene Untersuchungen [3] und Recherchen, wie z.B. von Gasser [1] oder dem Bundesumweltamt Österreich [2], belegen die gesundheitliche Relevanz von außermotorischen Fahrzeugemissionen. Es konnte mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskop (REM) Untersuchungen, wie nachfolgend zu sehen, die Partikelgröße ermittelt werden. Es handelte sich hierbei um während der Bremsung auf der Felgenoberfläche abgelagerte Partikel. Diese konnten in der Mehrzahl eindeutig dem Größenbereich kleiner 1 μm zugeordnet werden.

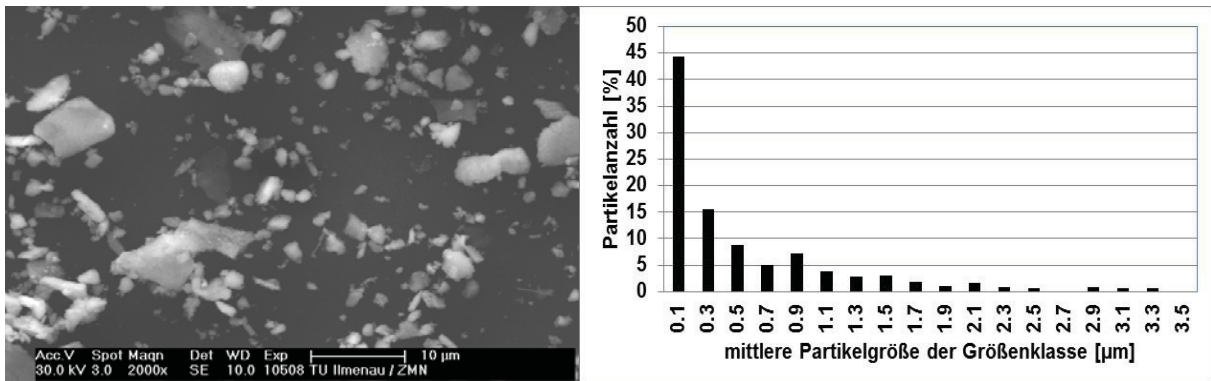


Abb. 1: REM Messung zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung; $v = 150\text{-}80 \text{ km/h}$, $a = -0,4g$

Diese Partikelgrößen liegen deutlich im lungengängigen und damit dem gesundheitlich relevanten Bereich. Ein erster Vergleich der emittierten Partikelmenge während einer Autobahnbremsung, gemessen direkt nach Sattel, mit der emittierten Partikelmenge eines Diesel PKW's, gemessen bei 4000 1/min direkt am Abgasendrohr, zeigte, dass auch die Partikelanzahl vergleichbar ist.

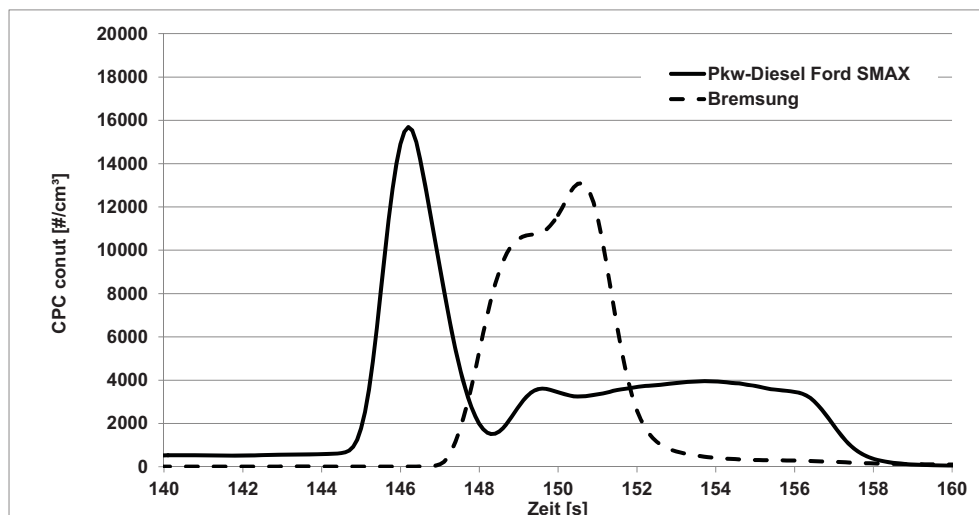


Abb. 2: Messung mittels Condensations Particle Counter (CPC) zur Bestimmung der Partikelkonzentration

Dieser Problematik nimmt sich die vorgestellte Arbeit an und versucht mithilfe der PIV die partikelbeladene PKW-Radhausströmung, hervorgerufen durch die Verschleißpartikel der Reibungsbremse zu charakterisieren.

2. Messmethodik

Bei der Entwicklung einer geeigneten Messmethodik für die Charakterisierung der partikelbeladenen Strömung bestand die Herausforderung nicht ausschließlich darin, eine Aussage über den Strömungszustand, sondern auch über das Ausbreitungsverhalten der von der Bremse emittierten Partikel zu erhalten. Hierfür konnte das PIV Messsystem genutzt werden. Für die konventionelle PIV Messung wurden Partikel in Form einer speziellen Seedingflüssigkeit, welche der Strömung folgen, in das zu betrachtende System eingebracht und mittels definierter Laserpulse sichtbar gemacht. Dies ermöglichte die Aufnahme eines Doppelbildes, also eines Bildpaares, mithilfe eines geeigneten Kamerasystems. Der zeitliche Abstand zwischen den Bildern und die Positionsänderung, also der zurückgelegte Weg, der einzelnen Partikel ermöglichte die Berechnung eines Geschwindigkeitsvektorfeldes. Es wurde eine Prüfumgebung geschaffen, welche an einem vollklimatisierten Schwungmassenprüfstand die Strömungsmessungen für die Charakterisierung der partikelbeladenen Strömung sowie die Validierung der Simulation ermöglichte. Es kamen, wie nachfolgend beispielhaft zu sehen, unterschiedliche Prüfaufbauten zum Einsatz.

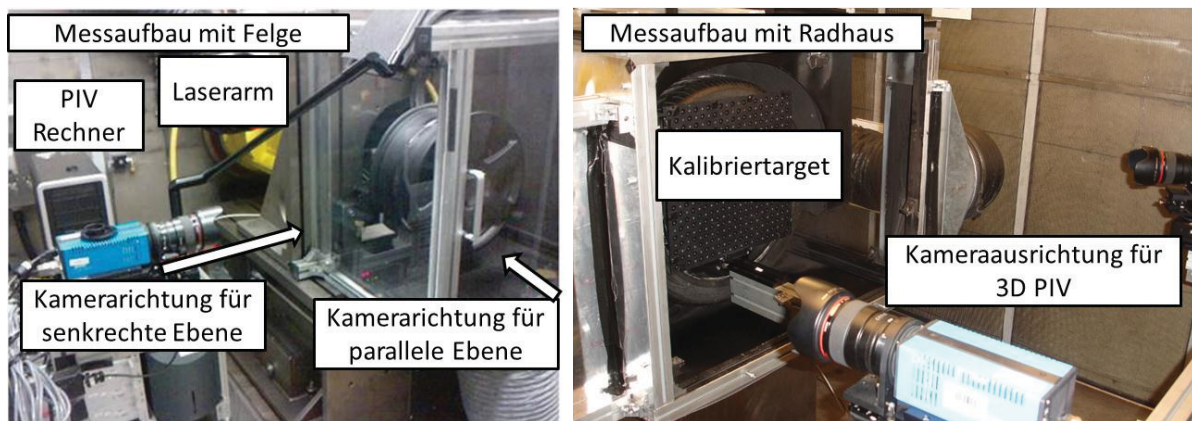


Abb. 3: Unterschiedliche Prüfaufbauvariationen; links Variante 1; rechts Variante 2

3. Partikelvisualisierung

Im Unterschied zu beschriebenen PIV Methodik wurden direkt die Bremsenpartikel visualisiert, durch die Auswertung eines Bildes des aufgenommenen Bildpaares, was die Beschreibung der Ausbreitung während einer Bremsung ermöglichte. Limitierender Faktor für die zeitliche Auflösung ist die Speicherschreibgeschwindigkeit der Digitalkameras (10Hz bei 1024x1024) bzw. die maximale Pulsfrequenz des Lasers von 15 Hz. Eine Verdopplung der Bildfrequenz konnte erzielt werden, durch die Auswertung beider Bilder des Bildpaares, indem der zeitliche Abstand zwischen den Bildern dem halben Pulsabstand eines Lasers entspricht. In einer ersten Betrachtung war das Verhalten parallel zur Scheibe und direkt nach der Reibpaarung Bremsbelag-Scheibe von Interesse. Hierfür fand Prüfvariante 1 Anwendung. Um die optische Zugänglichkeit zu ermöglichen, wurde der Aufbau auf die Bremse beschränkt, wie nachfolgend dargestellt ist.

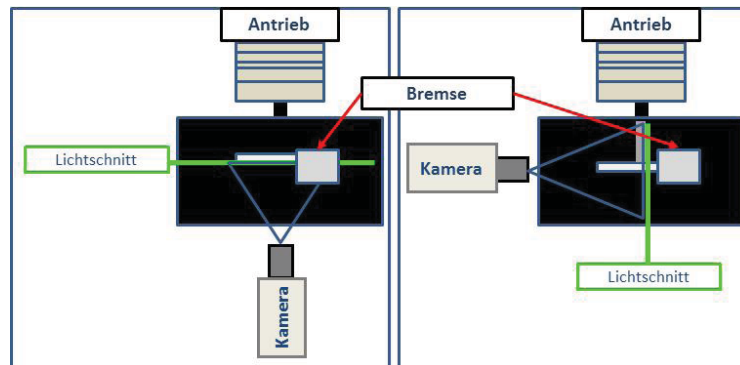


Abb. 4: Messaufbau für die Partikelvisualisierung; links parallel zur Scheibe; rechts senkrecht zur Bremscheibe nach dem Bremssattel

Es ist in Abbildung 5 zu erkennen, wie die Partikel sich tangential von der Scheibe wegbewegen und zum Großteil auch der Scheibenrotation folgen. Aufgrund von Abschattungseffekten durch Sattel und Radnabe, war die vollständige Betrachtung der Scheibe nicht möglich und damit nicht die Beurteilung des Bereiches größer 130° nach Sattel. Aus diesem Grund wurde die Drehrichtung der Scheibe geändert, was eine näherungsweise Aussage über den erweiterten Scheibenbereich ermöglichte.

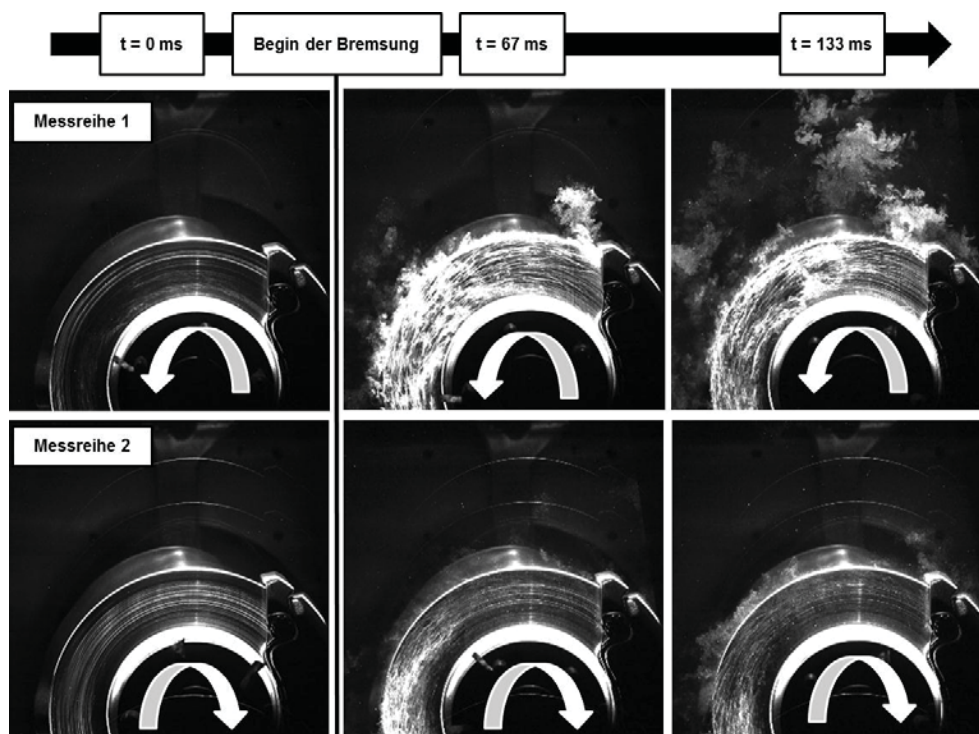


Abb. 5: Visualisierung der Partikelemissionen parallel zur Bremscheibe zu Beginn der Bremsung ($v_{\text{start}} = 150 \text{ km/h}$, $a = -0,4g$) in unterschiedlichen Drehrichtungen

Es ist deutlich zu sehen, dass die von der Scheibe mitbewegten Partikel diese im Bereich um 180° nach Sattel ebenfalls verlassen und nur noch ein geringer Teil der Scheibe folgt. Die tangentielle Ausbreitung der Partikel nach dem Sattel kann ebenfalls in Abbildung 6 bestätigt werden. Es ist gut zu erkennen, dass zu Beginn der Bremsung die entstehende Partikelwolke räumlich sehr begrenzt ist, was den Schluss nahe legt, dass die Partikel auf den Betrachter zukommen.

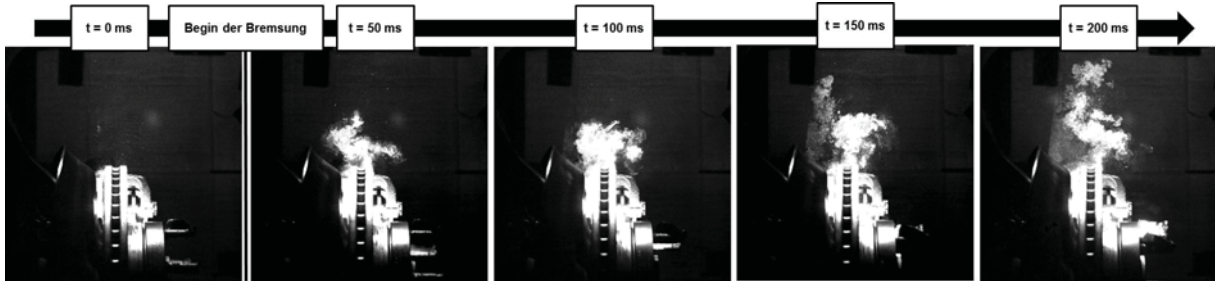


Abb. 6: Visualisierung der Partikelemissionen senkrecht zur Scheibe zu Beginn der Bremsung ($v_{\text{start}} = 150$ km/h, $a = -0,4g$)

4. Simulationsmodell und Validierung

Für eine detailliertere Betrachtung des Partikelverhaltens war die messtechnische Umsetzung nicht mehr zielführend, da hier der Aufwand unverhältnismäßig hoch bzw. die Umsetzbarkeit nicht mehr gegeben war. Aus diesem Grund fand die numerische Strömungssimulation CFD mit der Software Fluent13 Anwendung. Es erfolgte der stufenweise Aufbau eines Simulationsmodells, welches zunächst die reine Bremsenumgebung abbilden konnte und in der letzten Ausbaustufe das vollständige Fahrzeugradhaus. Die Netzerstellung erfolgte in einem iterativen Entwicklungsprozess der eine Kompromisslösung zwischen Aufwand, Zellanzahl und Ergebnisqualität darstellte. Es wurden Oberflächennetze mit einem Spacing ≤ 2 mm für besonders relevante Bauteile, wie z.B. Bremsattel und Bremsbeläge, erstellt. Hierauf aufbauend fand ein geometrieadaptives Volumennetz mit einem Zellwachstum $\leq 1,2$ Anwendung. Für die eigentliche Simulation wurde die RANS Methode genutzt und ein geeignetes Turbulenzmodells ausgewählt. Gefundene Veröffentlichungen, wie z.B. von Körner [5] und Wäschle [6], konnten bereits eine Vorempfehlung geben, welche durch den Vergleich unterschiedlicher Modelle bestätigt wurde. Grundsätzlich wurden das k-e-, k-w- sowie k-w-SST-Modell getestet, mit dem Ergebnis das die kombinierte Anwendung von k-e und k-w im k-w-SST Modell die besten Ergebnisse erzielte, wie in nachfolgender Abbildung zu sehen ist. Es sind gut die Einflüsse der Felge, durch die einzelnen Felgentaschen zu erkennen, was auch durch die Validierung in Abbildung 8 bewiesen wird.

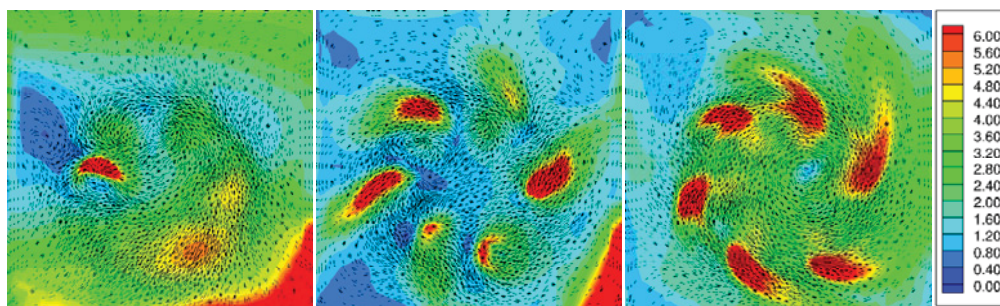


Abb. 7: Vergleich k-e(links); k-w(mitte);k-w-SST(rechts); Betrachtung der Geschwindigkeitsamplituden in einer Ebene parallel vor der Felge; $v = 100$ km/h

Eine besondere Herausforderung bestand in der Abbildung der rotierenden Teile, wofür softwaretechnisch prinzipiell 3 Möglichkeiten zur Verfügung stehen. Man unterscheidet zwischen bewegten Wänden „MW“, mitbewegten Bezugssystem „MRF“ und bewegten Gittern. Die bewegten Gitter konnten aufgrund des Rechenaufwandes ausgeschlossen werden, da der Anspruch bestand, später auch Geo-

metrieviationen in einem vertretbaren Aufwand umsetzen zu können. Der Ansatz der bewegten Wände ist ebenfalls ungeeignet, da es sich im Fall der Bremsscheibe und der Felge, um keine einfachen rotierenden Vollscheiben sondern unterbrochene Strukturen handelt, wodurch z.B. die Bereiche der Felgenöffnungen nicht richtig behandelt werden. Somit fand die MRF Methode Anwendung. Es konnte hierbei die große Ergebnisabhängigkeit von der Zonengrenze, des mitbewegten Bereiches festgestellt werden. So zeigten eigene Untersuchungen, dass diese mit einem Abstand deutlich kleiner 5 mm, um die rotierende Geometrie zu legen ist. In Abbildung 8 sind die deutlichen Vorteile der MRF Methode zu erkennen, wohingegen MW nahezu keine Übereinstimmung erzielen kann. Beim Vergleich von MRF und Messung zeigt sich eine gute qualitative Übereinstimmung bei einer leichten Amplitudenüberhöhung. Insbesondere Details, wie der große Wirbel im rechten Bildbereich über der Speiche, können sehr gut wiedergegeben werden.

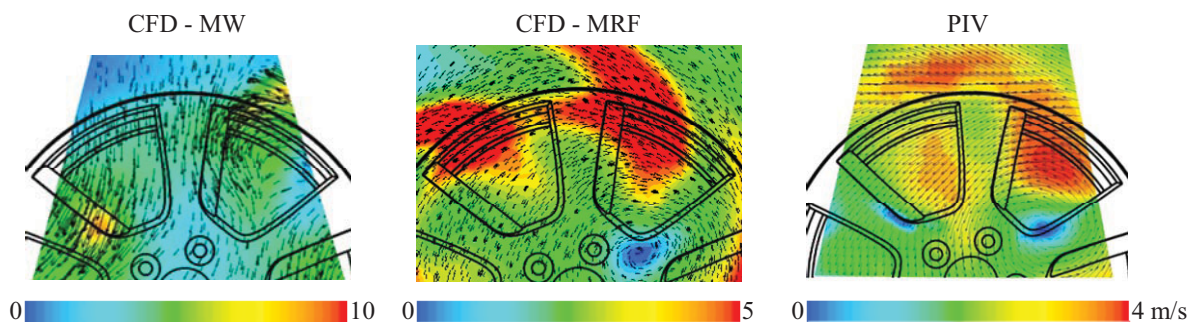


Abb. 8: Vergleich Simulation mit MW(2.v. links), MRF(2.v.rechts) und Messung(rechts); Betrachtungsebene parallel zur Felge; Darstellung x-y Geschwindigkeit; $v = 100 \text{ km/h}$

Das vorgestellte Simulationsmodell bildete die Grundlage für eine exaktere Betrachtung der Partikel ausbreitung. Hierfür wurden Partikel im Bereich der Reibzone in das System eingebracht und deren Partikelflugbahn berechnet. Es bestätigte sich das bereits beschriebene Verhalten der von der Scheibe mitgezogenen Partikel. Es zeigte sich weiterhin, dass nicht nur Partikel durch die Felgentasche zur Vorderseite des Rades gelangen sondern auch über den Reifen.

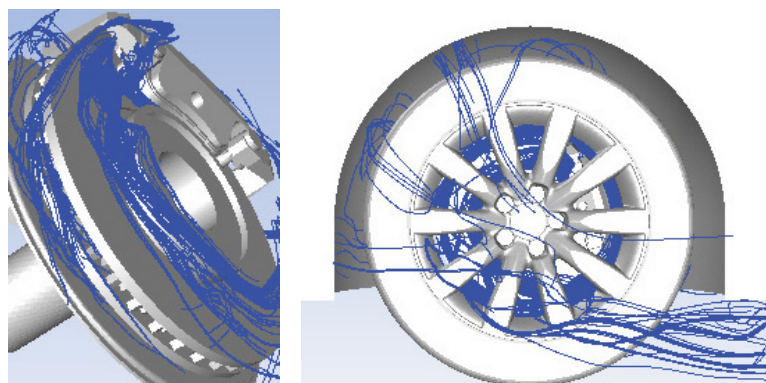


Abb. 9: Simulation der Partikelflugbahnen; Darstellung Bremsenumgebung (links) und Rad (rechts); $v = 150 \text{ km/h}$; (einzelne Bauteile sind für eine bessere Erkennbarkeit der Partikelbahnen teilweise ausgeblendet)

Dies ist besonders im Hinblick auf die gezielt Vermeidung von Partikeln interessant, da nicht nur die erwarteten Ausbreitungspfade durch die Felge zu beachten sind.

Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten konnte mittels physikalischer Analysen das gesundheitliche Gefährdungspotential von Partikelemissionen der Bremse aufgezeigt werden. Zwei Visualisierungsmethoden wurden erarbeitet, welche die Beschreibung der luftgetragenen Partikelemissionen ermöglichten. Die Partikel Image Velocimetry (PIV) Messung ermöglichte die Ermittlung von Geschwindigkeitsvektorfeldern in einer hierfür aufgebauten Prüfumgebung zur Beschreibung des Strömungszustandes und zur Validierung von CFD Simulationen. Die zweite Methode stellte eine Abwandlung der herkömmlichen PIV Messung dar und zeigte das direkte Ausbreitungsverhalten der Partikel. Kombiniert mit der parallel durchgeführten CFD Simulation war es möglich, die partikelbeladene Strömung zu charakterisieren. Es konnte gezeigt werden, dass Partikel nach Ihrer Entstehung am Sattel zum Großteil der Scheibenbewegung folgen. Weiterhin war zu erkennen, dass die Bewegung durch die Felge abhängig vom Felgendesign und der Bremsenkühlluft ist. Es ergab sich zusätzlich ein Partikelstrom durch die Felgentaschen, sowie einen Partikeltransport von der Felgenrückseite über den Reifen zur Felgenvorderseite.

Die erarbeiteten Methoden sind die Grundlage für zukünftige Arbeiten, welche eine Minimierung der Emissionen im Fokus haben.

Literatur

- [1] M.Gasser, M.Riediker, L. Mueller, A.Perrenoud, F.Blank, P.Gehr, B. Rothen-Rutishauser, 2009: „Toxic effects of brake wear particles on epithelial lung cells in vitro“, Institute for Anatomy, Division of Histology, University of Bern, Bern, Switzerland; Institute for Work and Health; University of Lausanne and Geneva, Lausanne, Switzerland
- [2] Environmental Agency of Austria (Umweltbundesamt Österreich)
- [3] J. Münchhoff, Audi AG; K. Augsburg, R.Horn, H. Sachse TU Ilmenau, 2010: „Method for visualization and handling of brake dust emissions“, Chassis Tech, München
- [4] „ANSYS FLUENT User Guide“, ANSYS, Inc. Canonsburg, USA 2010
- [5] M. Körner, 2009: „Numerische Simulation der Umströmung und des Wärmeübergangs an PKW-Scheibenbremsen“, Institut für Strömungsmechanik TU Braunschweig, Shaker-Verlag
- [6] A. Wäschle, 2006: „Numerische und experimentelle Untersuchungen des Einflusses von drehenden Rädern auf die Fahrzeugaerodynamik“, Universität Stuttgart, Expert-Verlag