



Ralph Mayer *Hrsg.*

# XXXVIII. Internationales $\mu$ -Symposium 2019 Bremsen-Fachtagung

XXXVIII. International  $\mu$ -Symposium 2019  
Brake Conference

*October 25th 2019, Düsseldorf/Germany  
Held by TMD Friction EsCo GmbH, Leverkusen*



**TMD**FRICTION  
A NISSHINBO GROUP COMPANY

 Springer Vieweg

# Proceedings

Ein stetig steigender Fundus an Informationen ist heute notwendig, um die immer komplexer werdende Technik heutiger Kraftfahrzeuge zu verstehen. Funktionen, Arbeitsweise, Komponenten und Systeme entwickeln sich rasant. In immer schnelleren Zyklen verbreitet sich aktuelles Wissen gerade aus Konferenzen, Tagungen und Symposien in die Fachwelt. Den raschen Zugriff auf diese Informationen bietet diese Reihe Proceedings, die sich zur Aufgabe gestellt hat, das zum Verständnis topaktueller Technik rund um das Automobil erforderliche spezielle Wissen in der Systematik aus Konferenzen und Tagungen zusammen zu stellen und als Buch in Springer.com wie auch elektronisch in Springer Link und Springer Professional bereit zu stellen. Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die aktuelles Fachwissen im Zusammenhang mit Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes suchen. Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik finden hier die Zusammenstellung von Veranstaltungen, die sie selber nicht besuchen konnten. Gutachtern, Forschern und Entwicklungsingenieuren in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie Dienstleistern können die Proceedings wertvolle Antworten auf topaktuelle Fragen geben.

Today, a steadily growing store of information is called for in order to understand the increasingly complex technologies used in modern automobiles. Functions, modes of operation, components and systems are rapidly evolving, while at the same time the latest expertise is disseminated directly from conferences, congresses and symposia to the professional world in ever-faster cycles. This series of proceedings offers rapid access to this information, gathering the specific knowledge needed to keep up with cutting-edge advances in automotive technologies, employing the same systematic approach used at conferences and congresses and presenting it in print (available at Springer.com) and electronic (at Springer Link and Springer Professional) formats. The series addresses the needs of automotive engineers, motor design engineers and students looking for the latest expertise in connection with key questions in their field, while professors and instructors working in the areas of automotive and motor design engineering will also find summaries of industry events they weren't able to attend. The proceedings also offer valuable answers to the topical questions that concern assessors, researchers and developmental engineers in the automotive and supplier industry, as well as service providers.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13360>

Ralph Mayer  
Hrsg.

# XXXVIII. Internationales $\mu$ -Symposium 2019 Bremsen-Fachtagung

XXXVIII. International  $\mu$ -Symposium  
2019 Brake Conference October 25th 2019,  
Düsseldorf/Germany Held by TMD Friction  
EsCo GmbH, Leverkusen

 Springer Vieweg

*Hrsg.*  
Ralph Mayer  
Ingolstadt, Deutschland

ISSN 2198-7432                      ISSN 2198-7440 (electronic)  
Proceedings  
ISBN 978-3-662-59824-5              ISBN 978-3-662-59825-2 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59825-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Markus Braun

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

# Vorwort

Liebe Mitglieder des  $\mu$ -Clubs und Gäste des  $\mu$ -Symposiums,  
sehr geehrte Leser unseres Tagungsbands,

vor 40 Jahren trafen sich auf Initiative von George Naoum erstmals Bremsenfachleute aus unterschiedlichen Institutionen zu einem gemeinsamen Erfahrungsaustausch: die Geburtsstunde des  $\mu$ -Clubs. Es ist kein Selbstzweck, dass die Traditionsveranstaltung unter den Bremsenfachtagungen anlässlich dieses runden Geburtstages sich an einem neuen Ort versammelt. Waren wir in der Vergangenheit trotz mancher Beiträge aus dem Bereich Luft- und Schienenfahrzeuge stets auf das Automobil fokussiert, so hatten wir mit Bad Neuenahr eine Konstante, die vornehmlich auch nur mit diesem gut erreichbar war. Vorträge, hieraus resultierende Diskussionen und darüber hinaus geführte Fachgespräche mögen ebenso in gedeihlicher Erinnerung für die Weiterentwicklung der Bremsentechnik sein wie manch individuelle Erfahrung nach dem Offiz. Die Classic Remise in Düsseldorf soll künftig die Heimat des  $\mu$ -Symposiums sein. Einst als Ringlokschuppen gebaut und genutzt befinden wir uns im Umfeld der Automobilhistorie, wo vielleicht auch manche technische Errungenschaft aus den Unternehmen und Institutionen der Mitglieder im  $\mu$ -Club der Nachwelt erhalten bleibt. Wir ziehen damit an einen für die Fahrzeugtechnik würdigen Ort.

Es ist meinem Vorgänger Prof. Breuer zu verdanken, dass mit der Erweiterung auf sechs Vorträge und der zweisprachigen Publikation ein international anerkanntes Forum der Bremsentechnik geschaffen wurde. Dies zeigt auch das große Interesse an unserem Tagungsband, der seit letztem Jahr sowohl in Printform als auch online verfügbar ist. Mehrere tausend Abfragen, ob einzelner Beiträge oder als Gesamtwerk, geben mittlerweile Zeugnis davon.

Auch 2019 widmet sich das  $\mu$ -Symposium vielen Facetten aus dem Umfeld von Bremssystemen. Die Problematik von Hitzerissbildung in Lkw-Bremscheiben von der Ursache bis zur Prognose (*TU Darmstadt*) gehört dazu wie auch die intensive Betrachtung der Bremsflüssigkeit hinsichtlich ihrer Anforderungen und Leistungsfähigkeit (*Clariant*). Hohe Aktualität bringen zwei Beiträge mit sich, die eine Elektrifizierung von Einzelkomponenten aber auch des

Antriebsstrangs im Fokus haben: elektromechanische Aktuatoren bieten oftmals einen funktionellen Mehrwert gegenüber etablierter Technik, stellen aber auch eine Herausforderung im Bereich NVH dar (*ZF Group*). Fast zeitgleich mit der Markteinführung erhält der  $\mu$ -Club tieferen Einblick in das rekuperative Bremssystem eines neuen Elektrofahrzeugs (*Porsche*). Analog zum Leitbild des Vereins Deutscher Ingenieure – VDI tragen wir als Beteiligte an der Forschung und Entwicklung zukünftiger Mobilität Verantwortung für Mensch, Natur, Umwelt und Gesellschaft. So ist es naheliegend, auch in diesem Jahr das Themenfeld Bremsemissionen zu berücksichtigen. Diesmal liegt der Schwerpunkt bei einer Differenzierung von Partikelmasse und –anzahl in Abhängigkeit verschiedener Reibmaterialien (*TMD Friction*). Das Mobilitätsbedürfnis begleitet die Menschheit seit Anbeginn. Technischer Fortschritt eröffnet das Potenzial neuer Lösungen, welche wir an den Herausforderungen und Chancen von Lufttaxi zur Diskussion stellen (*CTC/Airbus*).

Die jüngsten Veränderungen im  $\mu$ -Club durch erweiterte Publikationsform und neuen Tagungsort sollen unserer Branche weiterhin bestmögliche Gelegenheit zur Weiterbildung und Vernetzung abseits mancher Zwänge und Zeitnot, die das Tagesgeschäft mit sich bringt, bieten. Wir wünschen allen Teilnehmern aus Industrie, Forschung und Bildung eine angenehme und zufriedenstellende Konferenz. Neben den Referenten gilt unser Dank an dieser Stelle für Planung und Organisation Frau Petito und Herrn Wagner für die redaktionelle Unterstützung.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralph Mayer  
Präsident  $\mu$ -Club

David Baines  
CEO TMD Friction Group SA

# Foreword

Dear members of the  $\mu$ -Club and guests of the  $\mu$ -Symposium,  
dear conference programme reader,

40 years ago, at George Naoum's request, brake experts from various institutions met for the first time to exchange experiences: the  $\mu$ -Club was born. The traditional event among the brake specialists' conferences on the 40th anniversary has moved to a new location. In the past, Bad Neuenahr was the constant in the automobile sector, but contributions to aircraft and rail industries were also made. Presentations, discussions, and expert talks will help foster the further development of brake technology from the diverse visitors who bring their experiences back to the office. The Classic Remise in Düsseldorf will be the new home of the  $\mu$ -Symposium. When it was built, the building was used as a circular engine shed. Today, we find ourselves in the midst of automotive history, where technical achievements from the companies and institutions belonging to the  $\mu$ -Club will be preserved for posterity. We're moving to a place worthy of automotive engineering.

It is thanks to my predecessor Prof. Breuer that we created an internationally recognized forum for brake technology, expanding to six lectures and a bilingual publication. Our conference programmes, which have been available both in print and online since last year, have also attracted great interest. Thousands of queries, whether individual contributions or as a complete work, give proof to this.

In 2019, the  $\mu$ -Symposium will again be dedicated to the many facets of braking systems. This includes the problem of heat cracks in brake discs for heavy-duty vehicles from cause to forecast (*TU Darmstadt*) as well as the intensive examination of the brake fluid with regard to its requirements and performance (*Clariant*). Two contributions that focus on the electrification of individual components as well as the powertrain are particularly relevant: electromechanical actuation systems often offer functional added value compared to established technology, but also represent a challenge in the NVH sector (*ZF Group*). Almost simultaneously with the market launch, the  $\mu$ -Club will gain a deeper insight into the recuperative brake system of a new electric vehicle (*Porsche*). In line with the mission statement of the Association of German Engineers (VDI), we, as participants in the research and



development of future mobility, bear responsibility for people, nature, the environment and society. Therefore, it makes sense to consider the topic of brake emissions again this year. This time the focus is on a differentiation of particle mass and number depending on different friction materials (*TMD Friction*). Humankind's need for mobility has existed since the beginning of history. Technical progress unlocks the potential of new solutions, which we will present for discussion in the light of the challenges and opportunities posed by air taxis (*CTC/Airbus*).

The recent changes in the  $\mu$ -Club as a result of the expanded publication form and new conference venue should continue to offer our industry the best possible opportunity for further training and networking beyond the pressures and time constraints of day-to-day business. We wish all attendees from industry, research and universities a pleasant and satisfying conference. In addition to the speakers, we would like to take this opportunity to thank Ms. Petito for the organisation and Mr. Wagner for his editorial support.

Professor Dr Ralph Mayer  
President  $\mu$ -Club

David Baines  
CEO of TMD Friction Group SA

# Inhaltsverzeichnis

<b>Hitzerisse in Lkw-Bremsscheiben: Einflussfaktoren, Wirkzusammenhänge und Vorhersagemöglichkeiten</b> . . . . .	1
Sami Bilgic Istoc und Hermann Winner	
<b>Bremsflüssigkeiten – erstklassige Leistungsfähigkeit für heute und morgen</b> . . . . .	17
Verena Feldmann	
<b>NVH bei elektromechanischen Aktuatoren</b> . . . . .	22
Ralf Groß, Rich Dziklinski, und Joachim Noack	
<b>Rekuperatives Bremssystem des Porsche Taycan</b> . . . . .	28
Bernhard Schweizer und Martin Reichenecker	
<b>Untersuchung der Bremsemissionen verschiedener Reibmaterialien in Bezug auf Partikelmasse (PM) und Partikelanzahl (PN)</b> . . . . .	34
Andreas Paulus	
<b>Urban Air Mobility – Herausforderungen und Chancen für Lufttaxis</b> . . . . .	49
Carsten Rowedder	
<b>Autorenverzeichnis</b> . . . . .	97

# Contents

<b>Heat Cracks in Brake Discs for Heavy-Duty Vehicles: Influences, Interactions and Prediction Potential . . . . .</b>	<b>55</b>
Sami Bilgic Istoc und Hermann Winner	
<b>Brake Fluids – First Class Performance for Today and Tomorrow . . . . .</b>	<b>70</b>
Verena Feldmann	
<b>Electromechanical Actuation Systems NVH Challenges . . . . .</b>	<b>74</b>
Ralf Groß, Rich Dziklinski, und Joachim Noack	
<b>Recuperative Brake System of the Porsche Taycan . . . . .</b>	<b>80</b>
Bernhard Schweizer und Martin Reichenecker	
<b>Investigation of Brake Emissions of Different Brake Pad Materials with Regard to Particle Mass (PM) and Particle Number (PN) . . . . .</b>	<b>81</b>
Andreas Paulus	
<b>Urban Air Mobility—Challenges and Opportunities for Air Taxis . . . . .</b>	<b>95</b>
Carsten Rowedder	