

VERFASST VON



Theodoros Kossioris, M. Sc.

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (tme) der RWTH Aachen.



Robert Maurer, M. Sc.

war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (tme) der RWTH Aachen und ist Projektmanager bei der FEV Europe GmbH in Aachen.



Dr.-Ing. Stefan Sterlepper

ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (tme) der RWTH Aachen.



Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger

ist Leiter des Lehrstuhls für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (tme) der RWTH Aachen.

Zero-Impact-Emissionen für alle Verkehrsszenarien durch Optimierung der Abgasnachbehandlungssysteme

Im FVV-Projekt (Nr. 1412) „Zero-Impact-Endrohremission-Antriebsstränge“ wurden an der RWTH Aachen zwei Referenzfahrzeuge mit aktuellen Abgasnachbehandlungssystemen unter anspruchsvollen Einsatzbedingungen untersucht. Es zeigte sich, dass beide Fahrzeuge in den meisten Szenarien keinen signifikanten Einfluss auf die Luftqualität mehr haben und damit das Kriterium von Zero-Impact-Emissionen erfüllen. Durch die Integration zusätzlicher Heißmaßnahmen und vergrößerter Katalysatorvolumina kann das in weiteren kritischen Szenarien erreicht werden.



1	MOTIVATION
2	AUSLEGUNGSGRENZEN
3	REFERENZFAHRZEUGE
4	ERGEBNISSE AUS DEN SZENARIEN UND UNTERSUCHTE ABGELEITETE MASSNAHMEN
5	FAZIT UND AUSBLICK

1 MOTIVATION

Das FVV-Forschungsprojekt, das am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (tme) durchgeführt wurde, beruht auf dem Ansatz Zero-Impact Tailpipe Emission (ZITE), mit dem von der Luftqualität auf die erlaubte Schadstoffkonzentration im Auspuffrohr (Tailpipe) geschlossen wird. Das ermöglicht die Betrachtung einer mit Verbrennungsmotoren (VM) angetriebenen Fahrzeugflotte in realen Einsatzszenarien und dadurch eine Bewertung des tatsächlichen Umwelteinflusses. Hierfür wurden ein Pkw und ein leichtes Nfz für das Jahr 2030 prognostiziert sowie der Begriff ZITE quantifiziert. Für beide Fahrzeuge wurden die Stickoxid(NO_x)-Emissionen unter verschiedenen Bedingungen untersucht, um bei Bedarf Maßnahmen zur Einhaltung von ZITE abzuleiten.

2 AUSLEGUNGSGRENZEN

Der Ansatz der Zero-Impact-Emissionen (ZIE) umfasst, dass die Abgasemissionen einer Fahrzeugflotte die Umgebungsluftqualität

nicht signifikant beeinflussen [1, 2]. In einer Studie von Hausberger et al. [2] wurde der „Zero-Impact-Luftqualitätsbeitrag“ derart definiert, dass der Beitrag des Straßenverkehrs geringer ist als eine festgelegte „Irrelevanzschwelle“, die 3 % des Grenzwerts [3] für die durchschnittliche jährliche Schadstoffkonzentration in der Europäischen Union (EU) beträgt [4]. Dieser Grenzwert ist von den Luftqualitätsstandards abgeleitet, die von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) im Jahr 2006 festgelegt wurden [5]. Der etablierte Rechtsrahmen ermöglicht die Bewertung von Emissionen aus dem Verkehrssektor im Vergleich zu anderen Sektoren. Der in diesem Zusammenhang beschriebene Irrelevanzschwellenwert von 3 % ist der BImSchV 5 Abs. 1 Nr. 1 des Bundes-Immissionschutzgesetzes entnommen, wobei dieses speziell die Betreiber von genehmigungspflichtigen Industrieanlagen betrifft.

Bei Auslegungsgrenzen müssen Partikelemissionen durch Brems- und Reifenabrieb berücksichtigt werden. Für die Partikelemissionen am Auspuff ist eine ganzheitliche Betrachtung mit den neuesten Filtertechnologien erforderlich. Im vorliegenden Projekt stehen die NO_x-Emissionen am Auspuff im Vordergrund, da sie eindeutig nur durch den Motor und das Abgasnachbehandlungssystem verursacht werden. Die Untersuchungen wurden durch Analysen von Simulationsergebnissen unterstützt. Zur Berechnung von Übertragungsfaktoren zwischen Umgebungsluft und Auspuff wurden Daten der Luftqualitätsmessstation Stuttgart am Neckarort verwendet.

Es wurde von einer Fahrzeugflotte ausgegangen, die Pkw, leichte und schwere Nfz umfasst. Um die ZITE-Normen auf lokaler Flotenebene zu erreichen, sollte jedes einzelne Fahrzeug im Emissionsausstoß limitiert werden, wobei Nfz höhere Grenzwerte erhalten als Pkw. Die abgeleiteten Emissionsfaktoren wurden extrapoliert, um sechs weitere Szenarien einzubeziehen. Das erfordert auch die Berücksichtigung lokaler Parameter wie Verkehrsmuster und Luftausbreitungsmerkmale [1]. Hierfür wurde eine umfangreiche Prüfmatrix mit insgesamt sieben realistischen Szenarien zu Worst-Case-Emissionen/-immissionen entwickelt, die jeweils durch einzigartige Randbedingungen gekennzeichnet sind [6], **BILD 1**.

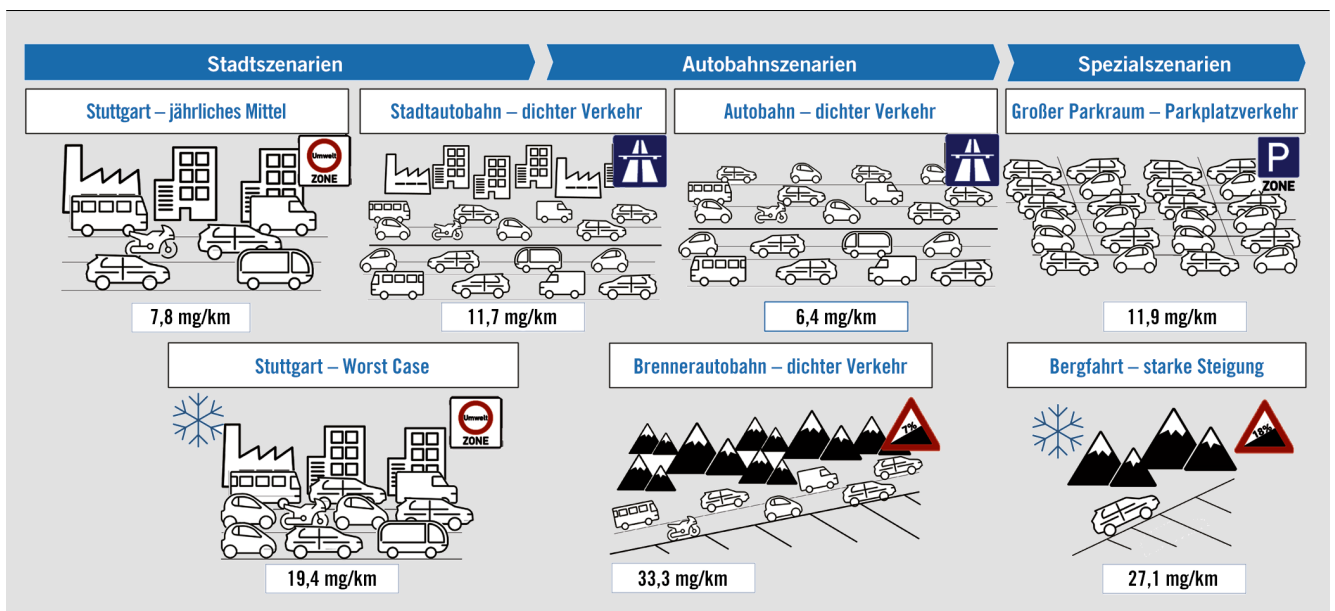


BILD 1 Realitätsnahe Szenarien für die Prüfung der Einhaltung der Zero-Impact-Emissionen von Fahrzeugen (© tme)

3 REFERENZFAHRZEUGE

Basierend auf den Diskussionen zur neuen Euro-7-Gesetzgebung in der EU wurde im Arbeitskreis mit Industrievertretern ein Basisszenario für 2030 entwickelt. Die Referenzfahrzeuge, die aufgrund prognostizierter Emissionsgrenzwerte ausgewählt wurden, sind ein Pkw mit Ottomotor (Klasse M1) und ein leichtes Nfz mit Dieselmotor (Klasse N1, Gruppe III). In beiden Fällen handelt es sich um hybridisierte Fahrzeuge (Hybrid Electric Vehicles, HEVs), da Mild-Hybridisierung als Standardtechnologie für 2030 angenommen wird. Als allgemeiner Entwicklungstrend für ZIE wurden die Vergrößerung der Katalysatoren im Vergleich zum Stand der Technik bei Euro-6-Fahrzeugen sowie die Integration externer Aufheizmaßnahmen für Abgasnachbehandlungssysteme (Exhaust Aftertreatment Systems, EATS) prognostiziert [1].

Komponenten der hybriden Antriebskonzepte und eingeführte Bezeichnungen sind **TABELLE 1** zu entnehmen. **BILD 2** (links) stellt das Ausgangstechnologiepaket für das Zero-Impact-Design des Pkw-Referenzfahrzeugs dar. Die abgeleiteten Antriebsstrangkonfigurationen für das leichte Nfz ist in **BILD 2** (rechts) zu finden.

4 ERGEBNISSE UND ABGELEITETE MASSNAHMEN

BILD 3 zeigt die Simulationsergebnisse der NO_x-Emissionen für den Pkw mit Ottomotor. Bei den Berechnungen wurde eine durchschnittliche jährliche Zuladung von 13 % angenommen. Je nach Technologiekombination werden die NO_x-ZITE-Zielwerte unterschritten oder verfehlt. Die Kombination aus einer elektrischen Vorheizung und einer Leistungsbegrenzung des VMs liegt in allen Szenarien unterhalb der Grenzwerte für ZIE, außer im Szenario großer Parkraum – Parkplatzverkehr. Hier reicht die Vorheizdauer von 15 s nicht aus, um die ZIE-Stufe zu erreichen. Das ist hauptsächlich auf die zu 100 % kaltgestartete Fahrzeugflotte zurückzuführen. Durch die Verlängerung des Vorheizens auf 20 s kann die Konformität für ZIE erreicht werden. Alternativ zeigt sich ein Brenner im Abgastrakt als sehr effektive Maßnahme. In Kombination mit einer kurzen Vorheizphase sind in allen untersuchten Szenarien ZIE erreichbar. Auch wenn der Abgasbrenner zusätzli-

Komponente/Maßnahme	Bezeichnung
Abgasbrenner (Exhaust Burner)	ExB
Elektrisch beheizte Scheibe (Electrically Heated Disk)	EHD
Vorheizen (Preheating)	PreH
Leistungsbegrenzung (Power Limitation)	Lim
Integrierter Startergenerator	ISG
Geschwindigkeitsreduzierung (Vehicle Speed Reduction)	SpdRed
Katalysatorvolumen (Catalyst Volume)	CatVol
Dreivegekatalsator (Three Way Catalyst)	TWC
Beschichteter Ottopartikelfilter (coated Gasoline Particulate Filter)	cGPF
Motornaher Dieseloxydationskatalysator (close-coupled Diesel Oxidation Catalyst)	ccDOC
Motornaher SCR-beschichteter Dieselpartikelfilter (close-coupled coated Diesel Particulate Filter)	ccSDPF
System am Unterboden für die selektive katalytische Reaktion (underfloor Selective Catalytic Reduction)	ufSCR
Ammoniakschlupfkatalysator	ASC
Permanentmagnet-Synchronmotor	PMSM

TABELLE 1 Komponenten der Zero-Impact-Tailpipe-Emissions-Antriebskonzepte und eingeführte Bezeichnungen (© tme)

che gasförmige Emissionen ausstößt, verbessert die höhere thermische Leistung die Gesamtemissionsleistung im Vergleich zur elektrischen Zuheizung. Eine Leistungsbegrenzung ist in diesem Fall nicht mehr nötig.

BILD 4 zeigt die Simulationsergebnisse der NO_x-Emissionen für das Referenzfahrzeug mit Dieselmotor. Bei den Berechnungen wird eine durchschnittliche jährliche Nutzlast von 25 % angenommen. Wie dargestellt, erreicht das spezifizierte Antriebsstrangkonzept für das Jahr 2030+ ZITE in allen Szenarien, mit Ausnahme des Szenarios Stuttgart – Worst Case und Autobahnfahrten – dichter Verkehr, **BILD 4** (links). Um ZITE im ersten Fall zu gewährleisten, ist eine schnellere Aufheizung des EATS erforderlich. Ähnlich

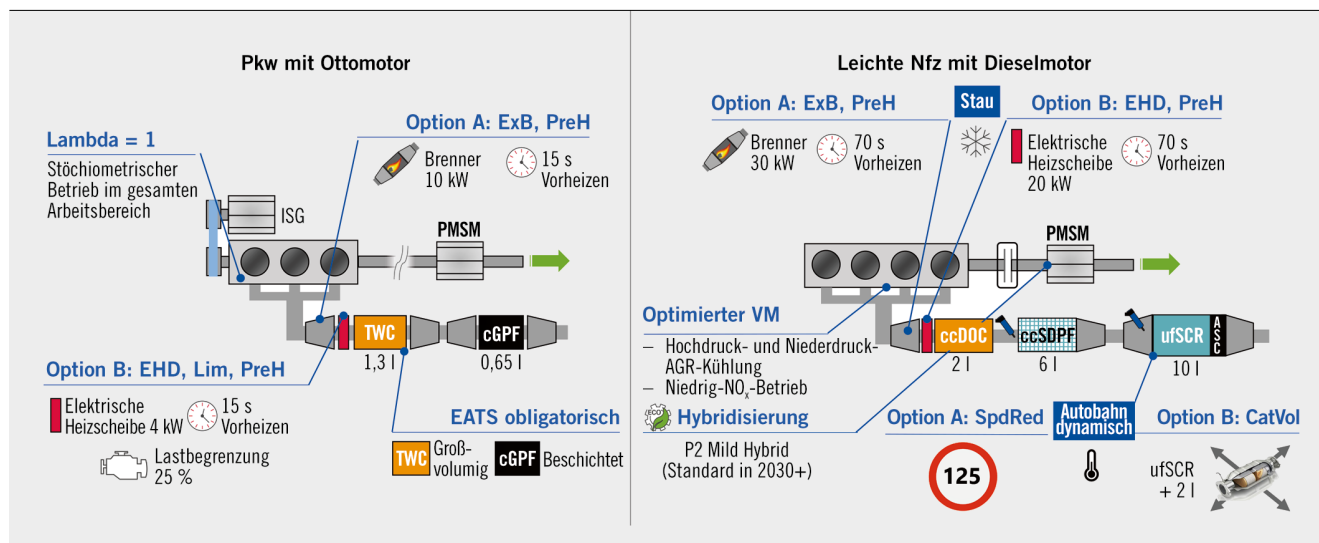




















BILD 2 ZITE-Antriebskonzepte für Pkw (links) und leichte Nfz (rechts) zur Einhaltung der NO_x-Emissionsgrenzwerte des Straßenverkehrs (© tme)

 NO_x [mg/km]	 Kalt-start	ZIE-Grenz-werte	HEV	+ EHD	+ EHD, Lim	+ EHD, PreH	+ EHD, Lim, PreH	+ ExB	+ ExB, Lim	+ ExB, PreH	+ ExB, Lim, PreH
											
Stuttgart – jährliches Mittel	 2 %	6,9	12,1	9,1	3,3	7,1	2,7	5,4	2,7	2,1	2,1
Stuttgart – Worst Case	 17 %	16,9	82,0	33,3	19,1	22,2	14,8	15,1	8,2	3,8	2,4
Stadtautobahn – dichter Verkehr	 2 %	7,9	10,9	3,5	3,3	3,2	2,8	2,9	2,8	2,0	2,0
Autobahn – dichter Verkehr	 0,2 %	2,7	2,9	2,3	2,1	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0
Brenner – dichter Verkehr	 0,2 %	5,5	4,2	4,2	2,8	3,7	2,6	3,9	2,6	3,0	2,1
Parkplatzverkehr – großer Parkraum	 100 %	32,4	938,1	51,2	51,2	35,1	35,1	34,1	34,1	3,0	3,0
Bergauf – starke Steigung	 2 %	25,7	11,7	10,6	3,9	8,6	3,2	7,6	2,9	2,7	2,4





ZIE nicht erfüllt **ZIE erfüllt**
  P_{EHD} = 4 kW
  P_{ExB} = 10 kW
  P_{Lim} = 18 kW
  P_{PreH} = 15 s

BILD 3 Gegenüberstellung der Maßnahmen für einen Pkw mit Ottomotor zum Erreichen von NO_x-ZITE (© tme)

wie beim Pkw mit Ottomotor wurden für dieses Szenario eine elektrische Vorheizung und ein auf einem Abgasbrenner basierendes Antriebsstrangkonzzept als ZITE-Lösungen geprüft. Zur Untersuchung von möglichst schwierigen Bedingungen für die ZITE-Einhaltung wurden in den Simulationen ungünstige anfängliche NH₃-Beladungszustände in den beiden deNO_x-Katalysatoren angenommen.

Nach 70 s Vorheizen mit einem 20-kW-Elektroheizer oder einem 30-kW-Brenner kann das ZITE-Ziel erreicht werden, **BILD 4** (rechts oben). Die Emissionen der Fahrzeugvariante mit Brenner sind in diesem Fall aufgrund der zusätzlichen Emissionsbildung während der Vorheizphase etwas höher. Allerdings ist die Realisierung derartiger Heizleistungen mit einem Brenner eher realisierbar, da bei einer elektrischen Beheizung die Leistungen durch das Spannungsniveau

VISIONEN. ENTWICKLUNG. MOBILITÄT.

Die Welt der Mobilität verändert sich – die Herausforderung der Automobilentwicklung ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Die Komplexität des Mobilitätswandels erfordert wegweisende Lösungen für den Transformationsprozess. ATZelektronik bietet hochaktuelle Informationen aus dem gesamten Spektrum der Automobilelektronik. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.





AUSGABEN KOSTENLOS!

www.mein-fachwissen.de/ATZelektronik

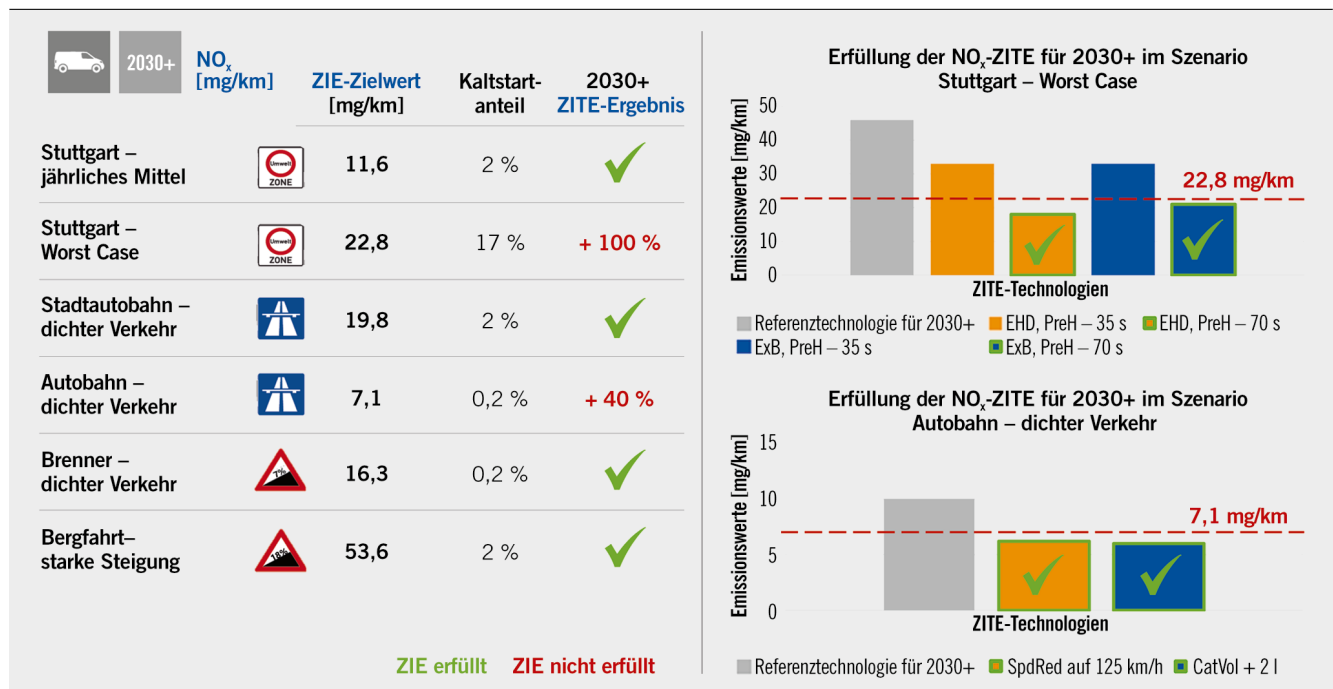


BILD 4 Gegenüberstellung der Maßnahmen für ein leichtes Nfz mit Dieselmotor zum Erreichen von NO_x-ZITE: Zielwerte und Ergebnisse für einzelne Szenarien (links), Maßnahmen im Vergleich zur Referenztechnologie für 2023+ für das Szenario Stuttgart – Worst Case (rechts oben) und das Szenario Autobahn – dichter Verkehr (rechts unten) (© tme)

der Hybridisierung und der daraus resultierenden Stromstärken begrenzt sind. Mit 48-V-Technologien sind bisher maximale Heizleistungen von 6 kW üblich. Im Szenario Autobahn – dichter Verkehr erfordert die Einhaltung der ZITE-Vorgaben entweder eine weitere Reduktion der Rohemissionen des Verbrennungsmotors oder eine Erhöhung der deNO_x-Fähigkeit des EATS. Wie gezeigt, kann das definierte ZITE-Ziel entweder durch eine Verringerung der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit auf 125 km/h für dieses spezifische Szenario oder eine Erhöhung des gesamten Unterflur-SCR-Volumens um 2 l erreicht werden, **BILD 4** (rechts unten).

5 FAZIT UND AUSBLICK

In dieser Studie wurden ZITE-Antriebsstrangkonzeppte für einen Ottomotor-Pkw und ein leichtes Diesel-Nfz untersucht, wobei der Schwerpunkt auf NO_x-Emissionen lag. Die ZIE-Flotte ist definiert als eine Flotte, die weniger als 3 % des Grenzwerts der durchschnittlichen jährlichen NO₂-Schadstoffkonzentration in der EU ausstößt. Es wurde eine ZITE-Prüfmatrix entwickelt, die aus sieben Realfahrtszenarien besteht, die kritische Aspekte der Fahrzeugemissionen und der Luftqualität kombinieren. Der für 2030+ erwartete marktübliche Pkw mit Ottomotor ist mit geringfügigen Anpassungen in der Hardwaresteuerung ZITE-konform. Das Nfz mit dem Referenzantriebsstrang für 2030+ ist in 70 % der Szenarien ZITE-konform.

Durch externes Vorheizen, Reduzierung der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit oder Vergrößerung der Katalysatoren können die prognostizierten Fahrzeuge ZITE in allen betrachteten Szenarien erreichen. In künftigen Arbeiten sind Analysen geplant, um die jährliche Häufigkeit des Auftretens solcher kritischen Situationen wie die in der entwickelten ZITE-Prüfmatrix in der Praxis zu quantifizieren.

LITERATURHINWEISE

- [1] Maurer, R.; Kossioris, T.; Hausberger, S.; Toenges-Schuller, N.; Sterlepper, S.; Günther, M.; Pischinger, S.: How to define and achieve Zero-Impact Emissions in road transport? In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Nr. 116 (2023), Artikel 103619
- [2] Hausberger, S.; Uhrner, U.; Toenges-Schuller, N.; Stadlhofer, W.; Schneider, C.: Zero-Impact Fahrzeug-Emissionen (Konzeptionelle Studie). Abschlussbericht FVV-Projekt Nr. 1407, 2022
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (Hrsg.): Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz: Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft), 2021
- [4] Bundesamt für Justiz (BfJ) (Hrsg.): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen: 39. BImSchV, 2010
- [5] World Health Organization (WHO) (Hrsg.): Air quality guidelines global update 2005. Online: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02>, aufgerufen: 2. Dezember 2023
- [6] Maurer, R.; Kossioris, T.; Sterlepper, S.; Günther, M.; Pischinger, S.: Achieving Zero-Impact Emissions with a Gasoline Passenger Car. In: Atmosphere 14 (2023), Nr. 2, S. 313 ff

DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projektnr. 1412) wurde am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (tme) der RWTH Aachen unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger durchgeführt. Es wurde von der FVV e. V. mit Eigenmitteln finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr.-Ing. Frank Bunar (IAV GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei dem Fördergeber FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Insbesondere danken die Autoren Dr.-Ing. Marco Günther (RWTH Aachen) für seinen Beitrag zu dieser Arbeit.



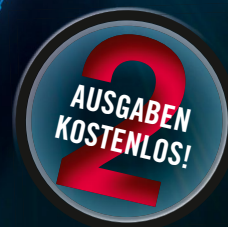
READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com

Die Zukunft kennt keine Grenzen – die Herausforderung der Automobilentwicklung ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Ressourceneffiziente Produkte, neuartige Werkstoffe, Technologien für urbane Mobilität und kooperative Systeme liegen im Fokus der Automobilproduktion. ATZ bietet hochaktuelle Informationen aus Forschung und Entwicklung und berichtet wissenschaftlich fundiert über alle Themen der Kraftfahrzeugtechnik im weltweiten Automobilbau. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

AUTOMOBILTECHNISCHE ZEITSCHRIFT

TECHNIK. INNOVATION. ZUKUNFT.



www.mein-fachwissen.de/atz/probe