

# ATZ

AUTOMOBILTECHNISCHE ZEITSCHRIFT

03 März 2012 | 114. Jahrgang

**FORMOPTIMIERUNG** in der  
Fahrzeugentwicklung

**LEICHTE** und geräuschoptimierte  
Festsattelbremse

**GERÄUSCHWAHRNEHMUNG** von  
Elektroautos

/// BEGEGNUNGEN

**Walter Reithmaier**  
TÜV Süd Automotive

/// INTERVIEW

**Claudio Santoni**  
McLaren

## PERSPEKTIVE LEICHTBAU WERKSTOFFE OPTIMIEREN

# GERÄUSCHWAHRNEHMUNG VON ELEKTROAUTOS

Die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugen wirft Fragen der Sicherheit hinsichtlich der akustischen Wahrnehmung auf. Auch moderne Benzinfahrzeuge sind sehr leise, mit ihnen gibt es aber nicht mehr Unfälle im Straßenverkehr als bisher. Es wäre falsch, die Vorzüge der Elektroautos – das geräuschlose Fahren – mit einem künstlichen Geräusch zu zerstören. Dieser Beitrag der Universität Duisburg-Essen geht experimentell dem Gefährdungspotenzial nach und versucht, Lösungen aufzuzeigen.

## AUTOREN



**M.A. KATHRIN  
DUDENHÖFFER**

ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin für Elektromobilität, Internetvertrieb und Fuhrparkmanagement am Center Automotive Research (CAR) der Universität Duisburg-Essen.



**DIPL.-WIRT.-ING.  
LEONIE HAUSE**

ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin für Elektromobilität und Ökologie-Innovationen der Automobilindustrie im Rahmen des Öko-Globe-Instituts am CAR der Universität Duisburg-Essen.



BILD © Daimler | Smart

1	MOTIVATION
2	PROBLEMSTELLUNG
3	VERSUCHSAUFBAU
4	MESSERGEBNISSE
5	BEFRAGUNGSERGEBNISSE
6	FAZIT

## 1 MOTIVATION

Von einer neuen Arbeitsgruppe (Informal Group on Quiet Road Transport Vehicles) lässt die Wirtschaftskommission der UN für Europa (UN ECE) Vorschläge für akustische Warnsysteme für Elektrofahrzeuge erarbeiten. Hintergrund ist die Befürchtung, dass leise Fahrzeuge für Verkehrsteilnehmer wie Blinde, Fußgänger oder Fahrradfahrer in bestimmten Verkehrssituationen gefährlich sein können. In der sechsten Sitzung der Arbeitsgruppe im Mai 2011 wurde dazu vom dänischen Delta-Sens-Lab-Institut ein „White Paper on External Warning Sounds for Electric Cars“ vorgestellt. Das Papier konzentriert sich auf akustische Messungen und stellt diese allgemein gemessenen menschlichen Gehörwahrnehmungen gegenüber [3]. Das Institut kommt zu der Empfehlung, dass akustische Warnsysteme für Elektroautos notwendig sind. Nicht analysiert wurden hierbei subjektive Wahrnehmungen von Fahrzeugen in Verkehrssituationen. Nach unserer Einschätzung ergeben sich dadurch falsche Schlussfolgerungen.

In einer Testreihe mit 240 Probanden wurden im Rahmen des Projekts „Cologne E-mobil“ nachgewiesen, dass subjektive Wahrnehmungen von erheblicher Bedeutung zur Bewertung möglicher Gefährdungen sind. Das Experiment bestand zum einen aus objektiven Akustikmessungen, die im Ford-Entwicklungszentrum Köln-Merkenich durchgeführt wurden. Zum zweiten – und darin unterscheidet sich unser Ansatz wesentlich vom rein technischen Meßverfahren etwa des Delta Sens-Lab – wurden in verschiedenen Verkehrssituationen subjektive Geräuschwahrnehmungen einer großen Testgruppe den objektiven Messdaten gegenüber gestellt. Nach unseren Testdaten kommen wir zu dem Ergebnis, dass generelle künstliche Warnsignale keine adäquate Lösung darstellen. Vielmehr lassen sich leise Elektroautos sehr gut ohne zusätzliches Gefahrenpotenzial in den städtischen Verkehr integrieren. Künstliche Warnsignale sind überflüssig.

## 2 PROBLEMSTELLUNG

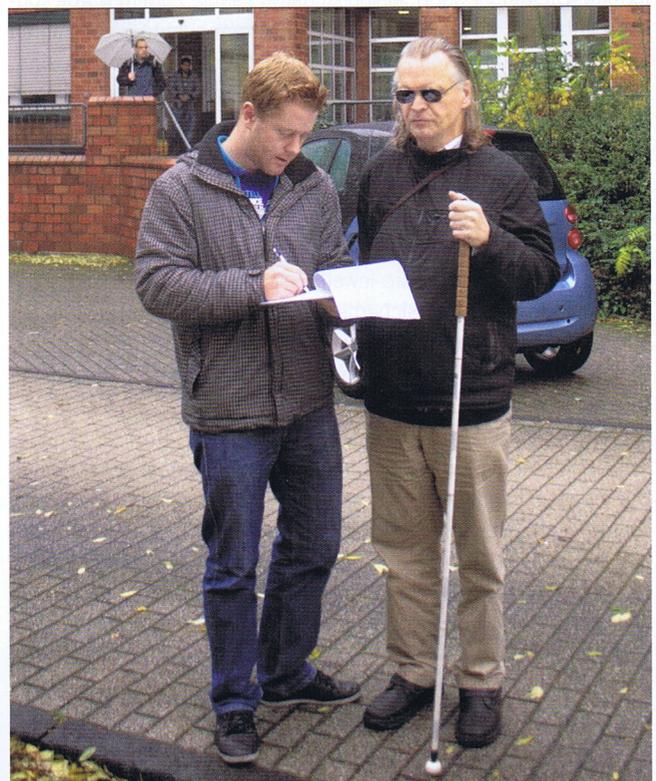
Die Kritik wird schon seit längerem vorgebracht: Elektroautos sind leise und damit eine potenzielle Gefahr vor allem für blinde oder sehbehinderte Personen. Dieser Personengruppe dienen die von den Fahrzeugen ausgehenden Geräusche als Warnung und als Orientierungshilfe im Straßenverkehr. Darüber hinaus sind Personen betroffen, die in ihrer Wahrnehmung anderweitig einge-

schränkt sind wie Schwerhörige oder Senioren. Auch für Kinder können lautlos herannahende Fahrzeuge eine Gefahr darstellen. In den USA und Japan werden Elektrofahrzeuge und Hybridfahrzeuge im Elektromodus bereits mit einem akustischen Warnsignal ausgestattet. Nun arbeitet die ECE an einer entsprechenden Richtlinie. Folgende Fragen standen im Fokus:

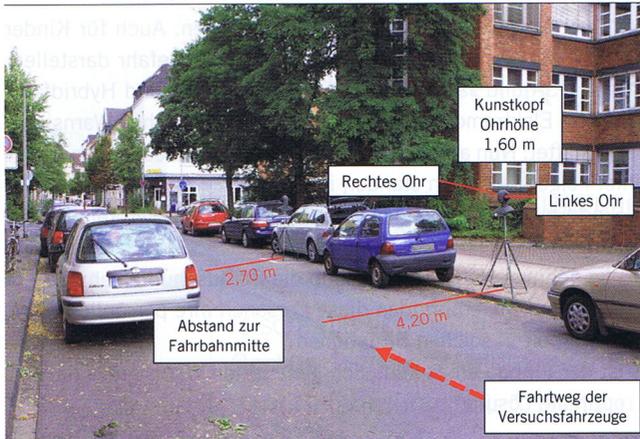
- : Sind Elektrofahrzeuge leiser als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor?
- : Wie nehmen Handicap-Gruppen die Geräuschunterschiede wahr, und wie empfinden diese Personen ihre persönliche Sicherheit in solchen Situationen?
- : Ist der Einbau eines künstlich generierten Warnsignals die optimale Lösung?

## 3 VERSUCHSAUFBAU

Untersuchungen zur Geräuschmessung und -wahrnehmung von Elektrofahrzeugen wurden unter anderem in den USA und Japan [1, 2] durchgeführt. Im Gegensatz zu diesen Studien wurden in unseren Experimenten reale Verkehrssituationen zugrunde gelegt. Da der kritische Punkt der Geräuschwahrnehmung von Elektrofahrzeugen bei etwa 30 km/h liegt (bei höheren Geschwindigkeiten überwiegen die Abrollgeräusche), wurden Vorbeifahrten an verschiedenen Testgruppen bei dieser Geschwindigkeit durchgeführt. Dies ist eine realistische Fahrbedingung, da in Tempo-30-Zonen die Straßenquerung zumeist ohne Lichtanlage erfolgt. Gegen den Test bei geringeren Geschwindigkeiten sprach das Argument des Anhaltewegs. Während dieser auf trockener Fahrbahn bei 30 km/h 18 m beträgt, liegt er bei 10 km/h nur bei 4 m (entsprechend der Faust-



1 Ausfüllen der Fragebögen mit Unterstützung



2 Akustikmessungen am Versuchsort

Fahrzeug	Testbedingung: konstante Vorbeifahrt	Pegel in dB(A)
German-E-Cars Stromos BEV	30 km/h	57
Mega E-City BEV	30 km/h	57,5
Smart Fortwo BEV	30 km/h	58
Opel Agila Benzin	30 km/h (2. Gang)	59
Ford Fiesta Benzin	30 km/h (2. Gang)	60,5
Smart Fortwo Benzin	30 km/h (2. Gang)	61,5
Smart Fortwo Diesel	30 km/h (2. Gang)	62,5

3 Daten der Geräuschpegelmessungen an der Teststrecke (nur Pkw)

formel). Die Gefahr der Kollision ist damit gering. Zudem wurde konstant gefahren, da Vollgasfahrten und extrem hochtouriges Fahren im Stadtverkehr in Wohngebieten nur selten zu beobachten sind. Als Versuchsort wurde eine Einbahnstraße mit geringem Verkehrsaufkommen in einem Wohngebiet in Nähe der Universität Duisburg-Essen gewählt. An beiden Straßenrändern parkten Autos und die Asphaltdecke war neu und ohne Erhaltungsmaßnahmen.

Die Probanden bekamen die Aufgabe, am Straßenrand zu warten und nach jeder Vorbeifahrt eines Testfahrzeugs die Straße zu überqueren. Danach wurden sie jeweils per Fragebogen zur Geräuschwahrnehmung und dem Sicherheitsempfinden befragt. Den blinden und sehbehinderten Personen wurde dabei Hilfestellung geleistet, 1. Für jede Vorbeifahrt wurde die Straße kurzzeitig gesperrt, um die Durchfahrt anderer Fahrzeuge zu vermeiden. Zudem kam ein Buzzer-System (Activote) zum Einsatz, um objektive „Time-to-Vehicle-Arrival“-Messungen zu erhalten [2]. Jeder Teilnehmer bekam einen Buzzer ausgehändigt und die Anweisung, den Buzzer zu betätigen, sobald er das Testfahrzeug herankommen hörte. Die individuellen Wahrnehmungs-Zeitpunkte wurden mit dem Zeitpunkt der Ankunftszeit des Fahrzeugs auf Höhe der Probanden verglichen und so die Zeit sowie die Distanz der Fahrzeuge gemessen.

Die Akustikmessungen wurden zum einen auf der Teststrecke Köln-Merkenich durch den Projektpartner Ford durchgeführt. Die Messkette gemäß ISO 362 umfasste mobile Mikrofone B&K 4188 in 7,5 m Entfernung. Es wurde jeweils der Mittelwert der maximalen Pegel LHS und RHS berücksichtigt. Für alle Fahrten wurde die Geschwindigkeit an der Mikrofonlinie ausgewertet. Diese ent-

spricht der mittleren Geschwindigkeit während der Testfahrt. Aufgrund dieser speziellen Messbedingungen konnten nur Geschwindigkeiten ab etwa 30 km/h gemessen werden.

Zum anderen wurden die Geräusche der Fahrzeuge am Versuchsort gemessen. Da für solche Akustikmessungen bislang keine Standards bestehen und das Ziel die Kontrolle der Messbedingungen war, wurde versucht, die Wahrnehmung der Teilnehmer objektiv zu erfassen. Der Kunstkopf wurde am Straßenrand vergleichbar mit einem Studienteilnehmer platziert, 2. Zur Ergänzung der Messungen auf der Teststrecke wurden hier auch geringere Geschwindigkeiten ab 10 km/h gemessen. Die Gehgeschwindigkeit beträgt 7 km/h und wird mit 10 km/h gemessen, was der geringsten reliablen Messgeschwindigkeit entspricht. Betrachtet wurden jeweils die Spitzenwerte (A-bewertet, FFT 4096 Linien, 50 %, Hanning) über die gesamte Vorbeifahrt (7,2 s, 60 m). Durch die unterschiedlichen Messbedingungen sind die Messungen der Teststrecke nicht mit den Messungen am Versuchsort vergleichbar.

#### 4 MESSERGEBNISSE

In den drei Testreihen kamen elf verschiedene Fahrzeuge zum Einsatz. Die Elektroautos (BEV) German E-Cars Stromos, Mega E-City, Smart Fortwo electric drive, Peugeot Partner, Ford Transit sowie die konventionellen Fahrzeuge Opel Agila Benzin, Ford Fiesta Benzin, Smart Fortwo Benzin, Smart Fortwo Diesel, Ford Transit Diesel und Peugeot Partner Benzin. Wie bereits begründet, sah die Fahrbedingung Konstantfahrten bei 30 km/h vor. Diese Betriebsbedingung entspricht dem Mitfahren im fließenden Verkehr.

3 zeigt, dass die getesteten Elektrofahrzeuge bei den gemessenen Geschwindigkeiten tatsächlich leiser waren (57 – 58 dB(A)) als die vergleichbaren Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (59 – 62,5 dB(A)). Jedoch wurde auch deutlich, dass es keine großen Abweichungen der Lärmpegel zwischen modernen Benzin- und Elektrofahrzeugen gibt. Den geringsten Lärmpegel der Benziner zeigte der Opel Agila, der kaum wahrnehmbare Abweichungen von 2 dB(A) zum vergleichbaren Elektroauto Stromos aufweist. Bei Smart BEV und Diesel waren diese Differenzen mit 4,5 dB(A) größer und auch deutlich wahrnehmbar. Dezibel (dB) ist ein logarithmisches Maß. Dementsprechend bewirkt eine Pegeländerung von 3 dB eine 1,23-fache Lautstärke, eine Pegeländerung von 6 dB eine 1,52-fache Lautstärke.

Bei höheren Geschwindigkeiten sollten sich die Geräuschpegel von Elektrofahrzeug und Benziner weiter annähern, da ab etwa 30 km/h die Abrollgeräusche überwiegen. Bei dem Fahrzeugpaar Stromos/Agila sind die Kurven jedoch so ähnlich, dass eine weitere Annäherung kaum erkennbar ist, 4.

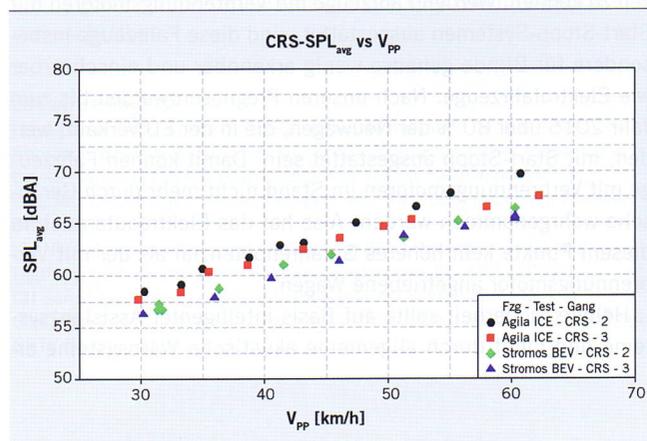
Am Versuchsort wurden die Geräusche bei 10, 20, 30 und 40 km/h gemessen, 5. Wie erwartet, zeigte sich, dass die Differenzen zwischen Elektroauto und Verbrenner bei geringen Geschwindigkeiten größer ausfallen. Bei 10 km/h (entspricht Schrittgeschwindigkeit) ist die Differenz mit 3,5 dB am größten. Dennoch sind beide Fahrzeuge bei dieser Geschwindigkeit extrem leise. In einer leisen Umgebung wie in diesem Wohngebiet heben sie sich gerade noch von den Hintergrundgeräuschen ab. In lauterer Umgebung ist zu erwarten, dass beide Fahrzeuge von den Hintergrundgeräuschen maskiert werden, da Umgebungsgeräusche von rund 30 dB als leise gelten, 50 dB als moderat laut [2].

Die Kunstkopfaufzeichnungen bei Konstantfahrt von 30 km/h der Fahrzeuge Stromos und Agila zeigen ein ähnliches Bild, 6. Hier wird wieder bestätigt, dass beide Fahrzeuge in der akustischen Wahrnehmung kaum Unterschiede zeigen.

### 5 BEFRAGUNGSERGEBNISSE

Die Experiment-Studie wurde mit insgesamt 240 Teilnehmern durchgeführt. Die Altersspanne der Teilnehmer reichte von 5 bis 95 Jahren und spiegelt damit sehr gut das Fußgängerverhalten im städtischen Verkehr wider. 14 % der Teilnehmer gaben an, gering-, mittel- oder hochgradig schwerhörig zu sein (70 % davon nutzten kein Hörgerät), 15 % der Teilnehmer – also 36 Personen – waren sehbehindert oder blind.

Die Bewertung der Fahrzeuggeräusche wurde über ein semantisches Differenzial gemessen. Für Fahrzeuge, die ein ähnliches Geräuschverhalten zeigen, ergeben sich Geräuschwahrnehmungsprofile wie in 7 dargestellt. Das Polaritätsprofil zeigt deutlich, dass die Testpersonen, einschließlich der Blinden, keinen Unterschied in der subjektiven Wahrnehmung zwischen Elektroauto und modernem Benzinfahrzeug erkannten. In den abgefragten Kriterien stimmten das Elektroauto Stromos und der Benzin Opel Agila fast deckungsgleich überein. Die Unterschiede waren in den Varianzanalysen nicht signifikant. Mit Ausnahme der Geräuschbewertung „gewöhnlich – einzigartig“ sind alle Unterschiede zwischen Agila und Stromos auf einem Niveau von  $\alpha > 20\%$  nicht signifi-



4 Schalldruckpegelmessungen (SPL) an der Teststrecke für Stromos und Agila

GESCHWINDIGKEIT BEI KONSTANTFAHRT	Ø STROMOS (BEV)	Ø AGILA BENZIN	DIFFERENZ
10 km/h	49 dB(A)	52,5 dB(A) (1. Gang)	3,5 dB
20 km/h	53,5 dB(A)	54,5 dB(A) (2. Gang)	1 dB
30 km/h	58,5 dB(A)	57 dB(A) (2. Gang)	-1,5 dB
40 km/h	60,5 dB(A)	62,5 dB(A) (3. Gang)	2 dB

5 Durchschnitt Ø und Differenz der Schalldruckpegelmessungen am Versuchsort für Stromos und Agila

# N<sub>2</sub>O

... we measure it ...

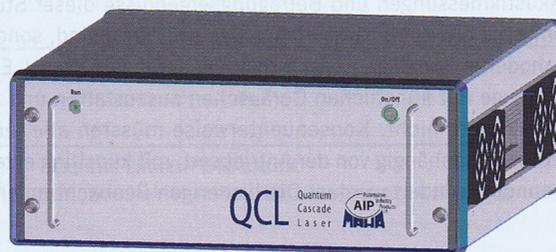


**QCL – N<sub>2</sub>O Quantum Cascade Laser**  
– developed and manufactured by MAHA-AIP –

Reproducible N<sub>2</sub>O measurement in diluted as well in raw vehicle emission gases by using the QCL Technology.

Application examples:

Certification of LDV combustion engines in accordance to appearing emission measurement regulations e.g.: EPA 40 CFR 1065, EPA 40 CFR 1066, WLTP GTR – fullfills completely the requirements of EURO VI

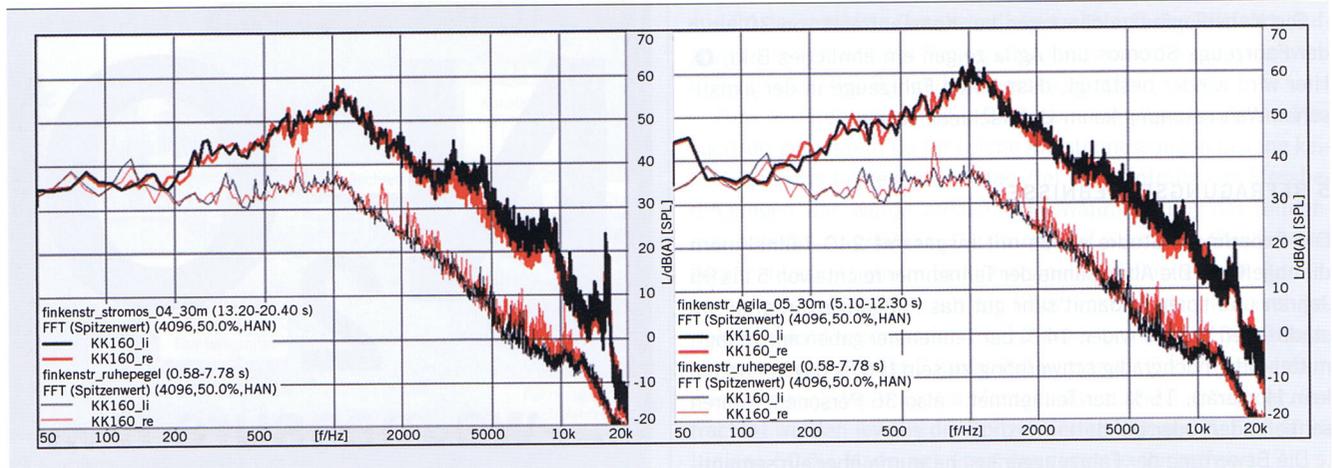


- compact, easy adaptable analysator module free of artefacts
  - high selectivity and sensibility
  - no cross sensitivity regarding CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, THC
- easy calibration, without N<sub>2</sub>O-span gas
- fast reaction time T90: < 2 seconds
- no LN<sub>2</sub> necessary, water cooled detector unit
- short rising time
- low detection limit: < 10 ppb
- easy operation
- stand-alone unit for the easy integration in existing test cells



MAHA-AIP GmbH & Co. KG  
Automotive Industry Products  
Hoyen 30 · D-87490 Haldenwang / Germany  
Phone: +49 (0) 8374 / 585-0 (-442)  
Fax: +49 (0) 8374 / 585-551  
www.maha-aip.com · E-Mail: info@maha.de





6 Akustikmessungen am Versuchsort für Stromos (links) und Agila (rechts)

kant. Der  $\beta$ -Fehler ist somit hinreichend klein, und die Unterschiede sind verschwindend gering. Die erwarteten Unterschiede zwischen Verbrenner und Elektroauto zeigten sich nur bei dem Fahrzeugpaar Smart Diesel und Smart BEV. Hier wurde die Elektrovariante signifikant leiser, schwächer, gedämpfter und einzigartiger wahrgenommen als ihr Zwilling.

Auch die Buzzer-Messungen zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen Elektroauto und Benziner, 8. Bei beiden Fahrzeugtypen war der Anteil der Personen, die das Fahrzeug zu spät oder gar nicht gehört haben, identisch.

6 FAZIT

Die Akustikmessungen und Befragungsergebnisse dieser Studie zeigen, dass nicht nur Elektrofahrzeuge sehr leise sind, sondern auch moderne Benziner. Es ist also keine optimale Lösung, Elektrofahrzeuge mit künstlichen Geräuschen auszustatten und moderne Benziner nicht. Konsequenterweise müssten alle leisen Fahrzeuge, unabhängig von der Antriebsart, mit künstlich erzeugten Sounds verändert werden. Die bisherigen Beobachtungen im

Straßenverkehr haben aber kein signifikant gestiegenes Unfallverhalten bei modernen Benzinern gezeigt. Damit kann geschlossen werden, dass es falsch wäre, die Vorzüge der Elektroautos – das geräuschlose Fahren – künstlich zu zerstören.

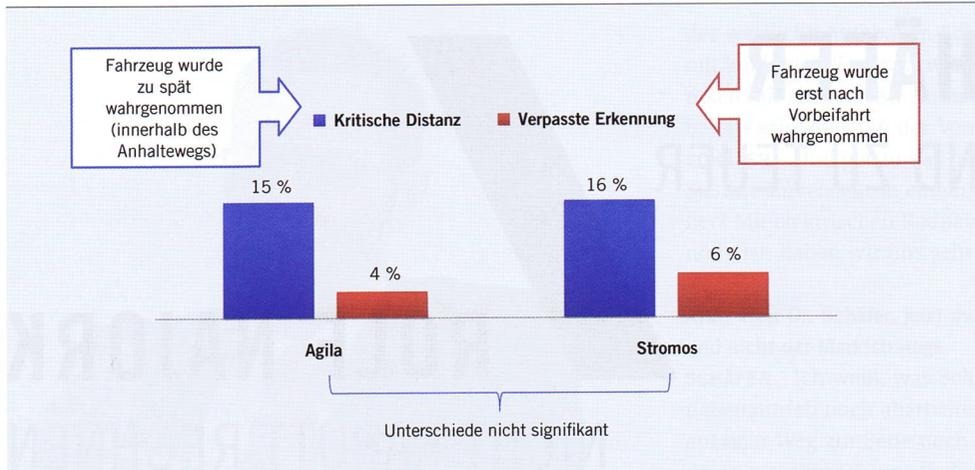
Unterschiedliche Wahrnehmungen von Elektroautos und verbrennungsmotorischem Fahrzeug können sich im Standbetrieb ergeben. Dies ist etwa vor Ampeln oder bei Parksituationen von Bedeutung. Stehende Fahrzeuge mit laufendem Verbrennungsmotor sind wichtig für Blinde, um Gefahrensituationen einschätzen zu können. Werden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mit Start-Stop-Systemen ausgestattet, sind diese Fahrzeuge insbesondere für Blinde genauso wenig erkennbar und einschätzbar wie Elektrofahrzeuge. Nach unseren Prognosen werden bis zum Jahr 2015 über 80 % der Neuwagen, die in der EU verkauft werden, mit Start-Stop ausgestattet sein. Damit können Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren im Stand nicht mehr durch Geräusche wahrgenommen werden. Also hat das Elektroauto auch in diesem Punkte kein höheres Gefahrenpotenzial als der mit Verbrennungsmotor angetriebene Wagen.

Höhere Sicherheit sollte auf Basis intelligenter Assistenzsysteme und nicht durch allgemeine akustische Warnsysteme er-

	Extrem	Eher	Weder noch	Eher	Extrem	
	-2	-1	0	1	2	
Leise						Laut
Schwach						Kraftvoll
Leichtgängig						Schwergängig
Dumpf						Metallisch
Gewöhnlich						Einzigartig
Gedämpft						Dröhnend
Weich						Hart
Tief						Hoch

● Agila  
● Stromos

7 Geräuschwahrnehmung für Stromos und Agila



8 Ergebnis der Buzzer-Messungen

reicht werden. Am Center Automotive Research und Institut für Mechatronik und Systemdynamik der Universität Duisburg-Essen laufen derzeit die Planungen, um ein Assistenzsystem zu entwickeln, das Betroffene wie Blinde oder Sehbehinderte individuell warnt und den Autofahrern gleichzeitig signalisiert, dass gefährdete Personen in der Nähe sind. Damit würden Warnsysteme individualisiert und nicht beliebige Lärmquellen neu geschaffen. Beim Übergang zur Elektromobilität ist es nach den Ergebnissen unserer Studie nicht notwendig und nicht sinnvoll, akustische Warnsignale für Fahrzeuge im niedrigen Geschwindigkeitsbereich vorzuschreiben.

#### LITERATURHINWEISE

- [1] Japanese Automobile Standards Internationalization Centre: A Study on Approach Warning Systems for Hybrid Vehicle in Motor Mode. Presented at the 49<sup>th</sup> World Forum for Harmonization of Vehicle Regulation (WP.29) GRB Working Group on Noise, February 16 – 18, 2009, Document Number GRB-49-10
- [2] NHTSA: Quieter Cars and the Safety of Blind Pedestrians. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA, 2010
- [3] Sense-Lab: Report, White Paper on External Warning Sounds for Electric Cars. May 2011, <http://live.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp29grb/QRTV-06-04e.pdf>

## DANKE

Das im Artikel beschriebene Experiment wurde im Rahmen des Projekts „Cologne E-mobil“ des Konsortiums Ford, Rheinenergie, Stadt Köln und Universität Duisburg-Essen durchgeführt. „Cologne E-mobil“ ist ein Projekt der vom Verkehrsministerium BMVBS geförderten Modellregionen Elektromobilität. Der besondere Dank der Autorinnen gilt Dr. Armin Bruno (Ford-Werke) und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik, die bei den Experimenten wertvolle Unterstützung gegeben haben.



DOWNLOAD DES BEITRAGS  
[www.ATZonline.de](http://www.ATZonline.de)



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE  
order your test issue now: [springervieweg-service@springer.com](mailto:springervieweg-service@springer.com)

Sie wollen sich verändern oder suchen die erste Stelle, dann senden Sie bitte Ihre kompletten Bewerbungsunterlagen an:

tl Engineering GmbH, Schönastr. 11, 65201 Wiesbaden  
[bewerbung@tlengineering.de](mailto:bewerbung@tlengineering.de) - [www.tlengineering.de](http://www.tlengineering.de)  
Tel.: 0611-4060616 - Fax: 0611-4060617