



AUSLEGUNG VON ELEKTRISCHEN FAHRZEUGKONZEPTEN FÜR MEGACITIES IN ASIEN

Elektromobilität kann dazu beitragen, die besonders in asiatischen Millionenstädten ausgeprägte Luftverschmutzung und Lärmbelastung zu mindern. Dargestellt an den Beispielen Shanghai und Singapur leiten TUM Create und TU München aus dem spezifischen Nutzungs- und Mobilitätsverhalten passende Elektrofahrzeuge konzeptionell ab. Dabei ist die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit stark abhängig von den regionalen Bedingungen hinsichtlich Infrastruktur, Energiemix, Klima und Politik. Dieses wird für mehrere asiatische Metropolen am Beispiel eines der ausgelegten Elektrofahrzeuge aufgezeigt. Als Referenz für eine deutsche Stadt dient München.

AUTOREN



DIPL.-ING. STEPHAN SCHICKRAM
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter bei TUM Create in Singapur (Singapur).



DIPL.-ING. ZHI TILL
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität München.



PROF. DR.-ING. MARKUS LIENKAMP
ist Leiter des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität München und wissenschaftlicher Leiter bei TUM Create.

MOTIVATION

Zunehmende Urbanisierung sowie stetes Wirtschaftswachstum führen besonders in asiatischen Metropolen zu einer gesteigerten Nachfrage an motorisiertem Individualverkehr. Letzterer verschärft lokal die oftmals schon problematische Umweltverschmutzung durch Feinstaub und Lärm. Die Einführung von Elektrofahrzeugen kann besonders in den Millionenstädten dazu beitragen, diese Belastung zu reduzieren und so eine Steige-

rung der Lebensqualität bewirken.

Bei der Auslegung von sinnvollen und nachhaltigen Elektrofahrzeugen bedarf es hierbei einer ganzheitlichen Betrachtung der lokalen Rahmenbedingungen bezüglich Mobilitätsverhalten, Energieversorgung, Infrastruktur und Klima. Diese unterscheiden sich zum Teil deutlich von den zentraleuropäischen und haben großen Einfluss auf den Energiebedarf. Mit Fokus auf Shanghai und Singapur werden im Folgenden marktspezifische Fahrzeugkonzepte für Asien abgeleitet, evaluiert und mit München verglichen.

MOBILITÄTSVERHALTEN

Zur Analyse des Mobilitäts- und Fahrverhaltens wurden zwei unabhängige Projekte durchgeführt. So wurde in Shanghai das Fahrverhalten von 30 Probanden aufgezeichnet, in Singapur erfolgte dies von TUM Create für mehrere Taxis. Als Vergleichsstudie für München dient der Flottenversuch „eFlott“, welcher von Audi AG, Eon AG, Stadtwerke München und TU München durchgeführt wurde [1].

Die Probanden in Shanghai nutzten den eigenen Pkw sowohl privat als auch dienstlich. Neben fahrdynamischen Aufzeichnungen wurden Befragungen von der Marktforschung durchgeführt.

Die Teilnehmer, mit 23 % Frauenanteil, lassen sich in die folgenden drei Gruppen unterteilen:

- : junge vernetzte Generation (New Social Generation, NSG)
- : gewöhnliche Geschäftsleute (Ordinary Business, OB)
- : wohlhabende Geschäftsleute (Business Elite, BE).

Die Probanden der „New Social Generation“ (NSG) sind mit 20–35 Jahren die Jüngsten und mit einem mittleren Einkommen recht preissensibel. Sie sind

offen gegenüber neuer Antriebstechnik und zeigen – vergleichbare Kosten vorausgesetzt – eine hohe Kaufbereitschaft für ein batterieelektrisches Fahrzeug (BEV).

Die 30–40-Jährigen der Gruppe „Ordinary Business“ (OB) nutzen ihr privates Fahrzeug auch für Dienstfahrten. Sie zeigen nur bei einer möglichen Senkung ihrer Betriebskosten Interesse an einem alternativen Antrieb.

Die „Business Elite“ (BE) ist 40 bis 50 Jahre alt, wohlhabend und verfügt über einen hohen sozialen Status. Kaufanreiz für ein Elektrofahrzeug wäre die Möglichkeit, das eigene Umweltbewusstsein sowie die gesellschaftliche Verantwortung repräsentativ widerspiegeln zu können. Eine Mehrpreisbereitschaft ist vorhanden, Komforteinbußen werden nicht akzeptiert.

① fasst das Fahrverhalten der drei Gruppen in Durchschnitts- und Maximalwerte zusammen. Es fällt auf, dass mit Anstieg von Alter und Karriere die Fahrdistanzen und damit verbundenen -zeiten deutlich größer werden, wobei die im Durchschnitt häufigsten Fahrten die Gruppe OB absolvierte. Die Aufzeichnungen zeigen, dass die in China zulässige Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h in etwa eingehalten wird.

Singapur bietet aufgrund seiner geringen Größe gute Bedingungen für Elektrofahrzeuge. Für eine erfolgreiche Einführung im Privatsektor müsste die Regierung dazu große Investitionen tätigen und an den staatlichen Wohnkomplexen, in denen über 80 % der Bevölkerung lebt, Ladestationen einrichten. Kurzfristig realisierbarer erscheint dagegen der Aufbau einer Ladeinfrastruktur für die Taxiflotte. Diese besteht aus 27.000 Taxis, welche zwar nur 3 % aller Fahrzeuge, aber 15 % der Gesamtfahrleistung im Stadtstaat ausmacht [2]. Die von TUM Create durchgeführte Studie hat

		NEW SOCIAL GENERATION (NSG)	ORDINARY BUSINESS (OB)	BUSINESS ELITE (BE)
HAUPTSÄCHLICHE FAHRZWECKE		Pendeln, Restaurant	Pendeln, Dienstfahrt, Abholung	Pendeln, Dienstreise, Restaurant
DISTANZ [km]	Ø	29,2	41,5	93,5
	max	123,2	188,4	736,0
FAHRTENHÄUFIGKEIT	Ø	2,1	4,4	3,1
	max	7	13	16
ZEITBEDARF [min]	Ø	91,6	123,8	194,1
	max	154	191	659
GESCHWINDIGKEIT [km/h]	Ø	19,1	20,1	28,9
	max	126	133	132

① Tägliches Fahrverhalten in Shanghai der drei untersuchten Bevölkerungsgruppen

ergeben, dass ein Taxi 260 km pro Schicht zurücklegt und häufig durch einen Zweischichtbetrieb permanent im Einsatz ist. In 95 % aller Kundenfahrten werden maximal drei Passagiere chauffiert.

ABLEITUNG VON FAHRZEUGKONZEPTEN

Mit einem Elektrofahrzeug alle Kundenwünsche erfüllen zu wollen, ist technisch und wirtschaftlich nicht zielführend. Daher werden im Folgenden die Fahrzeuganforderungen bewusst aus dem realen Kundenverhalten abgeleitet. In ② werden dazu die Anforderungen

für 95 % aller getätigten Fahrten und 95 % aller höheren Beschleunigungen aufgezeigt. Da hierbei die sehr langen Fahrten und extremen Beschleunigungen herausfallen, sind die maximalen Reichweitenanforderungen in Shanghai für die Gruppe NSG mit 47 km sehr gering, die Gruppe BE fordert dafür 218 km.

Aus wirtschaftlichen Gründen sind Elektrofahrzeuge für die Gruppe OB derzeit nicht interessant. Ein Taxi für Singapur erfordert eine Auslegung für eine große Reichweite und lange Betriebsdauer. Dafür genügt eine nur geringe Höchstgeschwindigkeit. Als Vergleich sind in ② die Eigenschaften des Elektro-

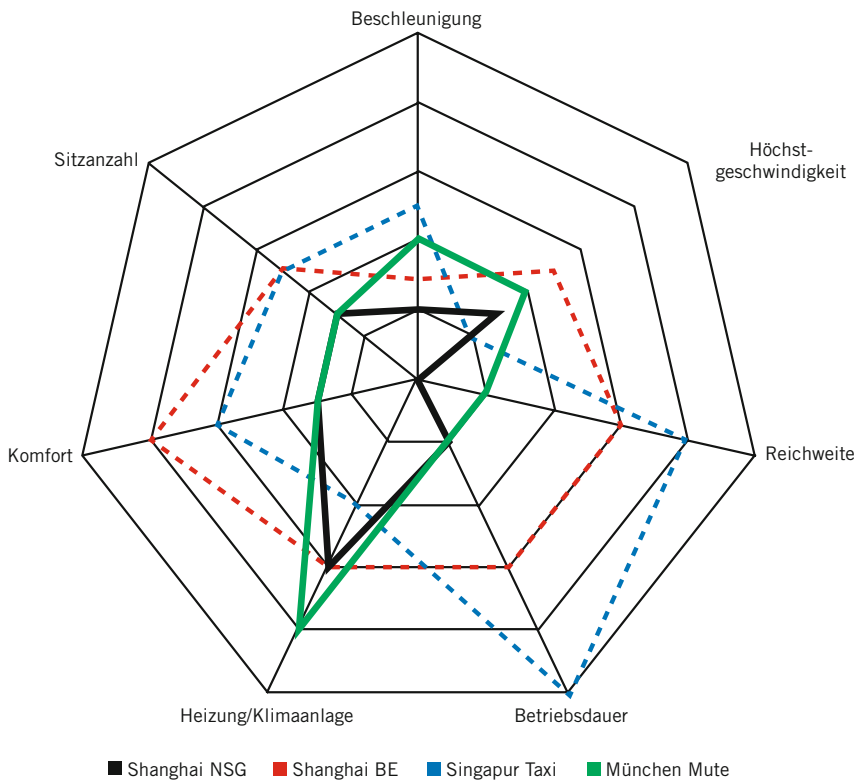
autos Mute dargestellt, welcher von der TU München als ideales Zweitfahrzeug für den Einsatz in Mitteleuropa entwickelt wurde [3].

Am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München wurde in Zusammenarbeit mit der Audi AG das „Eigenschaftsorientierte Konzeptentwicklungstool“ (Eoket) entwickelt [4]. Ziel dieses Werkzeugs ist die Auslegung eines optimalen elektrifizierten Fahrzeugkonzepts aus anwenderabhängigen Eigenschaftszielen. Das Ergebnis beinhaltet alle Fahrzeugdimensionen und legt den Antrieb und Energiespeicher aus. ③ stellt die mit Eoket ausgelegten Fahrzeugkonzepte vor, welche auf die vorgestellten Anforderungen passen. Die Berechnung der Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) erfolgt dabei separat und verwendet aktuelle Kosten und Subventionen.

Für die NSG-Gruppe in Shanghai reicht ein kompakter BEV-Zweisitzer mit einer Antriebsleistung von 43 kW aus. Eine nominelle Batteriekapazität von 20 kWh bedeutet eine Übererfüllung der Reichweitenanforderung. Diese wird hier bewusst in Kauf genommen, da das Fahrzeug somit die maximale staatliche Subvention von 13.750 Euro erhält [5]. Mit dieser Förderung kostet das Fahrzeug bei einer Laufleistung von 10.000 km pro Jahr, einer Haltedauer von vier Jahren und angenommenem Batteriekosten von 300 Euro pro kWh nur 0,16 Euro/km und somit deutlich weniger als ein vergleichbares, konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (Internal combustion engine vehicle, ICEV). Dieser Kaufanreiz für die NSG-Gruppe ist ohne Subvention nicht möglich.

Zum Fahrverhalten dieser Gruppe passt auch der Mute. Allerdings würde dieser in China keine Subvention erhalten, da er die dafür verlangte Mindestanforderung von 15 kWh Batteriekapazität nicht vorweist [5]. Zudem müsste die noch fehlende Klimaanlage nachgerüstet werden.

Die Anforderungen der Gruppe BE erfüllt ein Plug-in-Hybrid-Fahrzeug (PHEV) als Limousine. Die elektrische Antriebsleistung von 45 kW deckt hier den innerstädtischen Bedarf ab. Inklusiv einer Subvention von 5714 Euro beim Kauf eines PHEV [5] ist das Fahrzeug bei einer jährlichen Laufleistung von 25.000 km und einer Haltedauer von fünf Jahren etwas günstiger als ein ICEV. Ohne Sub-



	SHANGHAI NSG	SHANGHAI BE	SINGAPUR TAXI	MÜNCHEN MUTE
BESCHLEUNIGUNG 0–60 km/h [s]	9	8	6	7
HÖCHSTGESCHWINDIGKEIT [km/h]	105	126	100	120
REICHWEITE [km]	47	218	260	100
BETRIEBSDAUER [min/d]	122	221	600	120
BETRIEBBEREICH DER HEIZUNG/KLIMAAANLAGE (T _∞) [°C]	1–35	1–35	25–32	-5–30
KOMFORT	befriedigend	exzellent	sehr gut	befriedigend
SITZANZAHL	2	4	4	2

② Marktspezifische Anforderungen für die Auslegung der Fahrzeugkonzepte – sieben Punkte von Beschleunigung bis Sitzanzahl (Spinnennetz wird durch technisch realisierbare Höchstwerte aufgespannt)

	SHANGHAI NSG	SHANGHAI BE	SINGAPUR TAXI	MÜNCHEN MUTE
KONZEPT (ANTRIEB)	BEV, Kleinwagen (Front)	PHEV, Limousine (Front)	BEV, Minivan (Front)	BEV, Mikrowagen (Heck)
LEERGEWICHT [kg]	1230	2100	2130	500
c_w -WERT	0,30	0,33	0,34	0,27
FRONTFLÄCHE [m ²]	2,0	2,4	2,5	1,7
RADSTAND [mm]	2530	2900	2610	2100
LEISTUNG $P_{\text{GESAMT}}/P_{\text{ELEKTRISCH}}$ [kW]	43/43	120/45	104/104	15/15
BATTERIE (NOMINELL) [kWh]	20	17	88	12,5
EL. REICHWEITE _{NEFZ} /EL. REICHWEITE _{KUNDEN} [km]	106,1/72,1	54,1/47,6	282,6/260,1	113,6/100,5
GESAMTKOSTEN BEV BZW. PHEV OHNE/MIT SUBVENTION [EURO/km]	0,40/0,16	0,40/0,37	0,24/0,23	0,26 (ohne Subv.)
GESAMTKOSTEN ICEV OHNE/MIT SUBVENTION [EURO/km]	0,31 (ohne Subv.)	0,38 (ohne Subv.)	0,23/0,20	0,26 (ohne Subv.)

③ Resultierende Fahrzeugkonzepte für Shanghai und Singapur verglichen mit dem Elektroautokonzept Mute für München

vention würde das PHEV zu einer jährlichen Mehrkostenbelastung von 750 Euro führen, welche von den wohlhabenden Kunden für den Imagegewinn aber in Kauf genommen werden würde.

Für Singapur erlaubt eine bewusste Auslegung des Fahrzeugs für nur vier Insassen kompaktere Ausmaße und somit eine Gewichts- und „Verbrauchs“-reduzierung. Mit der Prämisse, ein lokal emissionsfreies Taxi zu realisieren, wird das Fahrzeug dennoch sehr schwer, da das für 260 km ausgelegte Batteriepack – bei einer angenommenen Energiedichte von 150 Wh/kg – eine Masse von 590 kg hat. Dank der extrem hohen Laufleistung wird der höhere Fahrzeugpreis aufgefangen, sodass die Gesamtkosten das Niveau eines konventionellen Taxis erreichen, sofern der Dieselmotorkraftstoff für Taxis nicht mehr subventioniert werden würde.

ENERGIEBEDARF

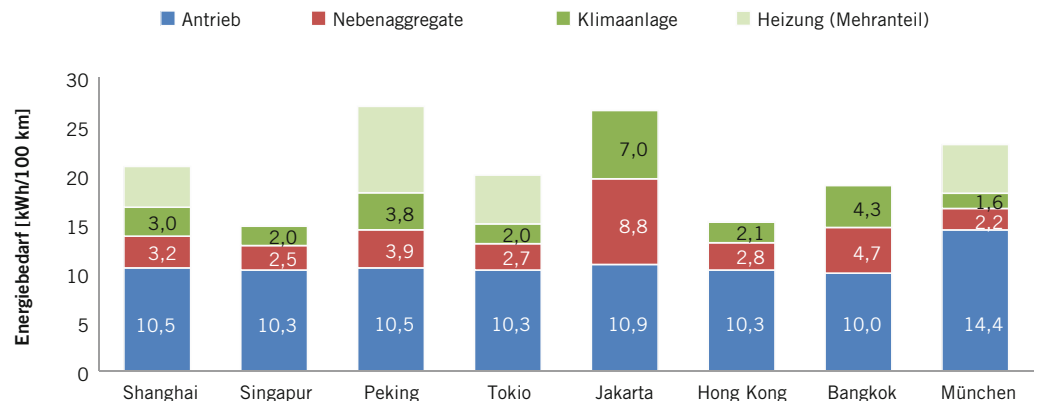
Im Folgenden wird der Einfluss der lokalen Bedingungen auf Energiebedarf und CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen aufgezeigt. Dabei wird der Einsatzort auf mehrere asiatische Megacities sowie München erweitert. Als Referenzfahrzeug dient jeweils der für Shanghai ausgelegte Kleinwagen, erste Spalte in ③.

④ zeigt die Ergebnisse einer Simulation zur Abschätzung des Energiebedarfs.

Hierbei wurden Fahrzyklen verwendet, welche aus realen Messdaten aus Shanghai, Singapur und München erstellt worden waren. Diese wurden auf Peking, Tokio, Jakarta und Hong Kong übertragen; für Bangkok wurde auf den charakteristisch passenden Prüfzyklus New York City Cycle (NYCC [6]) zurückgegriffen.

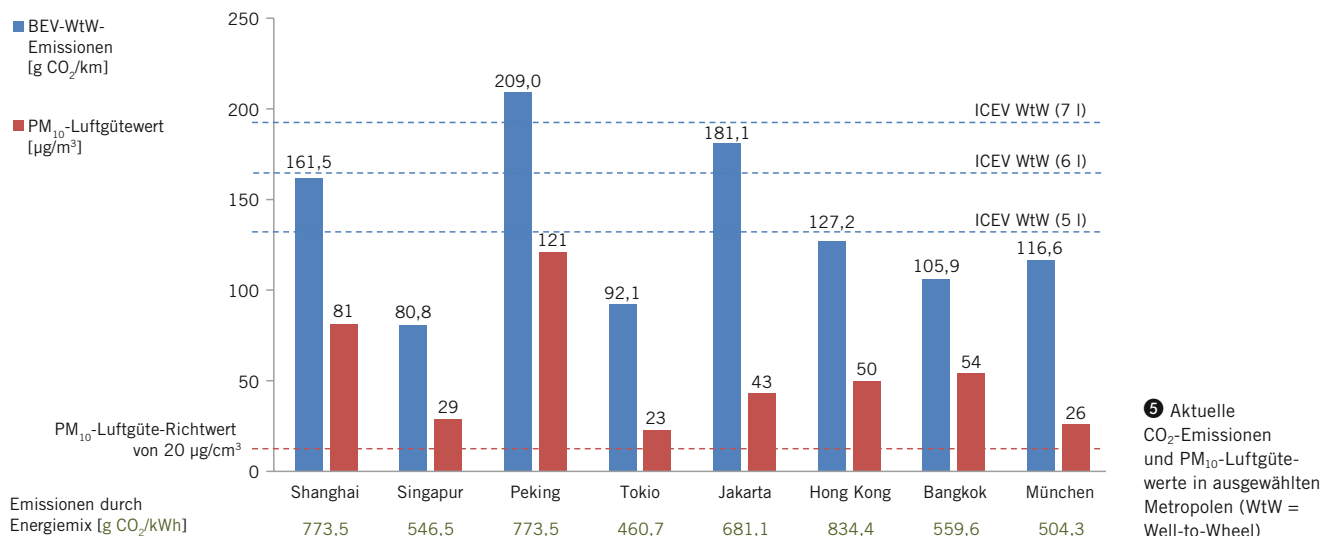
Während sich die benötigte Antriebsenergie in den verschiedenen asiatischen Städten nur geringfügig unterscheidet, zeigt der anteilige Stromverbrauch für Nebenaggregate sowie Heizung/Klimaanlage große Differenzen auf. Der auf die zurückgelegte Distanz bezogene Energiebedarf steigt bei den Nebenaggregaten antiproportional mit der jeweiligen Durchschnittsgeschwindigkeit. So kann dieser in Städten mit sehr zähem Verkehr wie in Jakarta einen extrem hohen Wert einnehmen.

Ebenfalls großen Einfluss hat die Durchschnittsgeschwindigkeit auf die Klimatisierung des Innenraums. So weisen Singapur und Jakarta quasi identische Klimabedingungen, aber dafür eine Differenz von 5 kWh pro 100 km an Energiebedarf für die Klimaanlage auf. Ein konstanter Leistungsbedarf von



④ Simulierter Energiebedarf für Sommer und Winter in sieben asiatischen Städten und in München

$T_{\infty, \text{Sommer}}$	35 °C	32 °C	31 °C	30 °C	31 °C	31 °C	35 °C	30 °C
$T_{\infty, \text{Winter}}$	1 °C	30 °C	-10 °C	-2 °C	29 °C	13 °C	31 °C	-5 °C
$\varnothing v_{\text{Verkehr}}$	22 km/h	28 km/h	18 km/h	26 km/h	8 km/h	25 km/h	15 km/h	32 km/h



2,3 kW für die Heizung führt dagegen in Städten mit sehr kalten Wintern wie beispielsweise Peking annähernd zu einer Vordoppelung des Bedarfs und somit einer Halbierung der Reichweite. Die Verwendung eines von der Batterie entkoppelten Zuheizers (durch Kraftstoff gespeist) ist hier sehr zu empfehlen, auch wenn dadurch die lokale Emissionsfreiheit nicht mehr gegeben ist.

Beim Vergleich mit München ist zu sehen, welcher deutlichen Einfluss die Infrastruktur und damit das Fahrverhalten auf den Energiebedarf hat. Der hohe Landstraßen- und Autobahnanteil, welcher so in den Megacities nicht zu finden ist, führt zusammen mit der zügigen Fahrweise der Probanden zu einem etwa 40 % höheren Energiebedarf für den Antrieb als in Asien.

NACHHALTIGKEIT

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) gibt zur Verbesserung der Luftqualität in

Städten für Feinstaub (PM, Particulate Matter) den PM₁₀-Luftgüte-Richtwert im Jahresmittel bei 20 µg/m³ mit Zwischenzielen von 30, 50 und 70 µg/m³ vor [7].

⑤ zeigt die aktuellen PM₁₀-Werte in einigen asiatischen Millionenstädten verglichen mit dem Wert in München. Bis auf Singapur und Tokio übertreffen die Metropolen den Richtwert um mehr als das Doppelte. Besonders die chinesischen Städte zeigen einen alarmierend hohen Wert an Feinstaub, welcher durch den Einsatz von lokal emissionsfreien Elektrofahrzeugen gemindert werden könnte. Verschärfte Abgasnormen bei konventionellen Fahrzeugen (ICEV) können jedoch die gleiche Wirkung erzielen.

Die global betrachteten CO₂-Ausstöße sind vom jeweiligen Energiemix [8] abhängig und spiegeln sich in den ebenfalls in ④ dargestellten Well-to-Wheel (WtW)-Emissionen für den NSG-Kleinwagens wider. Auch hier zeigen die chinesischen Städte aufgrund des mit knapp 80 % sehr hohen Kohleanteils im Strommix die höchsten Werte auf. So resultiert damit in Peking ein globaler CO₂-Ausstoß, der höher ist als bei einem konventionellen Fahrzeug mit einem Kraftstoffverbrauch von 7 l auf 100 km. Dennoch sind besonders hier Elektrofahrzeuge aus umweltpolitischer Sicht zur Verbesserung der lokalen Luftqualität zu fördern. In Jakarta dagegen, dessen PM₁₀-Wert noch als akzeptabel gewertet wird, ist mit derzeitigem Energiemix und vorherrschendem Verkehrschaos die Einführung von Elektrofahrzeugen nicht nachhaltig.

FAZIT

Elektrofahrzeuge können dazu beitragen, die in Millionenstädten oftmals problematische Luftverschmutzung und Lärmemission zu lindern. Extreme Temperaturen und hohe Verkehrsdichten, wie in Asien häufig zu finden, beeinflussen jedoch enorm den Energiebedarf. Wirtschaftlichkeit und nachhaltige Schadstoffreduzierung sind nur durch eine bewusste Auswahl der Einsatzorte sowie eine punktgenaue Auslegung der Fahrzeugkonzepte hinsichtlich realer Kundenanforderungen und lokaler Rahmenbedingungen zu erreichen. Geschieht dies, kann auch heute bereits wettbewerbsfähige Elektromobilität angeboten werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Audi AG, Eon AG, TU München: Abschlussbericht Verbundvorhaben eFlott. 2011
- [2] Singapore Land: Transport Statistics in Brief. 2012
- [3] www.mute-automobile.de
- [4] Wiedemann, E.; et al.: Optimization of Electric Vehicle Concepts Based on Customer Relevant Characteristics. In: SAE World Conference, Detroit, USA, 2012
- [5] Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China: Finance Subsidy Provisional Regulation of Private Purchase of NEV. 2012
- [6] United States Environmental Protection Agency: New York City Cycle
- [7] WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter: Ozone, Nitrogen, Dioxide and Sulfur Dioxide. 2005
- [8] International Energy Agency: Electricity Data. 2009

DANKE

Die vorliegende Arbeit wurde durch die National Research Foundation in Singapur im Rahmen des Programms „Campus for Research Excellence and Technological Enterprise“ (Create) gefördert. Für die Freigabe der in Shanghai erhobenen Versuchsdaten bedanken sich die Autoren bei der Audi AG.

↓ DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de

🇬🇧 READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com

