



Mira Schüller (oben), Sarah Tewiele (unten). Fotos: Daniel Schumann

*Mobilität ist ein wesentlicher Bestandteil unserer Gesellschaft, aber auch gleichzeitig Ursache für die Produktion von Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffen. Für eine realistische Einschätzung des mit der Mobilität einhergehenden Kraftstoff-beziehungsweise Energiebedarfs und damit verbundenen Emissionsausstoßes werden realitätsnahe Testverfahren benötigt. Eine Möglichkeit stellen Testzyklen dar, die die Mobilität abbilden.*

# Abbildung von Mobilität durch realitätsnahe Testzyklen

Grundlagen, Ergebnisse und Potentiale

Von Sarah Tewiele, Mira Schüller & Patrick Driesch

Das Verkehrssystem in Deutschland steht vor großen Herausforderungen. Mobilität muss zukünftig energieeffizienter sowie klima- und umweltverträglicher werden. Eine Studie des ADAC aus dem Jahr 2019 belegt, dass der Großteil der Bevölkerung davon ausgeht, dass das Auto weiterhin das wichtigste Verkehrsmittel bleibt [1]. Für die Umgestaltung der Mobilität stellt somit die Elektromobilität eine Schlüsseltechnologie dar.

Aber hierfür müssen Elektrofahrzeuge wettbewerbsfähig und vor allem alltagstauglich sein. Bei der Bewertung der Alltagstauglichkeit gewinnen Verbrauchs- und Reichweitenangaben an Bedeutung. Aber genau diese stehen häufig in der Kritik, nicht verlässlich zu sein. Das liegt an dem Verfahren zur Bestimmung dieser Angaben. Aufgrund der notwendigen Reproduzierbarkeit erfolgt die Bestimmung auf Rollenprüfständen mit standardisierten Fahrzyklen.

Ein Fahrzyklus ist dabei ein Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit. Er besteht aus Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen, Phasen konstanter Geschwindigkeit sowie Standzeiten. Fahrzyklen sollen reales Fahrverhalten beispielsweise von einer bestimmten Region oder einer Nutzer\*innengruppe abbilden. Neben der Nutzung in den offiziellen Messverfahren werden sie in der Fahrzeugentwicklung und -simulation verwendet. In der Vergangenheit wurden zahlreiche Fahrzyklen für verbrennungsmotorische Fahrzeuge entwickelt. E-Fahrzeuge besitzen allerdings ein anderes Beschleunigungsverhalten, geringere Geräuschemissionen sowie die Möglichkeit der Bremsenergieerückgewinnung. Daher sollte es auch Zyklen speziell für diese Antriebsart geben.

Die offiziellen Verbrauchsangaben elektrischer Fahrzeuge basieren jedoch auf Zyklen wie dem Worldwide Harmonized Light-Duty Test Cycle (WLTC). Er basiert auf einer beispiellos großen Datenbasis, die allerdings ausschließlich von ver-

brennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen stammt. Darüber hinaus kann ein harmonisierter Standardzyklus wie der WLTC nicht repräsentativ für jede Anwendung sein. Beispielsweise unterscheidet sich das Fahrverhalten in Peking vom Fahrverhalten in Berlin oder Köln. Bei der Reichweitenermittlung von Elektrofahrzeugen wird beim WLTC überdies ein zusätzliches Segment eingeschoben, bei dem das Fahrzeug konstant 100 Kilometer pro Stunde fährt. Dadurch wird die Batterie schneller entladen und der Zeitaufwand für den Test minimiert. Charakteristisch für die Nutzung von Elektrofahrzeugen ist das nicht.

Neben den offiziellen Zyklen gibt es eine Handvoll nicht-legislativer Zyklen speziell für Elektrofahrzeuge. Allerdings basieren nur wenige auf umfangreichen, validen Datenbasen. Für verlässliche Verbrauchs- und Reichweitenangaben und um die Alltagstauglichkeit eines Elektrofahrzeugs für individuelles Fahr- und Nutzungsverhalten bewerten zu können, sind zielgerichtete und auf valide Datengrundlagen basierende Fahrzyklen jedoch essenziell.

### Relevante Einflussfaktoren auf Verbrauch und Emissionen

Der Verbrauch eines Fahrzeuges wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Insbesondere bei Elektrofahrzeugen ist dies von großer Relevanz, da ein hoher Energieverbrauch eine geringe Reichweite bedeutet. Da die sogenannte Reichweitenangst noch immer einer der größten Barrieren für Elektrofahrzeuge ist, ist eine genaue Kenntnis der Einflussfaktoren von großer Bedeutung. Des Weiteren bedeutet ein hoher Verbrauch auch hohe Emissionen. Zwar fährt ein Elektrofahrzeug lokal emissionsfrei, bei der Stromgenerierung können allerdings je nach verwendetem Strommix nicht unerhebliche Emissionen freigesetzt werden.

Ein relevanter Einflussfaktor ist die Temperatur. Je nach Umge-

bungstemperatur werden für einen angenehmen Fahrkomfort Nebenaggregate wie eine Heizung oder Klimatisierung benötigt. Anders als bei verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen steht bei reinen Elektrofahrzeugen für das Heizen keine Abwärme zur Verfügung, die dafür erforderliche Energie muss wie auch für eine Klimatisierung der Batterie entnommen werden. Dementsprechend steigt der Verbrauch.

Neben einem Verbrauchsanstieg durch die Nutzung von Nebenaggregaten kann eine niedrige Temperatur auch die Leistung der Batterie verringern. Die geringere Leistung kommt dadurch zustande, dass die chemischen Prozesse unter Kälte langsamer ablaufen, da der Innenwiderstand sowie die Viskosität des Elektrolyten steigen. Aber auch hohe Temperaturen sind für die Batterie unvorteilhaft, da sie die Batteriealterungsprozesse beschleunigen. Untersuchungen mit realen Fahrdaten haben gezeigt, dass die für den Verbrauch optimale Temperatur zwischen 20 und 23°C liegt [2]. Gerade in Regionen mit extrem warmen oder kalten Temperaturen bedeutet dies einen bedeutsamen Verbrauchsanstieg im Vergleich zu unter Testbedingungen ermittelten Verbräuchen. In Ländern mit Regionen unterschiedlicher klimatischer Verhältnisse wie beispielsweise China kann der Temperatureinfluss eine Verbrauchsdifferenz von 28 Prozent zwischen zwei Städten mit identischem Fahrverhalten bedeuten.

Darüber hinaus ist das Fahrverhalten eine entscheidende Einflussgröße. Dieses lässt sich im Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil über die Zeit abbilden. Das Fahrverhalten variiert je nach individuellem Fahrstil, wird aber auch durch äußere Einflussfaktoren bestimmt. Hierbei ist vor allem das Verkehrsumfeld maßgeblich. Dazu zählen neben der Straßenart (Autobahn, Landstraße, Stadtverkehr) andere Verkehrsteilnehmer\*innen und der Verkehrsfluss, also das Stauvorkommen. Das Fahrverhalten

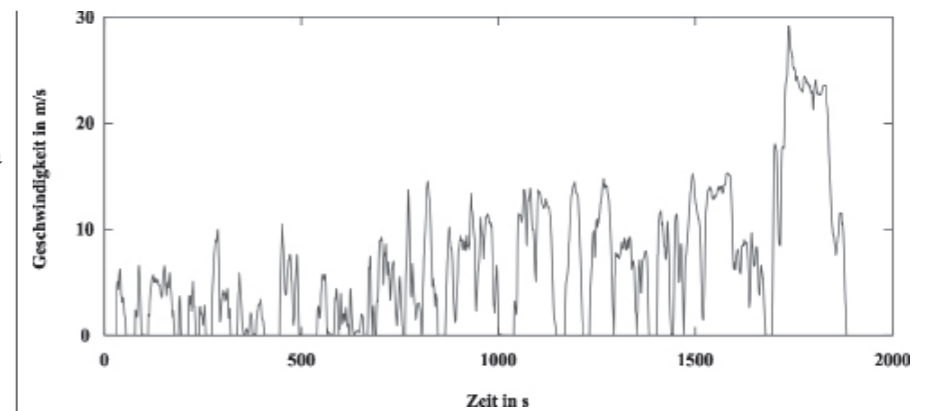
kann durch eine Vielzahl an statistischen Parametern beschrieben und so mit Hilfe von Fahrdaten verglichen werden. Dazu zählen beispielsweise Mediane oder Maxima von Geschwindigkeit oder Beschleunigung. Diese Parameter können für eine ganze Fahrt bestimmt werden oder für einzelne Fahrtabschnitte. Eine Möglichkeit ist dabei die Unterteilung in Fahrmodi. Es gibt die Fahrmodi Beschleunigung oder Bremsen beziehungsweise zu dem Stand, Standphasen, Konstantfahrt oder Zwischenbeschleunigung beziehungsweise -bremsung. Der Vergleich der Parameter für einen Fahrmodus ermöglicht einen differenzierteren und damit genaueren Vergleich. Ob das Fahrverhalten eher dynamisch beziehungsweise sportlich oder zurückhaltend ist, kann durch die Standardabweichung der Beschleunigung beschrieben werden.

Es ist offensichtlich, dass die genannten Einflussfaktoren zum einen individuell unterschiedlich ausgeprägt sind, je nachdem welches Fahrzeug und welcher Fahrstil gerade verwendet wird und welche Strecken (Autobahn/Stadt) zurückgelegt werden. Zum anderen variieren die äußeren Einflussfaktoren stark je nach Region. So zeigten Messungen in China und Deutschland deutliche Unterschiede.

Es ist also unerlässlich, Fahrzyklen je nach Anwendungsfall zu generieren und nicht ausschließlich auf standardisierte Fahrzyklen zurückzugreifen. Umfangreiche Datenbasen sind hierzu essenziell.

### Generierung transienter Fahrzyklen

Die Entwicklung von Fahrzyklen auf Basis realer Fahrdaten kann in zwei Schritte untergliedert werden. Zunächst erfolgt eine Segmentierung der Daten. Die Segmentlänge hängt dabei von der verwendeten Methode ab. Bei der Mikrotrip-basierten Methode werden die realen Fahrdaten in sogenannte Mikrotrips unterteilt. Ein Mikrotrip ist dabei eine Fahrt zwischen zwei aufeinander-



(1) Geschwindigkeitszyklus

Quelle: Schüller, M.: Technisch optimale Auslegung von Elektrofahrzeugen für Nutzergruppen in China und Deutschland: eine vergleichende Untersuchung. Universität Duisburg-Essen, 2019

der folgenden Stopps. Eine weitere Möglichkeit stellt die Segmentierung anhand gleicher Eigenschaften dar, wie beispielsweise dem Straßentyp oder der Verkehrsdichte. Bei der Zyklusgenerierung mit Musterklassifizierung werden die Fahrdaten in Segmente gleicher Dauer untergliedert. Eine Unterteilung in Mikrosequenzen wie Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen, Sequenzen konstanter Geschwindigkeit oder Standphasen ist bei der stochastischen Zyklusgenerierung üblich. Aber auch eine noch feinere Untergliederung in einzelne Geschwindigkeits-Beschleunigungs-Zustände ist hier möglich.

In einem zweiten Schritt werden die zuvor gebildeten Segmente wieder zusammengesetzt, wodurch der finale charakteristische Zyklus entsteht. Hierfür werden die Daten in der Regel im Vorfeld anhand ihrer Ähnlichkeitsstrukturen beispielsweise durch Clusteranalysen zusammengefasst. Die Auswahl der für die Bildung des finalen Zyklus aneinanderzureihenden Segmente erfolgt entweder zufällig, inkrementell unter Berücksichtigung einer möglichst optimalen Zyklusgüte oder basierend auf Wahrscheinlichkeiten.

Für eine möglichst genaue Abbildung realer Fahrten in einem Fahrzyklus sind viele empirische Fahrdaten notwendig. Die empirische Datenbasis der im Folgenden vorgestellten Fahrzyklen basiert auf

mehreren Forschungsprojekten. Die größte Datenbasis wurde im Rahmen des Forschungsprojekts PREMIUM erhoben [3]. Über einen Zeitraum von zwei Jahren wurden in ganz Deutschland die alltäglichen Fahrten von 175 Elektrofahrzeugen mit und ohne Range Extender aufgezeichnet. Die Fahrzeuge wurden in gewerblichen Flotten oder als persönlich zugeordnete Dienstwagen eingesetzt. Darüber hinaus wurden Fahrdaten von Elektrofahrzeugen in China erhoben. Hier wurden 15 Fahrzeuge in Beijing und Wuhan mit Datenloggern ausgestattet. Dadurch sind Daten eines europäischen Industrielandes als auch eines asiatischen Schwellenlandes vorhanden. Die Datenbasis ist in dieser Form einzigartig.

Neben dem Geschwindigkeitsprofil wurden ebenfalls die GPS-Position, die Außentemperatur sowie der Batteriestrom erfasst.

Aus den erfassten Fahrdaten wurden für unterschiedliche Anwendungsfälle mehrere verschiedene Fahrzyklen generiert. Außerdem fanden regionale Einflussfaktoren Berücksichtigung, um Zyklen für bestimmte Länder beziehungsweise Regionen zu erstellen.

Die Fahrzyklen wurden jeweils anhand eines Performance-Werts bewertet, indem statistische Parameter der gesamten Datenbasis mit denen des Fahrzyklus abgeglichen werden. Die Parameterauswahl ist dabei

an den Fahrzyklus und jeweiligen Anwendungsfall angepasst. Einer der erstellten Geschwindigkeitszyklen ist in Abbildung (1) dargestellt.

### Ableiten von Batterielastzyklen

Neben Geschwindigkeitszyklen gibt es Lastzyklen, die Leistungs- oder Stromprofile einer Fahrzeugbatterie darstellen. Sie sind essenziell für die Entwicklung elektrischer Komponenten eines Elektrofahrzeuges. Mit charakteristischen Lastzyklen können reale Belastungen simulativ oder im Batterietestlabor untersucht werden. Zudem ermöglichen Lastzyklen neben der Betrachtung der Lastanteile für den Fahrzeugantrieb ebenfalls die explizite Berücksichtigung des Betriebs von Nebenaggregaten. Gerade der Betrieb von Nebenaggregaten wie Heizung oder Klimaanlage kann den Energiebedarf und damit die verfügbare Reichweite entscheidend beeinflussen.

Sowohl beim WLTC als auch bei den meisten nicht-legislativen Zyklen findet der Betrieb von Zusatzverbrauchern keine Berücksichtigung. Bei US-Zyklen wird ein entsprechender Mehraufwand lediglich durch einen pauschalen Aufschlag von 30 Prozent angenommen, was ebenfalls nicht für alle Anwendungen repräsentativ ist.

Bei der Entwicklung von Lastzyklen für den Fahrzeugantrieb gibt es zwei mögliche Ansätze. Die bereits für die Fahrzyklusentwicklung beschriebene Mikrotrip-Methode ist anwendbar, wenn neben Geschwindigkeitsprofilen ebenfalls die Batterieströme erfasst wurden. Bei der Segmentierung der Geschwindigkeitsverläufe werden gleichzeitig die Stromprofile mit untergliedert. Bei der späteren Bildung des finalen Fahrzyklus werden ebenfalls die entsprechenden Stromsegmente aneinandergesetzt. So entsteht neben einem Fahrzyklus gleichzeitig ein Lastzyklus.

Beim zweiten Ansatz werden Batteriestrom- oder -leistungsprofile

mithilfe eines Fahrzeugsimulationsmodells aus den Geschwindigkeitsprofilen abgeleitet. Je nach Detailgrad des Modells fließen neben den Geschwindigkeitsprofilen auch weitere Größen wie Steigung oder Außentemperatur ein. [4]

Beide Ansätze besitzen Vor- und Nachteile. Bei der Mikrotrip-Methode ist keine aufwendige Modellbildung erforderlich. Allerdings ist keine Unterscheidung der Lastanteile für den Fahrzeugantrieb und den Betrieb von Zusatzverbrauchern möglich. Auch wird die Abhängigkeit der Batterielast für den Zusatzverbraucherbetrieb von der Fahrzeit und der Außentemperatur nicht berücksichtigt. Diese Nachteile bestehen beim zweiten Ansatz nicht. Aus diesem Grund findet diese Methode im Weiteren Anwendung.

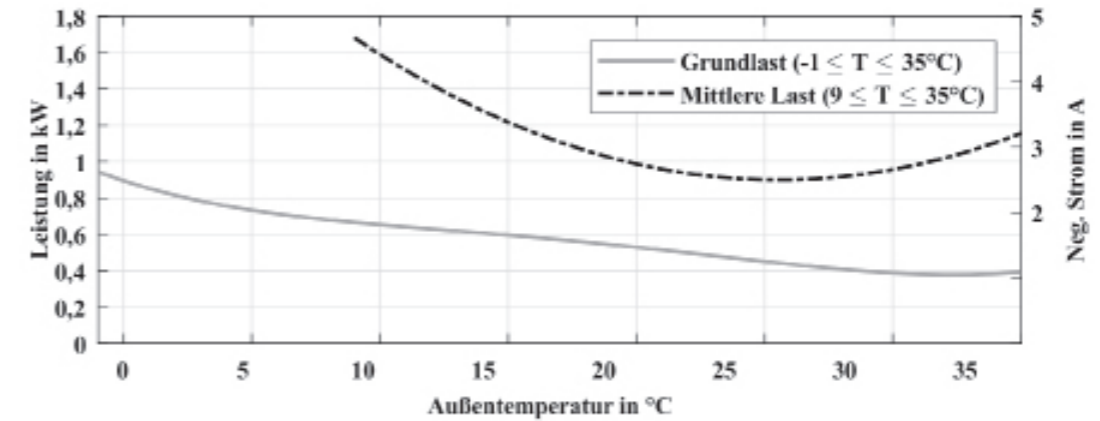
Zur Simulation des Batteriestroms wurde ein Längsdynamikmodell des im großen Stil vermessenen BMW i3 aufgebaut. Neben Geschwindigkeitsprofilen fließen ebenfalls Steigungs- und Außentemperaturverläufe in die Simulation ein. Beim BMW i3 handelt es sich um ein Fahrzeug mit Zentralantrieb. Die Batterie speist einen Hybrid-Synchronmotor, der wiederum die Hinterräder antreibt. Beim Bremsen wird Energie zurück in die Batterie gespeist. Verluste im Antriebsstrang werden durch entsprechende konstante Wirkungsgrade berücksichtigt. Für den Motor ist ein Kennfeld hinterlegt. Die Parametrierung erfolgte zum einen anhand von Herstellerangaben. Zum anderen wurden Ausrollversuche zur Bestimmung des Roll- und Luftwiderstandsbeiwerts durchgeführt. Auf Basis realer Fahrdaten erfolgte in mehreren Stufen eine Modelloptimierung und final eine -validierung.

Das Simulationsmodell ermöglicht neben der Generierung von Lastprofilen ebenfalls eine detaillierte Analyse des Energiebedarfs. Diese ermöglicht die Erlangung wertvoller Erkenntnisse für die spätere Zyklusbildung.

Der Energiebedarf für den Fahrzeugantrieb ergibt sich aus den einzelnen Fahrwiderständen, die zur Fahrt in einem gewünschten Betriebszustand überwunden werden müssen. Es zeigt sich, dass bei der analysierten Datenbasis der Rad- und der Luftwiderstand den höchsten Anteil an der aufgewendeten Antriebskraft besitzen. Der Anteil des Beschleunigungswiderstands ist mit neun Prozent sehr gering, der des Steigungswiderstands mit unter einem Prozent nahezu vernachlässigbar. Der geringe Einfluss des Steigungswiderstands bei der in diesem Beitrag untersuchten Datenbasis liegt daran, dass ganze Fahrprofile und nicht lediglich einzelne Fahrten berücksichtigt werden. Die Fahrzeuge kehren immer zum gleichen Ausgangspunkt wie zum Beispiel dem Firmensitz zurück. In Summe legen sie somit Null Höhenmeter zurück. Aufgrund des sehr geringen Anteils fließen im Rahmen dieses Beitrags keine Steigungsinformationen in die Zyklusbildung ein.

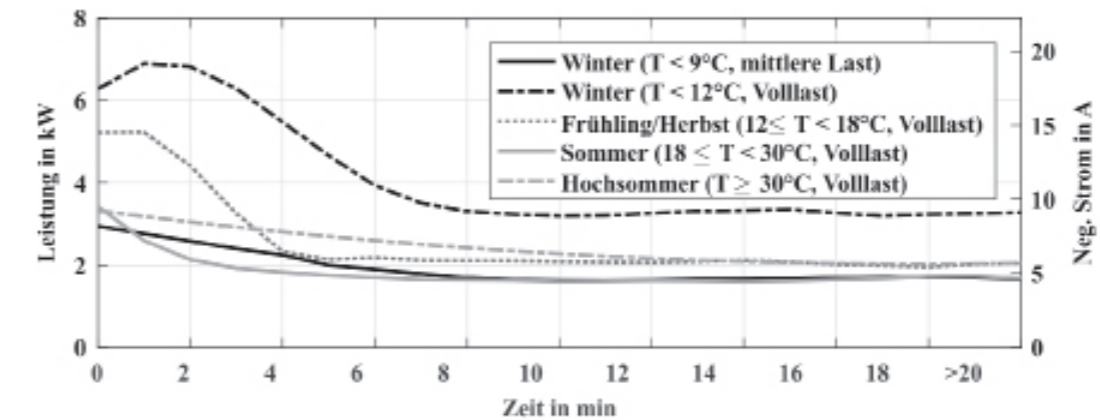
Bei ausschließlicher Betrachtung der positiven Anteile der gesamten Antriebskraft wird außerdem deutlich, dass insbesondere der Beschleunigungswiderstand einen sehr hohen Anteil besitzt, der sogar die Anteile von Luft- und Radwiderstand übersteigt. Durch Rekuperation verringert sich dieser Anteil allerdings wieder stark. Hier wird der Vorteil der Bremsenergieerückgewinnung und somit ihre Bedeutung für die Konstruktion für Elektrofahrzeugzyklen besonders deutlich.

Die Nutzung von Nebenaggregaten kann ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf eines E-Fahrzeugs haben. Die Ableitung von Lastzyklen für den Betrieb von Nebenverbrauchern erfolgt auf Basis einer Analyse der Leistung, die die Projektfahrzeuge im Stillstand aufgewendet haben. Die im Stillstand abgerufene Leistung dient bei Elektrofahrzeugen



(2) Temperaturabhängige Lastzyklen für den Betrieb von Nebenaggregaten

Quelle: Tiewiele, S.: Generierung von repräsentativen Fahr- und Lastzyklen aus realen Fahrdaten batterieelektrischer Fahrzeuge. Universität Duisburg-Essen, 2020



(3) Fahrzeitabhängige Lastzyklen für den Betrieb von Nebenaggregaten

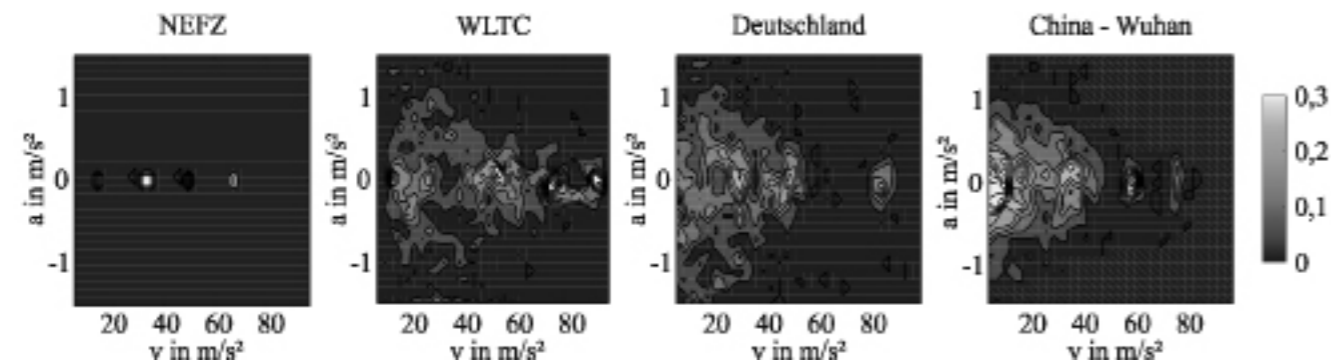
Quelle: Tiewiele, S.: Generierung von repräsentativen Fahr- und Lastzyklen aus realen Fahrdaten batterieelektrischer Fahrzeuge. Universität Duisburg-Essen, 2020

ausschließlich dem Betrieb von Zusatzverbrauchern. Hier ist eine Abhängigkeit von der Außentemperatur und dem Nutzungsgrad festzustellen. Bei niedrigen Temperaturen ist eine maximale Last von über sieben Kilowatt (kW) festzustellen. Mit zunehmender Temperatur fällt der Verlauf bei maximaler Nutzung auf ein Minimum von zwei Kilowatt und steigt dann wieder etwas an. Die hohe Leistung bei niedrigen Temperaturen ist auf die Heizung zurückzuführen. Die Klimaanlage hat im hohen Temperaturbereich vergleichsweise wenig Einfluss. Die Auswertung der Stillstandsphasenleistung hinsichtlich einer minimalen Nutzung der Nebenaggregate ergibt eine über den gesamten Temperaturbereich nahezu konstante Grundlast zwischen 0,4 und einem Kilowatt.

Des Weiteren weist die Stillstandsphasenleistung eine Abhängigkeit von der Fahrzeit auf. Beispielsweise ist der Verlauf der maximalen Leistung bei niedrigen Temperaturen zu Fahrtbeginn durch eine hohe Heizleistung zur Temperierung der Fahrgastzelle gekennzeichnet. Ist die Aufheizung abgeschlossen, sinkt die Leistung. Aufgrund der Vielzahl der Einflüsse ist die Generierung mehrerer Lastzyklen sinnvoll, um verschiedene Anwendungsfälle widerzuspiegeln. Für die Grundlast sowie die mittlere Last sind Zyklen ausreichend, die lediglich eine Temperaturabhängigkeit aufweisen (Abb. 2). Für die maximale Nutzung wurden für verschiedene Temperaturbereiche fahrzeitabhängige Profile generiert. Die Temperaturbereiche lassen sich als Winter-, Sommer-, Hochsommer-

und Übergangsszenario interpretieren (Abb. 3).

Die Dauer des WLTC beträgt 30 Minuten, die theoretisch zurückgelegte Strecke 23,3 Kilometer. Abhängig vom gewählten Lastzyklus ergibt sich über diesen Zeitraum für den Betrieb von Nebenaggregaten ein Mehrbedarf zwischen 0,8 und 8,2 Kilowattstunden pro 100 Kilometer. Laut Hersteller verbraucht der BMW i3, der unter anderem zu den untersuchten Flottenfahrzeugmodellen gehört, durchschnittlich 12,9 Kilowattstunden pro 100 Kilometer [5]. Bei diesem Modell umfasst der Mehrbedarf durch den Betrieb von Nebenaggregaten zwischen 6 und 63 Prozent. Hier wird sehr deutlich, wie stark Nebenverbraucher den Energiebedarf und somit die Reichweite



(4) SAPD der beiden legislativen Zyklen (NEFZ, WLTC) und ausgewählter, speziell für E-Fahrzeuge entwickelter Zyklen (abgestufte Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen)  
Quelle: Schüller, M.: Technisch optimale Auslegung von Elektrofahrzeugen für Nutzergruppen in China und Deutschland: eine vergleichende Untersuchung, Universität Duisburg-Essen, 2019

eines Elektrofahrzeugs beeinflussen können. Die gezielte und der individuellen Nutzung angepasste Verwendung von Lastzyklen ist somit essenziell.

Die Lastzyklen für den Fahrzeugantrieb bilden jeweils gemeinsam mit einem Lastprofil für den Betrieb von Nebenaggregaten den finalen Gesamtlastzyklus. Die Nebenverbraucherlastzyklen sind gegeneinander austauschbar. [4]

### Bewertung von Fahrzyklen

Dass sich transiente Fahrzyklen auf Basis realer Fahrdaten deutlich von standardisierten Fahrzyklen unterscheiden, wird beispielsweise bei Betrachtung der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverteilung deutlich. Der in Kritik geratene, aber in Deutschland bis 2018 verwendete, Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) weist keinerlei Dynamik im Fahrprofil auf, so dass höhere Beschleunigungswerte nicht vorhanden sind. Der seitdem verwendete WLTC hat eine größere Varianz an Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten. Trotzdem sind Unterschiede zu den Fahrzyklen, die speziell für Elektrofahrzeuge auf Basis entsprechender realer Fahrdaten generiert wurden, deutlich zu erkennen. Es werden weniger hohe Geschwindigkeitsbereiche befahren, dafür variieren die Beschleunigungswerte stärker. Dies lässt sich anschaulich in einer sogenannten Speed

Acceleration Probability Distribution (SAPD) darstellen, in der die Häufigkeit von Beschleunigung über Geschwindigkeit farblich abgestuft dargestellt wird (Abb. 4).

Weiterhin zeigen sich wesentliche Unterschiede zwischen verschiedenen Regionen. So ist beispielsweise das Fahrverhalten in Wuhan deutlich weniger dynamisch als in den anderen untersuchten Regionen. Selbst in zwei Städten eines Landes kann sich das Fahrverhalten durchaus unterscheiden, wie zum Beispiel bei einer vergleichenden Analyse der beiden chinesischen Städte Wuhan und Beijing deutlich wurde. Maßgeblich ist dafür unter anderem das Verkehrsumfeld. [2]

### Anwendungsmöglichkeiten von Testzyklen

Testzyklen ermöglichen die Durchführung reproduzierbarer Tests und Simulationen. Legislative Zyklen werden zur offiziellen Bestimmung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs beziehungsweise Energiebedarfs von Kraftfahrzeugen verwendet. Weitere Anwendungsmöglichkeiten finden sich in der Fahrzeugentwicklung, -simulation und -validierung. Durch Lastzyklen können Batterien und weitere elektrische Komponenten von E-Fahrzeug-Antriebssträngen hinsichtlich realer Belastungen untersucht werden.

Darüber hinaus könnte die Integration einer automatisierten und

individuellen Zyklusgenerierung auf Basis des eigenen Fahrverhaltens in das Infotainmentsystem eines jeden Fahrzeugs erfolgen. Dadurch würden gezielt Auswertungen hinsichtlich der Verbrauchsspanne und des Anteils an Zusatzverbrauchern ermöglicht. Fahrzeugnutzer\*innen könnten diese Informationen verwenden, um zukünftig ihr Fahr-, Nutzungs- und Ladeverhalten anzupassen.

Neben der Elektromobilität bietet der Einsatz von alternativen Antrieben insbesondere bei dem Transport von Gütern Potentiale zur Emissionssenkung im Mobilitätssektor. Die Mobilität von Gütern wird zum Beispiel durch Lastkraftwagen auf der Straße vollzogen. Zusätzlich bieten Mobilitätsvarianten wie zum Beispiel der multimodale Verkehr die Möglichkeit den Transport über die Straße, Schienenwege sowie Seewege zu kombinieren. Neben den eigentlichen Transportmitteln des multimodalen Verkehrs werden zusätzlich auch Transportmittel für den Umschlag und damit Austausch zwischen ebendiesen verwendet. So werden zum Beispiel Terminaltraktoren und Containerstapler auf Hafengebieten für den Umschlag von Containern und Sattelaufliegern zwischen den Transportmitteln des multimodalen Verkehrs genutzt. Für diese mobile Maschinen kann zum Beispiel der Einsatz von verflüssigtem Erdgas als Alternative zu dem konventio-

nellen Dieselbetrieb eine Reduktion des Emissionsausstoßes bewirken, wie die Bewertung der spezifischen Emissionen im EFRE-geförderten Forschungsprojekt LeanDeR zeigt [6]. Es ist ersichtlich, dass der Umfang des Sektors Verkehrs und Transport vielumfänglich ist und viele unterschiedliche Anwendungsgebiete betrifft. Auch in diesem Bereich bietet sich der Einsatz von realitätsnahen Testzyklen an [7].

Testzyklen für Verbrennungsmotoren in mobilen Maschinen bestehen aus Vorgaben von Motorarbeitspunkten und werden für die Ermittlung des Kraftstoffbedarfs und Emissionsausstoßes herangezogen [7]. Standardisierte transiente Testzyklen wie zum Beispiel der NRTC oder stationäre Testzyklen wie zum Beispiel nach der ISO 8178 werden zur Überprüfung von Emissionsgrenzwerten der in mobilen Maschinen eingesetzten Verbrennungsmotoren verwendet [8]. Dafür wird gezielt die Abfolge an vorgegebenen Motorarbeitspunkten auf Prüfständen angefahren und die jeweiligen Kenngrößen messtechnisch ermittelt. Für die Entwicklung der Testzyklen der Motoren wird der Motorbetrieb aus dem Betriebsverhalten von ausgewählten mobilen Maschinen kombiniert. Transiente Testzyklen bilden dabei im Gegensatz zu stationären Testzyklen auch dynamische Übergänge zwischen den jeweiligen Motorarbeitspunkten ab. Die Motorarbeitspunkte werden relativ zu definierten Referenzgrößen der Motoren wie der Höchst- beziehungsweise Leerlaufdrehzahl angegeben. Damit können die Testzyklen motorunabhängig Anwendung finden. Durch den relativen Bezug auf den Motorbetrieb besitzen sie den Vorteil, dass die Motoren unabhängig von dem jeweiligen Einsatz in den mobilen Maschinen erprobt werden können. Da bei mobilen Maschinen zahlreiche Kombinationen von Motoren und Maschine vorkommen können, wird dadurch der Versuchsaufwand reduziert.

### Zusammenfassung und Ausblick

Mobilität ist ein wesentlicher Bestandteil unserer Gesellschaft. Dieser befindet sich jedoch in einer Transformation zu einer klimarechteren Form. Ein großer Anteil wird durch die vollständige Elektrifizierung von Fahrzeugen geleistet, wodurch sich zusätzliche Herausforderungen ergeben. Der Verbrauch und damit die Emissionen sind bei Elektrofahrzeugen von einer Reihe an verschiedenen Einflussfaktoren abhängig, wozu beispielsweise das Fahrverhalten oder die Temperatur zählen, die vom individuellen Fahrstil, aber auch vom Verkehr sowie die Benutzung von Nebenaggregaten beeinflusst werden.

Diese für Elektrofahrzeuge spezifischen Eigenschaften sind jedoch durch standardisierte Fahrzyklen nicht ausreichend abgedeckt. Standardisierte Fahrzyklen standen seit längerer Zeit in der Kritik, nicht realitätsnah zu sein. Gegenwärtige Bestrebungen zielen auf eine Berücksichtigung von Kenngrößen unter realen Betriebsbedingungen ab. So werden zusätzlich zu den Messungen der Emissionen auf Prüfständen Erprobungen und Messungen im Realbetrieb vollzogen [9]. Bei dieser sogenannten Real Driving Emission (RDE)-Prüfung wird während des Fahrbetriebs durch ein Portable Emission Measurement System (PEMS) der Emissionsausstoß an NO<sub>x</sub> und Feinstaub gemessen. Weiterhin wird zukünftig der Kraftstoffverbrauch beziehungsweise Energiebedarf von Neufahrzeugen im Bereich von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen während des Realbetriebs aufgezeichnet und an die Europäische Kommission übermittelt [9]. Damit können Einschätzungen über den flottenweiten Kraftstoff- beziehungsweise Energiebedarf und die kraftstoffbedingten Emissionen getroffen werden.

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung der Differenz zwischen den durch standardisierte Testzyklen ermittelten und den realen

Kenngrößen stellt die Entwicklung von anwendungsspezifischen Testzyklen dar. Diese werden explizit auf Grundlage von Realdaten, die die spezifische Anwendung umfassen, konstruiert. Weiterhin können darin reale Umgebungsbedingungen sowie die anwenderspezifische Nutzung von Zusatzverbrauchern wie Nebenaggregaten abgebildet werden. Damit kann eine Alternative zu standardisierten Testzyklen geschaffen werden, die eine realitätsnahe Ermittlung von Kenngrößen erlaubt. Grundlegend für die Entwicklung solcher Testzyklen ist die Kenntnis der relevanten Einflussfaktoren auf den Kraftstoff- beziehungsweise Energiebedarf und die damit verbundenen Emissionen.

Auf Basis der Grundlage umfassender realer Fahrdaten aus Deutschland und China, die über einen längeren Zeitraum durch den Lehrstuhl für Mechatronik mit verschiedenen Partnern aus Industrie und Forschung aufgezeichnet wurden, sind eine Reihe an Fahrzyklen entstanden. Dabei wurden transiente Fahrzyklen regionsspezifisch anhand wichtiger Einflussparameter generiert. Zusätzlich zu Geschwindigkeitszyklen wurden Batterielastzyklen entwickelt. Dabei wurde sowohl auf aufgezeichnete Stromprofile zurückgegriffen als auch für einen höheren Detaillierungsgrad Stromprofile durch Simulation erstellt.

Es konnte deutlich gezeigt werden, dass auf realen Fahrdaten basierende Fahrzyklen für Elektrofahrzeuge sich wesentlich von standardisierten Fahrzyklen unterscheiden. Auch die Notwendigkeit der Analyse von Einflussfaktoren der in einem Zyklus abzubildenden Region wird deutlich.

Die so generierten Zyklen finden eine große Reihe von Anwendungsmöglichkeiten. So können sie in der zielgerichteten Entwicklung von Elektrofahrzeugen verwendet werden. Beispielsweise in der Gesamtfahrzeug- oder Batterieauslegung. Hier sind insbesondere die Lastzyklen von großer Bedeutung.

Des Weiteren liefern die Fahrdaten durch ihren Umfang Informationen über das Mobilitätsverhalten der untersuchten Zielgruppen.

Die Fahrzyklen können durch Einbindung in eine Verkehrsflusssimulation auch zukünftige Verkehrsszenarien abbilden und so in der Verkehrs- und Stadtplanung Anwendung finden.

Realitätsnahe Fahrzyklen sind somit ein wichtiger Bestandteil in der Transformation der Mobilität.

### Summary

Mobility is an essential part of our society. However, it is undergoing a transformation to a more climate-friendly form. An important part of this is being achieved through the complete electrification of vehicles. The consumption and thus the emissions of electric vehicles depend on a number of different factors, such as driving behaviour or temperature, which are influenced by the individual driving style but also by traffic and the use of auxiliary units. However, these characteristics specific to electric vehicles are not adequately covered by standardized driving cycles, which have long been criticized for not being realistic. Current efforts consider parameters under real operating conditions. In addition to measurements of emissions on test benches, tests and measurements are carried out under real operating conditions. In this so-called RDE test, the emission of NO<sub>x</sub> and particulate matter is measured by portable emissions measurement systems (PEMS) during driving. In future, the fuel consumption and energy requirements of new passenger cars and light commercial vehicles will also be recorded during real-world operation and transmitted to the European Commission. This will enable estimates to be made of fleet-wide fuel and energy requirements and fuel-related emissions. Another measure aimed at reducing

the difference between the parameters determined by standardized test cycles and the real parameters is the development of application-specific test cycles. These are constructed based on real data covering the specific application. Furthermore, real environmental conditions as well as the user-specific use of additional consumers such as auxiliary units can be mapped. This makes it possible to create an alternative to standardized test cycles that allows parameters to be determined that are closer to reality.

Based on comprehensive real driving data from Germany and China, which were recorded over a long period of time by UDE's Chair of Mechatronics with various partners from industry and research, a series of driving cycles was developed. Transient driving cycles were generated region-specifically on the basis of important influencing parameters. In addition to speed cycles, battery load cycles were developed using recorded current profiles and, for a higher level of detail, current profiles were generated by simulation. It was clearly shown that driving cycles for electric vehicles based on real driving data differ significantly from standardized driving cycles. The necessity of analysing the influencing factors of the region to be mapped in a cycle also became clear.

### Amerkungen/Literatur

- [1] ADAC: Umfrage: Klimaschutz und individuelle Mobilität, 2019.  
 [2] Schüller, M.: Technisch optimale Auslegung von Elektrofahrzeugen für Nutzergruppen in China und Deutschland: eine vergleichende Untersuchung. Universität Duisburg-Essen, 2019  
 [3] Schramm, D.; Dudenhöffer, F.; Driesch, P.; Kannstätter, T.: Plug-In-, Range-Extender- und Elektrofahrzeuge unter realen Mobilitäts Umständen: Infrastruktur, Umweltbedingungen und Marktakzeptanz: FuE-Programm „Erneuerbar Mobil“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Schlussbericht: Laufzeit des Vorhabens: vom 01.01.2014 bis 31.05.2017, Universität Duisburg-Essen; [Duisburg], 2017.

- [4] Tewiele, S.: Generierung von repräsentativen Fahr- und Lastzyklen aus realen Fahrdaten batterieelektrischer Fahrzeuge. Universität Duisburg-Essen, 2020  
 [5] BMW: BMW i3 – Technische Daten, 2014.  
 [6] Driesch, P.; Spengler, A.; Schramm, D.; Malkwitz, A.: Forschungsprojekt LeanDeR – Umweltbericht, 2020.  
 [7] Driesch, P.; Weißkopf, T.; Schramm, D.: Entwicklung repräsentativer Prüfzyklen für mobile Maschinen auf Grundlage realer Felddaten, Sechste IFToMM D-A-CH Konferenz 2020: 27./28. Februar 2020, Campus Technik Lienz, 2020.  
 [8] Giakoumis, E. G.: Driving and Engine Cycles. Springer International Publishing: Cham, 2017. ISBN 9783319490342  
 [9] Umweltbundesamt: Emissionsstandards: Pkw und leichte Nutzfahrzeuge, 2020.

### Die Autor\*innen

**Sarah Tewiele** studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Fachhochschule Gelsenkirchen, Abt. Bocholt, sowie darauf aufbauend Maschinenbau an der Universität Duisburg-Essen. Im direkten Anschluss war sie seit 2013 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen tätig. Sie war auf dem Gebiet der Elektromobilität und der Erfassung objektiver Fahrdaten in Fahrzeugflotten mit mehreren hundert Fahrzeugen zur Nutzungsanalyse der E-Fahrzeuge im realen Betrieb tätig. Sie schloss 2020 ihre Promotion über die Generierung von repräsentativen Fahr- und Lastzyklen aus realen Fahrdaten batterieelektrischer Fahrzeuge ab.

**Mira Schüller** studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Duisburg-Essen. Sie war von 2014 bis 2019 als wissenschaftliche Mitarbeiterin sowohl am Lehrstuhl für Mechatronik als auch an der IN-EAST School of Advanced Studies der Universität Duisburg-Essen im Bereich der Elektromobilität in Deutschland und China tätig und promovierte am Lehrstuhl für Mechatronik über die technisch optimale Auslegung von Elektrofahrzeugen für Nutzergruppen in China und Deutschland.

**Patrick Driesch** arbeitete als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen. Er studierte von 2010 bis 2016 Maschinenbau mit der Vertiefung Mechatronik an der Universität Duisburg-Essen. Seit seinem Abschluss ist er am Lehrstuhl für Mechatronik als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Er beschäftigt sich mit der Evaluierung von alternativen Antrieben und untersucht forschungsseitig die simulationsgestützte Analyse und Bewertung von Antriebsstrangkonzepthen auf Basis realer Fahrdaten. Dazu war er in unterschiedlichen Forschungsprojekten wie PREMIUM, RUHRAUTOe sowie LeanDeR tätig, in denen er sich mit Kraftfahrzeugen und mobilen Maschinen auseinandersetzte.



# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub

universitäts  
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/78098

**URN:** urn:nbn:de:hbz:465-20230331-144258-8

Erschienen in: UNIKATE 59 (2023), S. 98-107

Alle Rechte vorbehalten.