

3a.2 Ermittlung des realitätsnahen und nutzerspezifischen Energieverbrauchs aktueller Elektrofahrzeuge auf Basis individueller Fahrprofile und standardisierter Messdaten

Jan Kräck, Julius Jöhrens, Hinrich Helms ↓

Abstract

With the rollout of electric propulsion systems new challenges occur to determine the energy consumption of vehicles: Energy consumption, the range of electric vehicles and the shares of electricity and fuel consumption in plug-in hybrid vehicles are highly dependent on individual usage profiles as well as the climatic conditions such as ambient temperature. The standard fuel consumption figures, which represent an economical and ecological criterion when purchasing a vehicle, should be complemented with realistic and user-specific information. We present a methodology to calculate the respective user-specific fuel and electricity consumption under realistic conditions by using GPS-based travel profiles as well as standardized data of currently available vehicle models. The basis for this calculation is a physical vehicle model which is implemented in MATLAB[®] and Simulink[®]. Data of the ADAC EcoTest is used for calibration and model validation purposes. The goal is to develop an internet and smartphone application for interactive purchase consultation and an information platform for electric vehicles.

Kurzfassung

Mit der Einführung von elektrischen Antrieben ergeben sich bei der Ermittlung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen neue Herausforderungen: Energieverbrauch und Reichweite von Elektrofahrzeugen sowie die Anteile von Strom- und Kraftstoffnutzung bei Plug-In-Hybridfahrzeugen hängen stark vom individuellen Nutzungsprofil sowie von den klimatischen Randbedingungen wie der Umgebungstemperatur ab. Die Normverbrauchsangaben, die ein ökonomisches und ökologisches Kriterium beim Erwerb eines Fahrzeuges darstellen, sollten daher durch realitätsnahe und nutzerspezifische Informationen ergänzt werden. Wir stellen eine Methodik vor, um mittels GPS-basierter Fahrprofile sowie verfügbarer standardisierter Messdaten derzeit erhältlicher Fahrzeugmodelle die jeweiligen nutzerspezifischen Verbräuche unter realitätsnahen Bedingungen zu berechnen. Die Grundlage dafür bildet ein auf MATLAB[®] und Simulink[®] basierendes physikalisches Fahrzeugmodell. Die Datenbasis für die Kalibrierung der Modellparameter und für die Modellvalidierung bildet der ADAC EcoTest. Das Ziel ist die Entwicklung einer Internet- und Smartphone-Applikation zur interaktiven Kaufberatung und als Informationsplattform zu Elektrofahrzeugen.

1. Einleitung

Bei Elektrofahrzeugen herrscht im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen ein Informationsdefizit. Gemäß einer repräsentativen Umfrage aus dem Jahr 2012 [1] fühlten sich weniger als ein Viertel der Befragten (24 %) sehr gut bis gut über Elektrofahrzeuge informiert; wohingegen fast die Hälfte (47 %) der Personen angaben, über wenig bis gar kein Wissen zum Thema elektrisch betriebener Kraftfahrzeuge zu verfügen. Andererseits gibt die Mehrheit – zwischen 73 % bei Diesel- und 78 % bei Benzinkraftfahrzeugen – an, sehr gut bis gut im Hinblick auf die für sie relevanten Eigenschaften der konventionell angetriebenen Fahrzeuge im Bilde zu sein.

Da die Kenntnis über die Eigenschaften und den Nutzen eines Gutes eine grundlegende Voraussetzung für eine Kaufentscheidung ist, stellt dieses Wissensdefizit ein Hemmnis für den Markthochlauf von Elektrofahrzeugen dar. Ferner wirkt dieser einseitige Informationsmangel einer objektiven Kaufentscheidung im Hinblick auf Tauglichkeit und Vorteilhaftigkeit einer Technologie für die individuellen Mobilitätsbedürfnisse entgegen. Die Wahrscheinlichkeit, dass auf Bewährtes zurückgegriffen wird, ist damit hoch.

Darüber hinaus wirkt die Tatsache, dass die Verbrauchsangaben der Hersteller in den letzten Jahren in zunehmenden Maße von den Realverbräuchen divergieren, erschwerend auf eine objektive Entscheidungsfindung und erzeugt – gerade im Hinblick auf die Plug-In-Hybridfahrzeuge und deren festgelegten Verbrauchsberechnung in der Zulassungsprüfung – weiteren Aufklärungsbedarf: So wuchs gemäß [2] der Unterschied zwischen den Emissionsangaben für CO₂ aus den Typzulassungsprüfungen im Vergleich zu statistischen Erhebungen aufgrund

- der zunehmenden Verwendung von Effizienztechnologien, die ihre Vorteile in den Zulassungsprüfungen überdurchschnittlich entfalten,
- der weiteren Ausnutzung des zulässigen Spielraums der Parameter im Rahmen der Typzulassungsprüfung,
- sowie dem ansteigenden Gebrauch von Nebenverbrauchern wie der Klimaanlage seitens der Fahrzeugnutzer

zwischen den Jahren 2001 und 2013 von rund acht auf circa 38 Prozent an. Gerade die Klimatisierung nimmt auch bei Elektrofahrzeugen eine besondere Rolle in der Abschätzung einer realistischen Reichweite ein. Im Falle der Plug-in-Hybride kann der Strom- und Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Fahrdynamikeigenschaften des Fahrzeugs, der Batteriekapazität und dem individuellen Fahr- und Ladeverhalten Abweichungen von den Normangaben aufweisen. Einerseits ist der Fahrzyklus, andererseits auch die zurückgelegte Strecke zwischen dem Erreichen der leeren Batterie und der nächsten Vollladung über die Berechnungsvorschrift des Regelwerkes ECE R101 Annex 8 mit 25 km festgelegt und gerade dieser Wert kann bei verschiedenen Fahrzeugnutzern einer großen Bandbreite unterliegen. Im Zuge der Auswertung eines Flottenversuchs [3] mit einem Plug-in-Hybrid Pkw ergaben sich in Abhängigkeit des Straßentyps (Innerorts, Landstraße, Autobahn) und den Nutzertypen (E-Fahrer, Hybridfahrer, konventioneller Fahrer) Verbräuche zwischen $(1,2L+18,9kWh_{el.})/100km$ und $(6,7L+3,3kWh_{el.})/100km$.

Dies macht die Entwicklung eines einfach verständlichen Beratungsangebotes und einer nutzerindividuellen Informationsbereitstellung im Hinblick auf Umweltwirkung und Kosten für Elektrofahrzeuge notwendig. Zudem wird ein Kostenrechner für Bür-

ger, der die Anschaffung und Nutzung von Elektrofahrzeugen berücksichtigt beispielweise auch im „Handlungsleitfaden Elektromobilität in Kommunen“ [4] als strategische Maßnahme zur Einführung der Elektromobilität auf kommunaler Ebene genannt.

Im Projekt "My eDrive - App- und Internet-Plattform zur Entscheidungsunterstützung beim Kauf von Elektrofahrzeugen" wird eine Entscheidungshilfe für potenzielle Käufer von Elektrofahrzeugen entwickelt, die folgende Fragen für die individuellen Mobilitätsanforderungen beantwortet:

- Gibt es ein Elektroauto, das zu meinen Bedürfnissen passt?
- Lohnt sich ein Kauf für mich finanziell?
- Wie umweltfreundlich ist ein Elektrofahrzeug wirklich?

Das Projekt " My eDrive" wird durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) gefördert und voraussichtlich im Dezember 2016 abgeschlossen.

Das Prinzip von "My eDrive" ist in *Bild 1* dargestellt. Über ein integriertes, funktional abgestimmtes Beratungsangebot in Form eines Internetportals und einer Smartphone-Applikation sollen zukünftige Nutzer unterstützt werden, für sie geeignete Fahrzeuge auf Basis ihres individuellen Nutzungsprofils sowie realistischen Fahrzeugeigenschaften auszuwählen.

Da eine Verbrauchsberechnung auf Basis eines dynamischen Fahrzyklus wegen der Abhängigkeit der Betriebsstrategie bei (Plugin-)Hybridfahrzeugen sowohl von der angeforderten Last aufgrund der Geschwindigkeit, Beschleunigung und Steigung als auch vom Ladezustand der Batterie (SOC) abhängt und diese über die jeweilige Betriebscharakteristik der Antriebsaggregate sowie auch der Leistungsbedarf der Nebenverbraucher den Verbrauch prägt, wurde in Matlab®/Simulink® ein Modell entwickelt, mit dessen Hilfe die Fahrsituationsabhängigen Betriebszustände in der Traktionsbatterie, dem Elektromotor bzw. Generator und dem Verbrennungsmotor nachgestellt werden können.

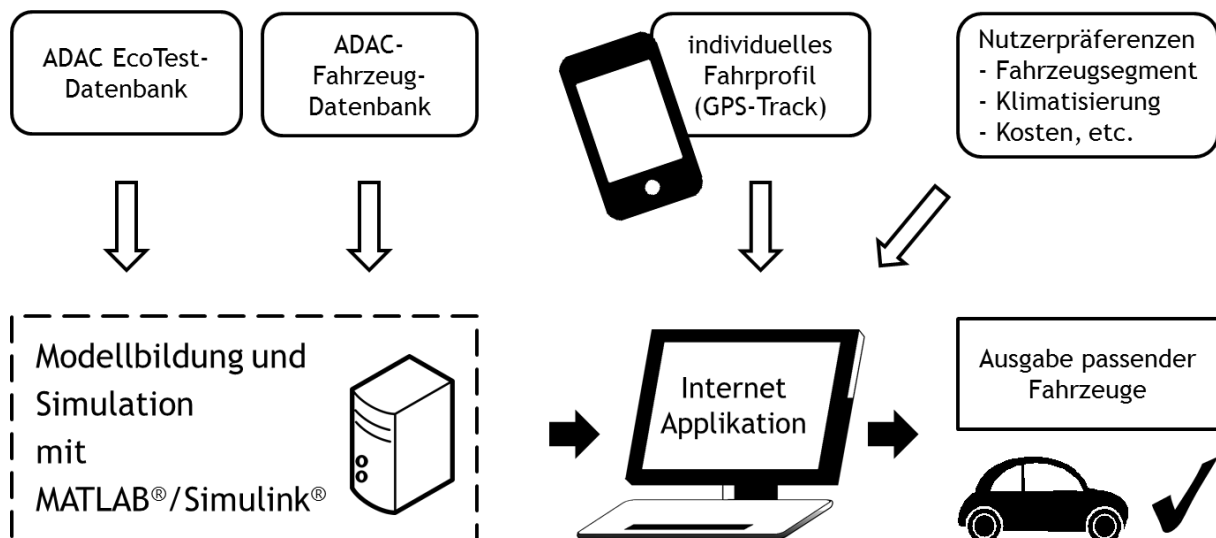


Bild 1: Übergeordneter Aufbau und Informationsfluss der "My eDrive"-Applikation

Mit Werten aus der ADAC Fahrzeugdatenbank wird das Fahrzeugmodell parametrisiert und anschließend anhand des Normverbrauches kalibriert. Eine Verifikation des Mo-

dels findet anhand der im ADAC EcoTest ermittelten Verbrauchswerte statt, dessen Zyklen die Anzahl der Betriebspunkte des NEFZ durch den WLTP und den ADAC Autobahnzyklus erweitern. Die Modellbildung wird in den nachfolgenden Abschnitten präzisiert, und es werden ausgewählte Ergebnisse der Simulationsrechnungen präsentiert.

2. Methodischer Ansatz der Verbrauchsmodellierung

Um die streckenspezifischen Energieverbräuche zu ermitteln wird ein längsdynamisches Fahrzeugmodell eingesetzt. Daher werden aktuell eventuell auftretende zusätzliche Verbräuche durch querdynamische Einflussgrößen – wie es auch bisher bei Rollenprüfstandmessungen der Fall ist – vernachlässigt. Die Änderungen in den Höhenprofilen der Strecken und die sich daraus ergebenden Laständerungen werden berücksichtigt.

Ferner wird die Fahrzeuggeschwindigkeit über einen virtuellen Fahrer, der als PID-Regler umgesetzt ist, über die Sollgeschwindigkeit aus dem vorgegeben Zeit-Geschwindigkeitsprofil als Führungsgröße geregelt. Die zu beeinflussende Regelgröße stellt die Momentangeschwindigkeit dar. Über die Stellgröße wird eine Drehmomentanforderung an das Antriebsaggregat oder das Bremssystem initiiert; die Drehzahl wird über die Fahrgeschwindigkeit, die aktuelle Getriebeübersetzung aufgrund der Gangwahl sowie den geometrischen Abmessungen der entsprechenden Fahrwerkskomponenten festgesetzt. Je nach Fahrzeugtyp und Fahrsituation wird das Drehmoment entweder vollständig über den Elektromotor, den Verbrennungsmotor oder anteilig von beiden zugleich zur Verfügung gestellt.

Die Analyse der Fahrsituation zur Wahl der Betriebsstrategie wird über das virtuelle Antriebsstrangmanagement bewerkstelligt, wobei als weitere Größe der Ladezustand der Batterie berücksichtigt wird. Hieraus ergeben sich die folgenden Betriebszustände, welche aktuell in den Hybridfahrzeugmodellen (HEV, PHEV, EREV) oder zum Teil entsprechend für BEVs sowie für konventionelle Fahrzeuge während der Simulation berücksichtigt werden können:

- rein elektromotorischer Vortrieb,
- rein verbrennungsmotorischer Vortrieb,
- verbrennungsmotorischer Vortrieb mit
 - Generatorbetrieb zum Laden der Batterie bzw. Lastpunktanhebung im Stillstand oder
 - elektromotorischer Unterstützung bei hoher Lastanforderung,
- rekuperative Verzögerung mit mechanischer Bremssystemunterstützung,
- rein mechanisches, dissipatives Bremsen und
- rein rekuperative Verzögerung.

Die Herstellerangaben zur Fahrzeugmasse, den Karosserieabmessungen und der Reifengröße gehen direkt in das Modell als Parametergrößen ein.

Nenndaten für die Leistung oder das Drehmoment bei entsprechender Drehzahl werden zur Erstellung generischer Wirkungsgradkennfelder für Otto-, Diesel- und Elektromotoren bzw. Elektrogeneratoren verwendet. Diese Kennfelder werden zur Berechnung des fahrzustandsabhängigen momentanen Verbrauchs oder des Energieflusses zur sowie von der Batterie herangezogen. Anhand des Wirkungsgradkennfeldes und dem spezifischen Heizwertes des Kraftstoffes wird der Kraftstoffver-

brauch für den aktuellen Betriebspunkt berechnet. Dieser hängt sowohl vom vorgegebenen Zeit-Geschwindigkeits- und Höhenprofil als auch von den Fahrzeugeigenschaften ab. Die Integration der Verbräuche in den einzelnen Betriebspunkten ergibt den Verbrauch über die gesamte zurückgelegte Strecke.

2.1 Kennfelder der Verbrennungsmotoren

In Anlehnung an [5] werden die Kennfelder für Verbrennungsmotoren auf Basis des Wirkungsgrads im Bestpunkt (η_0) sowie einem normierten drehzahlabhängigen Wirkungsgrad (η_n) und einem normierten leistungsabhängigen Steigungsverlauf (η_P) berechnet (siehe Gleichung 1). Dieser Ansatz erlaubt eine Last- und Drehzahlabhängige Verbrauchsberechnung über einen vorgegebenen Fahrzyklus hinweg. Für die einzelnen Betriebspunkte können jedoch aufgrund der einfachen Kennfeldbeschreibung im Vergleich zum realen Kennfeld der jeweiligen Motoren gewisse Wirkungsgradunterschiede bestehen.

$$\eta(n, P) = \eta_0 \cdot \eta_n \cdot \eta_P \quad (1)$$

Die dreidimensionalen Wirkungsgradfelder sind also jeweils in zwei Polynome aufgeteilt. Das erste beschreibt den Verlauf der Steigung in Abhängigkeit der Drehzahl und ist hier in beiden Fällen – Gleichraum- und Gleichdruckprozess – gleich. Der normierte drehzahlabhängige Wirkungsgrad wird mittels Gleichung (2) in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Betriebsdrehzahl (n_i) und der Nenndrehzahl (n_N) sowie den kennfeldspezifischen Konstanten ($K_{n,k}$) berechnet.

$$\eta_n = K_{n,1} + K_{n,2} \cdot \left(\frac{n_i}{n_N}\right) + K_{n,3} \cdot \left(\frac{n_i}{n_N}\right)^2 + K_{n,4} \cdot \left(\frac{n_i}{n_N}\right)^3 \quad (2)$$

Bei der leistungs- bzw. drehmomentabhängigen Wirkungsgradcharakteristik ergeben sich Unterschiede. Zur Beschreibung der normierten leistungsabhängigen Steigungsverläufe (η_P) werden ebenfalls Polynome des dritten Grades mit den jeweiligen Koeffizienten für Diesel- ($K_{P,Diesel,k}$) und Ottomotoren ($K_{P,Otto,k}$) sowie dem Verhältnis aus Betriebsleistung (P_i) und Nennleistung (P_N) beziehungsweise aus Betriebsdrehmoment (M_i) und Nenndrehmoment (M_N) herangezogen. Das Vorgehen wird am Beispiel eines Dieselmotors in *Bild 3* illustriert.

Sowohl η_0 als auch die Koeffizienten $K_{P,Diesel,k}$ und $K_{P,Otto,k}$ werden beim Justieren der Fahrzeuge auf den Normverbrauch einbezogen. Wodurch zugleich Fehlannahmen innerhalb der bekannten Schwankungsbreite bei den jeweiligen Getriebe bzw. Antriebsstrangwirkungsgraden kompensiert werden. Für den Gesamtwirkungsgrad der Drehmomentübertragung im Antriebsstrang werden in Abhängigkeit des Konzeptes in erster Näherung die mittleren Wirkungsgrade der Komponenten gemäß [6, Seite 182f.] berücksichtigt.

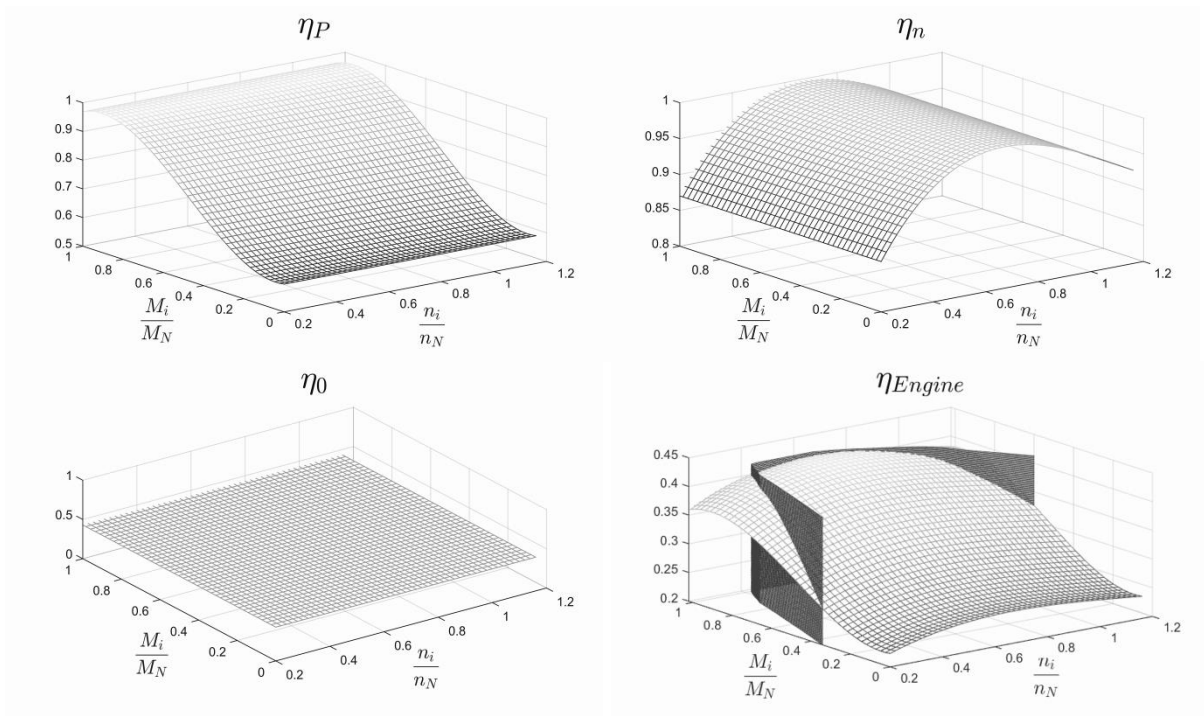


Bild 3: Schrittweiser Aufbau eines Wirkungsgradkennfeldes am Beispiel eines Dieselmotors, inklusive Darstellung der Volllastkurve: $\eta_{Engine} = \eta_P \circ \eta_n \circ \eta_0$.

3.2 Kennfelder der Elektromotoren und Generatoren

Im Falle der Elektromotoren wurden gemessene Wirkungsgradkennfelder im Hinblick auf Drehmoment und Drehzahl normiert. In Bild 4 ist ein entsprechendes Beispiel in Form einer permanenterrregten Synchronmaschine dargestellt.

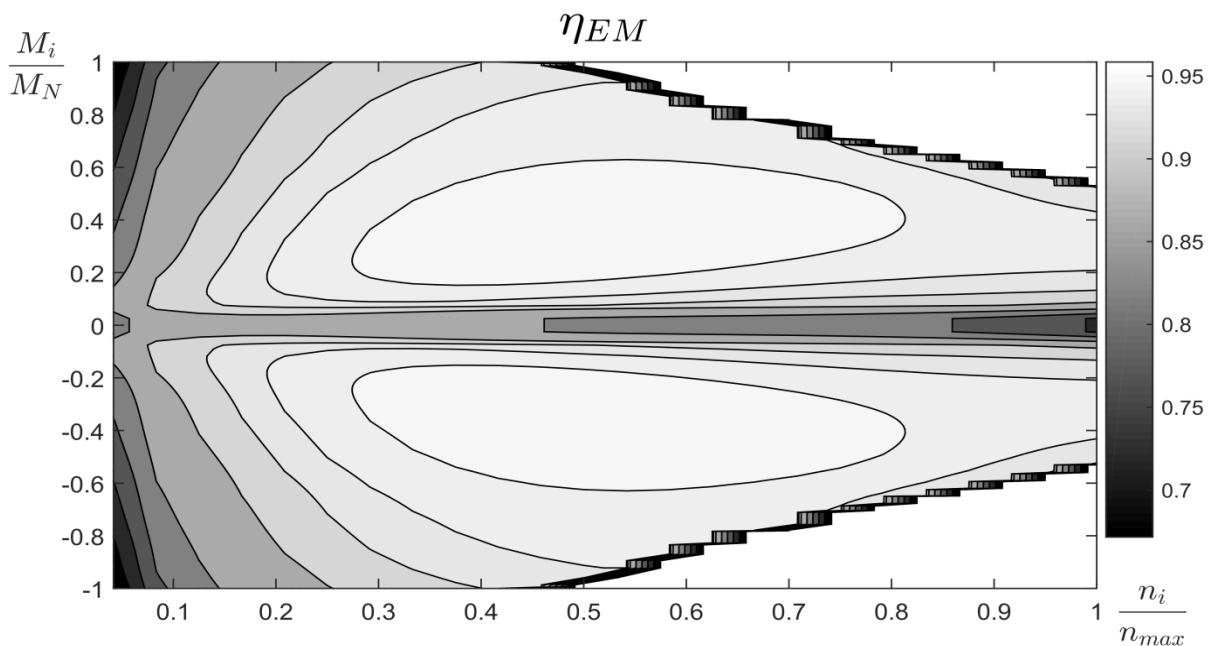


Bild 4: Beispiel für das normierte Wirkungsgrad-Kennfeld einer permanenterrregten Synchronmaschine.

Die verwendeten Kennfelder enthalten sowohl den negativen als auch positiven Drehmomentbereich. Im Falle eines Bremsvorganges wird ein negatives Moment erzeugt und die abgegebene Leistung bis zum zulässigen Grenzwert an die Traktionsbatterie geleitet, deren Modell im folgenden Abschnitt vorgestellt wird. Manche Fahrzeugmodelle werden auch mit zwei unterschiedlichen Kennfeldern für Antriebs- und Generatoraggregat versehen.

3.3 Das Batteriemodell

Um die elektrischen Eigenschaften der Lithium-Ionen-Batterie zu modellieren, wird diese in ein sogenanntes Ersatzschaltkreismodell überführt; d.h. die einzelnen Batteriezellen werden vereinfachend als Netzwerk von Widerständen und Kapazitäten abgebildet. Hierbei werden die unterschiedlichen Innenwiderstände beim Be- ($R_{0,c}$) und Entladen ($R_{0,d}$) in Abhängigkeit der Zelltemperatur und des Ladezustandes berücksichtigt, wie es unter anderem in [7] beschrieben und in *Bild 5* dargestellt ist. Für die Simulationsberechnungen werden im Falle der Lithium-Batterien vereinfachend keine unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen oder Bauformen berücksichtigt.

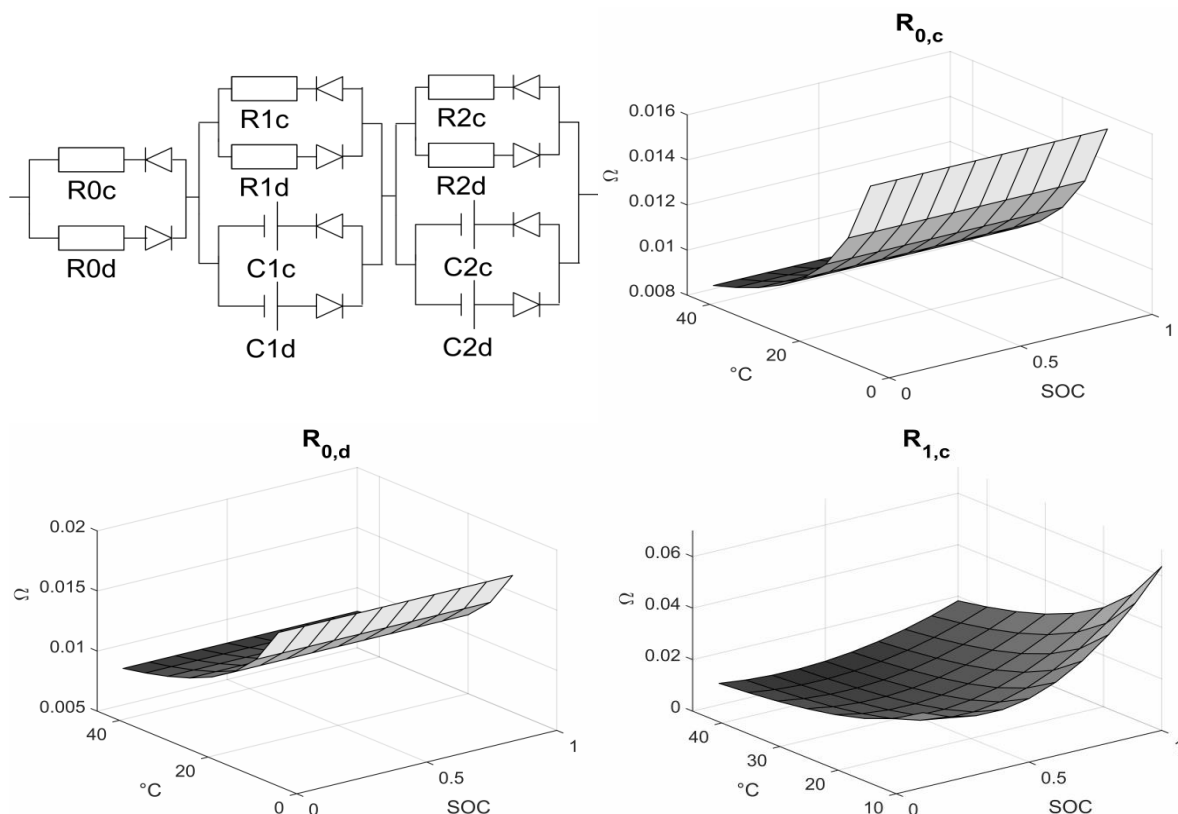


Bild 5: Links oben: Ersatzschaltkreis 2. Ordnung bestehend aus zwei RC-Glied mit unterschiedlicher Stromlaufrichtung für Laden und Entladen. Rechts oben: Innenwiderstand der Batterie beim Laden ($R_{0,c}$) in Abhängigkeit der Zellmitteltemperatur (T_m) und des SOC. Links unten: Innenwiderstand der Batterie beim Entladen ($R_{0,d}$) in Abhängigkeit von T_m und SOC. Rechts unten: Widerstand des ersten RC-Gliedes in Abhängigkeit von T_m und SOC beim Laden.[7]

R_0 , R_1 und R_2 bilden im Wesentlichen den Gleichstromwiderstand, der bei Ladung bzw. Entladung mit konstantem Strom ausschlaggebend ist. Anhand der beiden RC-Glieder (R_1C_1 und R_2C_2) wird das Verhalten der Batterie bei transientser Belastung (z.B. der Effekt, dass die Ausgangsspannung der Batterie bei starker Lastanforderung verzögert absinkt) simuliert. Der Spannungsverlauf über das jeweilige RC-Glied kann gemäß [7] anhand der Differenzialgleichungen (3) und (4) beschrieben werden.

$$\dot{V}_1 = -\frac{1}{R_1C_1}V_1 + \frac{1}{C_1}I \quad (3)$$

$$\dot{V}_2 = -\frac{1}{R_2C_2}V_2 + \frac{1}{C_2}I \quad (4)$$

Die Eingangsgröße in das Modell stellt die Stromstärke I dar. Als Ergebnis wird die Klemmenspannung V_T anhand Gleichung (5) in Abhängigkeit der Leerlaufspannung der Zelle V_{OCV} ausgegeben.

$$V_T = V_{OCV} - V_1 - V_2 - IR_0 \quad (5)$$

Die Wärmeentwicklung \dot{Q} in der Zelle ergibt sich über die Verluste aufgrund des Stromflusses und der Differenz zwischen Leerlauf- und Klemmenspannung.

$$\dot{Q} = I(V_{OCV} - V_T) \quad (6)$$

Aufgrund der Wärmekapazität der Zelle, deren Wärmedurchgangswiderstand und deren Wärmeübergangswiderstand gegenüber dem Kühlmedium bzw. der Umgebungsluft kann eine mittlere Zelltemperatur berechnet werden, die zur Identifikation der Parameterwerte für den Innenwiderstand und der Widerstände sowie Kapazitäten der RC-Glieder im nächsten Simulationsschritt herangezogen wird.

Um die vollständige Traktionsbatterie virtuell darzustellen, werden die Zellen unter Berücksichtigung der Nennkapazität sowie der gewünschten Spannungsebene bzw. Nennstromstärke entsprechend in Reihe bzw. parallel geschaltet.

3.4 Berücksichtigung der Fahrzeugklimatisierung und sonstiger Nebenverbraucher.

In einem Fahrzeug kommen neben den Antriebsaggregaten und Energiespeichern weitere Nebenverbraucher zum Einsatz, die einerseits die Fortbewegung unterstützen und andererseits Sicherheits- sowie Komfortansprüche erfüllen. Abhängig vom Antriebskonzept wird die Leistung für die Nebenverbraucher direkt der Batterie entnommen oder über einen Riementrieb als zusätzliches Drehmoment vom Motor bereitgestellt, der die Lichtmaschine zur Stromerzeugung antreibt.

Von besonderer Bedeutung bei den Nebenverbrauchern ist vor allem die Klimatisierung, da nach [9] die durch elektrische Zusatzheizungen und Klimakompressoren hervorgerufenen Spitzenlasten für konventionelle und Vollhybridfahrzeuge bei 3 bzw. 3,5 kW liegen. Für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge mit und ohne Range Extender wird aufgrund der fehlenden Motorabwärme sogar eine Auslegung der Heizleistung zwischen fünf und sechs Kilowatt empfohlen [10]. Neben der Leistungsaufnahme ist jedoch auch die Einsatzdauer der Nebenverbrauch von großer Bedeutung. Die

Nebenverbraucher in einem Kraftfahrzeug lassen sich wie in [8] dargestellt in drei Kategorien einteilen, die ihre Einsatzdauer beschreiben: Dauerverbraucher, Langzeitverbraucher und Kurzzeitverbraucher. Die Einordnung hier ist auch vom Antriebskonzept abhängig: Während in konventionell angetriebenen Fahrzeugen elektrische Zusatzheizungen zu den Kurzzeitverbrauchern zählen, stellen solche PTC (Positive Temperature Coefficient) Heizelemente in Elektrofahrzeugen oftmals die einzige relevante technische Wärmequelle für den Innenraum dar und sind entsprechend den Langzeitverbrauchern zuzuordnen. Ähnlich verhält es sich bei Kraftstoffpumpe und Motormanagement, die mit zunehmender Elektrifizierung des Antriebsstranges eine Abnehmende Einsatzdauer erfahren.

Insbesondere hinsichtlich der Klimatisierung gibt es jahres- und tageszeitlich große Unterschiede im Leistungsbedarf. Um die Relevanz der Berücksichtigung der Fahrzeugklimatisierung im Energieverbrauchsmodell weiter zu verdeutlichen, werden über die Differenz der Stundenwerte des Temperaturverlaufs am Beispiel Stuttgart-Echterdingen zur Fahrgastzellen-Solltemperatur die Häufigkeit der möglichen Kühl- bzw. Heizlastfälle abgeschätzt.

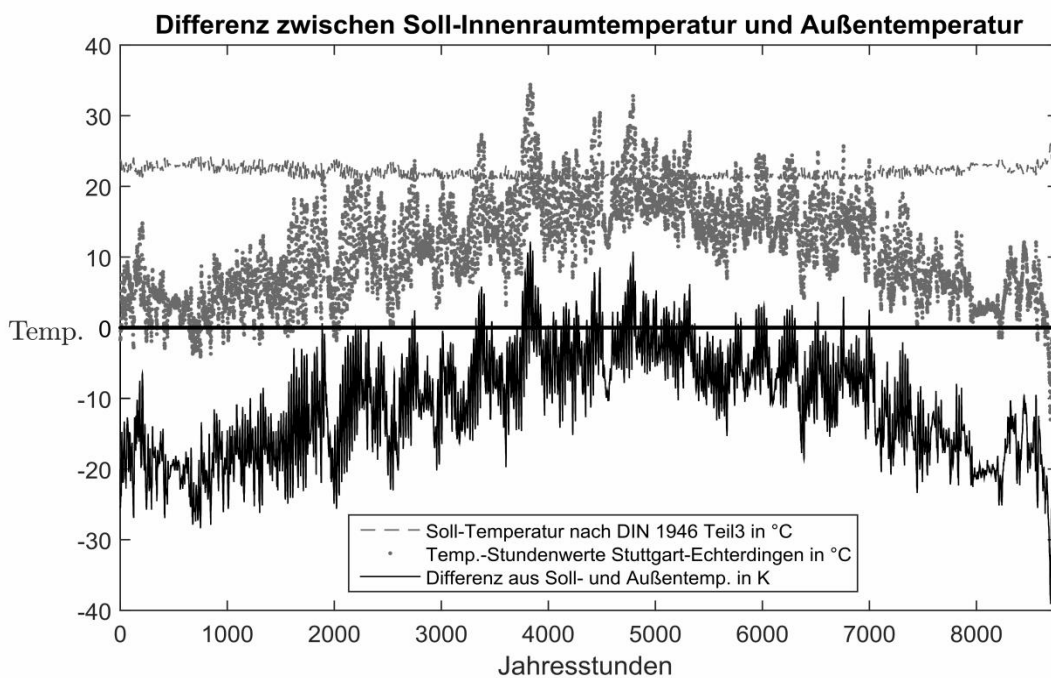


Bild 6: Differenz zwischen der Außentemperatur von Stuttgart-Echterdingen im Jahr 2014 auf Basis einer Zeitreihe des DWD (Deutscher Wetterdienst) und der Soll-Fahrgastzellentemperatur nach DIN 1946 Teil 3.

Bei gleichmäßiger Verteilung der Jahresfahrleistung über das Jahr und einer angenommenen Toleranz der Fahrzeuginsassen von drei Kelvin Abweichung bezüglich der Fahrgastzellen-Solltemperatur besteht für lediglich rund 13 % des Streckenanteils kein Klimatisierungsbedarf.

Daher werden die Sensitivitäten des Verbrauchs sowie der elektrischen Reichweite im Hinblick auf die Witterung berücksichtigt und anhand eines Fahrzeugklimatisierungsmodells der Einfluss der solaren Einstrahlung sowie der Außentemperatur auf die einzelnen Fahrzeuge simuliert. Hierzu werden gemäß [11, Anhang A1] die Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit bzw. der Innenraumluftströmung sowie die Bauteileigenschaften aus [11, Anhang A2] herangezogen.

gen. Für die Abschätzung der solaren Einstrahlung in den Fahrgastraum werden die Angaben aus [12, Kapitel 6] herangezogen: Hier werden solare Einstrahlwinkel, Einbaulage der verschiedenen Fensterflächen samt Glaseigenschaften unterschiedlicher Fahrzeugklassen aufgelistet. Die Kühllast wird über den Kältekompressor der Klimaanlage zur Verfügung gestellt. Die Leistungszahl der Kälteanlage nimmt mit zunehmender Außentemperatur von rund 6,6 bis auf circa 1,9 ab [11], wodurch sich der relative Strombedarf an heißeren Tagen zur Abfuhr der Wärme erhöht. Im Falle der Heizlast wird die zugeführte Außenluft, vermengt mit dem Umluftanteil über ein PTC-Heizelement oder den Wärmetauscher des Kondensators der Wärmepumpe, erwärmt. Die warme Zuluft vermischt sich mit der kalten Innenraumluft. Diese gibt wegen der Transmissions- und Lüftungsverluste Wärme über die Außenhülle des Fahrzeugs ab. Die Leistungszahl der Wärmepumpe nimmt mit fallender Außentemperatur von knapp 4,6 bis auf rund 1,3 bei -20 °C ab [13], wobei der Wirkungsgrad des PTC relativ konstant fast 100% erreicht. Dies macht deutlich, dass eine Wärmepumpe prinzipiell selbst unter ungünstigen Temperaturbedingungen effizienter als der PTC-Widerstand arbeitet. Ferner nimmt – neben der Außentemperatur und der solaren Einstrahlung – vor allem der Umluftanteil im Falle der Klimatisierung Einfluss auf den Energieverbrauch, wie in *Bild 7* veranschaulicht wird.

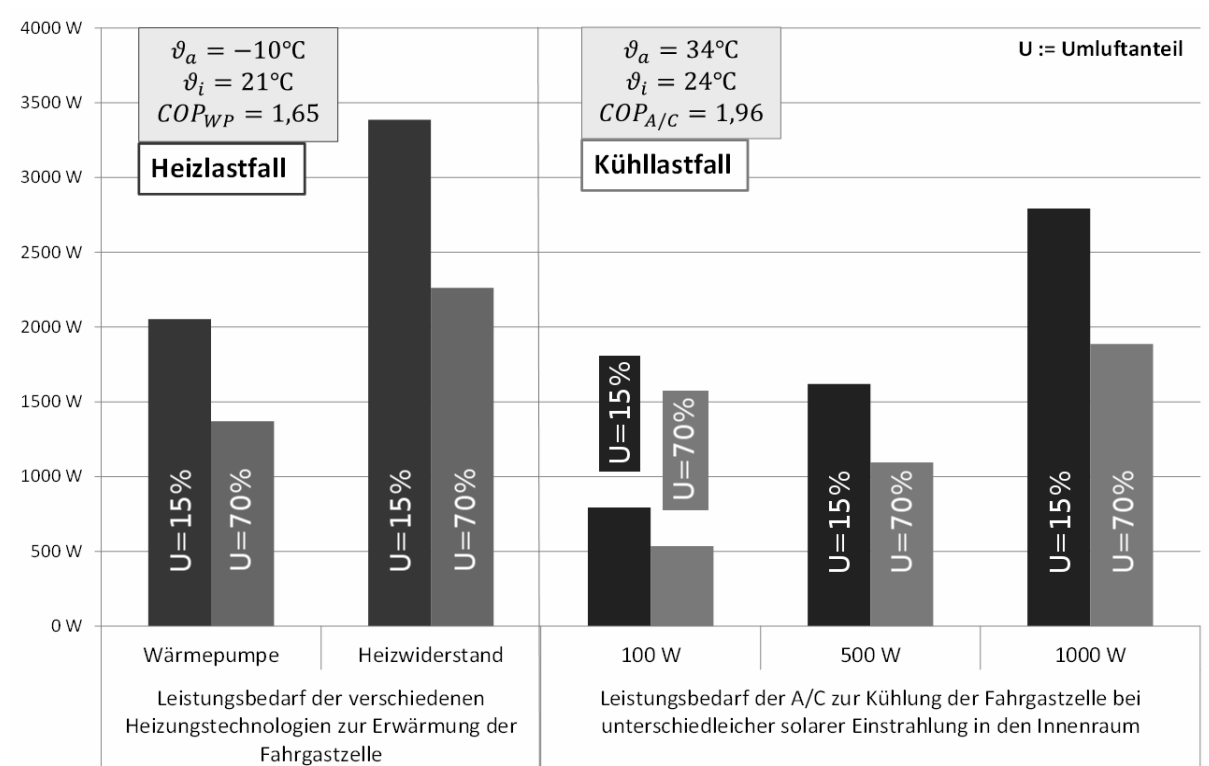


Bild 7: Ausgewählte Simulationsergebnisse des elektrischen Leistungsbedarfs zur Klimatisierung eines Elektrofahrzeuginnenraumes der Kompaktklasse im Kühllastfall bei unterschiedlicher solarer Einstrahlung und im Heizlastfall unter Einsatz verschiedener Heizungstechnologien.

3.5 Parametrierung, Kalibrierung und Validierung der Fahrzeugmodelle

Anhand der Herstellerangaben, die in einer Datenbank hinterlegt sind, werden die Modelle parametrierung. Die wesentlichen Kenngrößen sind u.a. die Fahrzeugmasse, die Leistung der Antriebsaggregate, das Nenndrehmoment und die dazugehörige Nenndrehzahl, Fahrzeugtyp (BEV, REEV, PHEV, etc.), die Verbrauchsangaben aus dem EcoTest, Getriebedaten, die Höchstgeschwindigkeit, die Batteriekapazität und die Reifengröße beim Test sowie in der Serie. Fehlende Angaben werden anhand von Auslegungsberechnungen abgeschätzt und in den Kalibrierprozess einbezogen.

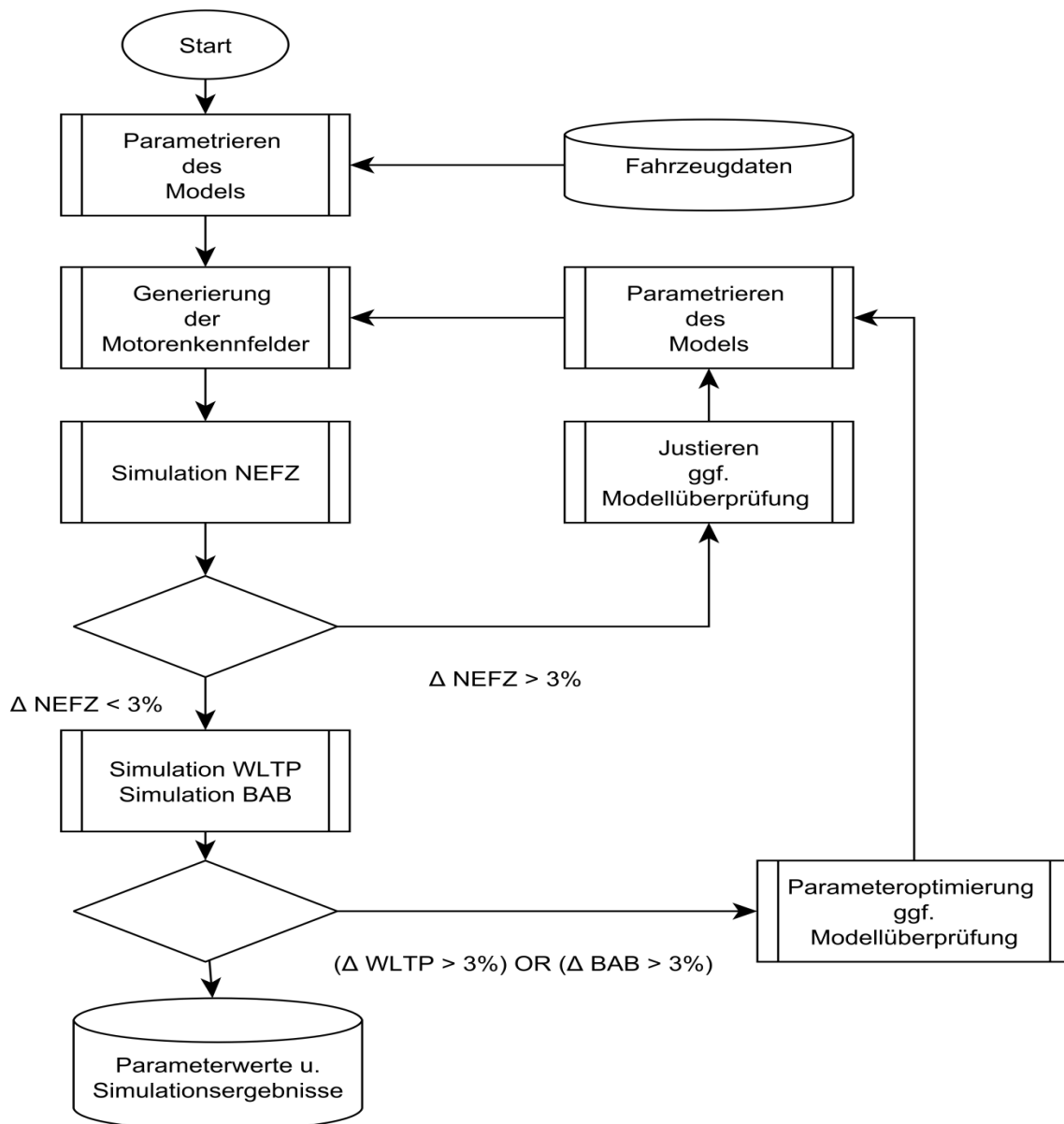


Bild 8: Ablaufplan der Parametrierung und Kalibrierung des Modells anhand der Energieverbrauchswerte aus dem ADAC EcoTest (NEFZ, WLTP und BAB).

Nach der Initialparametrierung wird ein Simulationslauf mit dem NEFZ-Zyklus als Vorgabeprofil durchgeführt. Anschließend wird der Simulationsergebniswert mit dem im NEFZ gemessenen Normverbrauch verglichen. Ist die Differenz größer als der zulässige

Schwellwert, werden gezielt Parameter, die aus Auslegungsberechnungen oder der Kennfeldgenerierung stammen, nachjustiert. Wird der Schwellwert weiterhin überschritten, findet eine Modellüberprüfung statt. Befindet sich die Differenz im Rahmen des Schwellwertes, werden die Einstellungen anhand des WLTP- und BAB-Zyklus überprüft. Falls die Simulationsergebnisse valide sind, werden die gefundenen Parameterwerte zusammen mit den Simulationsergebnissen abgespeichert und für die Berechnung aufgezeichneter Zyklen vorgehalten. Weichen die Werte des WLTP- oder BAB-Zyklus trotz Optimierung der Parameter innerhalb vorgegebener Wertebereiche ab, so findet auch hier eine Modellüberprüfung mit anschließender Überarbeitung des Programmcodes statt, um das Fahrzeugmodell mit weiteren notwendigen Modulen zu erweitern. Damit findet eine fortlaufende Überprüfung und Optimierung des Modells anhand von neuen Messdaten statt.

4. Ausgewählte Simulationsergebnisse und Fazit

Bild 9 zeigt die Betriebspunkte eines Dieselmotors im NEFZ-, WLTP- und dem ADAC Autobahn-Zyklus (BAB), die anhand einer Simulationsrechnung ermittelt wurden. Deutlich erkennbar ist die Häufung an bestimmten Lastpunkten im NEFZ, während im WLTP bereits eine breitere Verteilung der Lastpunkte erkennbar ist. Im Autobahnzyklus werden dann auch Bereiche höherer Lasten und somit höheren Verbrauchs angesprochen. Die drei Zyklen stellen damit eine gute Basis für die Ermittlung bzw. Validierung der Modellparameter dar.

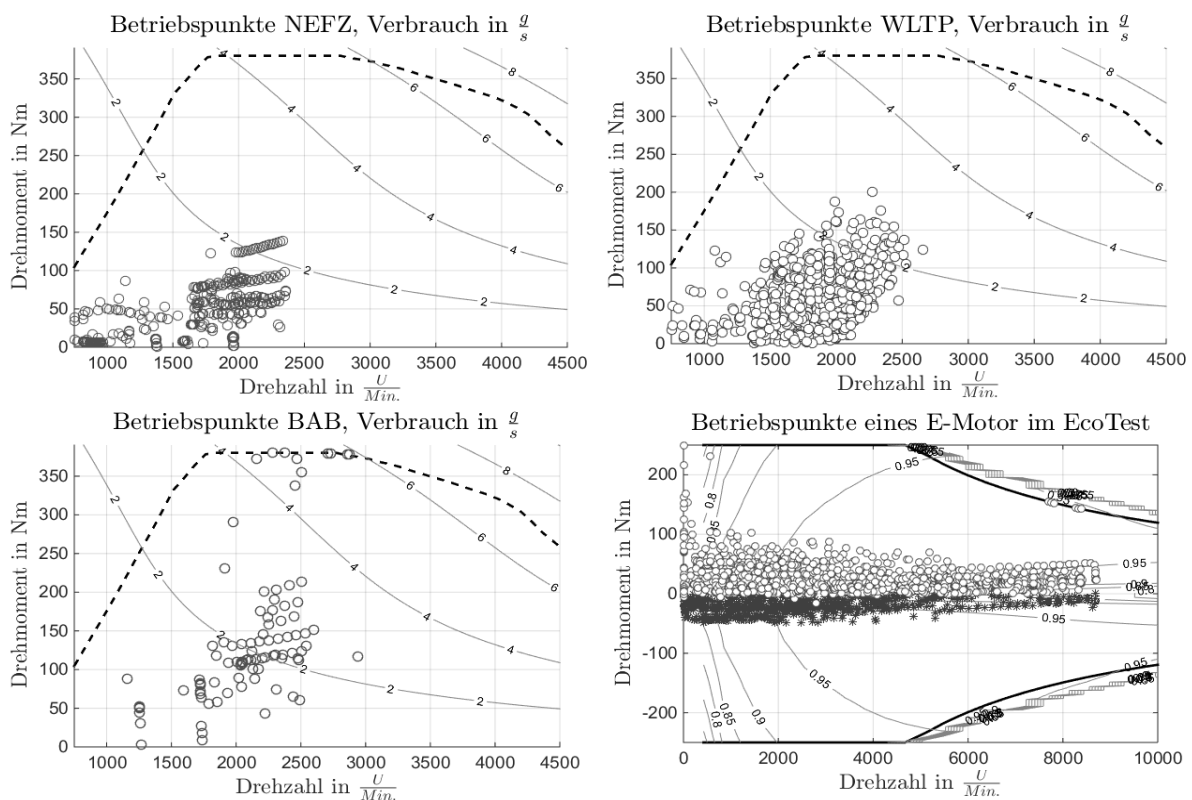


Bild 9: Oben links, oben rechts, unten links: Generierte Kennfelder eines Dieselmotors mit den Betriebspunkten im NEFZ-, WLTP- und BAB-Zyklus. Unten rechts: Generiertes Kennfeld eines Elektromotors mit den Betriebspunkten aller drei Zyklen.

Darüber hinaus ist das Kennfeld eines Elektromotors gemäß Abschnitt 2.2 dargestellt, das die Betriebspunkte des gesamten ADAC EcoTest (NEFZ, WLTP und BAB) sowohl für den Vortrieb als auch im Generatorbetrieb enthält. Man erkennt eine breite Verteilung der Lastpunkte über den gesamten Drehzahlbereich.

In *Bild 10* sind die Beispielergebnisse aus einem Simulationslauf nach Kalibrierung der Fahrzeugparameter anhand des NEFZ-Zyklus gegenübergestellt. Während das Ergebnis des HEV (Fzg. 5) unzulässige Abweichungen in den beiden Zyklen WLTP und BAB aufweist, sind die Differenzen zwischen Messung und Simulation der anderen Fahrzeuge in akzeptablen Bandbreiten: die eingesetzten Parameterwerte führen für diese Fahrzeuge zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Im Falle des Fzg. 5 müssen die Parameter weiter optimiert und ggf. das Modell erweitert werden, um weitere Einflüsse abzubilden.

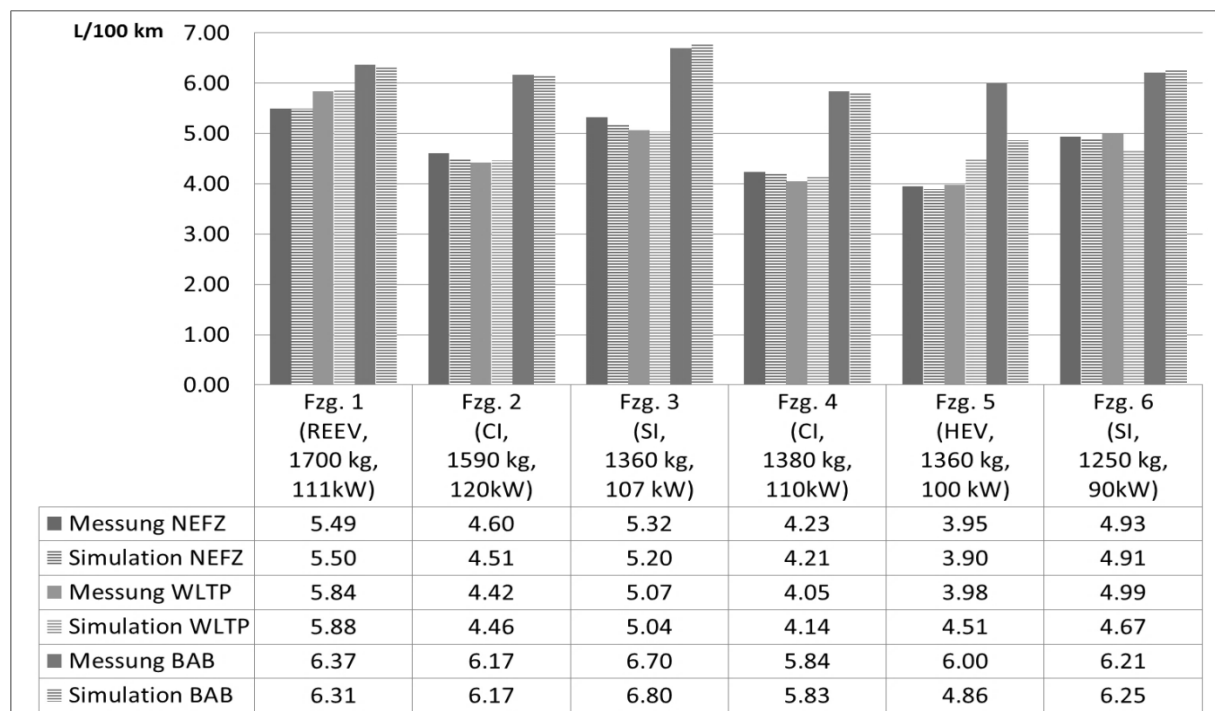


Bild 10: Simulationsergebnisse ausgewählter Fahrzeuge im WLTP- und BAB-Zyklus nach Kalibrierung am NEFZ. (REEV:= Elektrofahrzeug mit Range Extender; CI := Dieselmotor; SI:= Benzinmotor; HEV := Hybrid-Pkw).

Die ersten Simulationen zeigen damit für verschiedene Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten zuverlässige Ergebniswerte, die eine Berechnung der Verbräuche aufgrund individueller Fahrprofile erlauben. In Kombination mit dem Klimatisierungsmodell soll zukünftig eine Reichweiten- und Verbrauchsberechnung für verschiedene Witterungsbedingungen im Jahresgang und für individuelle Nutzungsprofile durchgeführt werden.

Aktuell wird das Modell an weiteren Fahrzeugen erprobt und validiert. Die Ergebnisse der nutzerspezifischen Verbräuche für einzelne Elektrofahrzeuge gehen dann in die Kosten- und Umweltbewertung der App- und Internet-Plattform My eDrive ein.

Literatur

- [1] Bozem, Karlheinz; et al. (2013): Elektromobilität: Kundensicht, Strategien, Geschäftsmodelle. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- [2] Mock, Peter; Tietge, Uwe; Franco, Vicente; German, John; Bandivadekar, Anup; Ligterink, Norbert; Lambrecht, Udo; Kühlwein, Jörg; Riemersma, Iddo (2014): FROM LABORATORY TO ROAD. A 2014 Update of Official and “Real-World” Fuel Consumption and CO₂ Values for Passenger Cars in Europe. Beijing, Berlin, Brüssel, San Francisco, Washington: International Council on Clean Transportation.
- [3] Helms, Hinrich; Lambrecht, Udo; Jöhrens, Julius; Pehnt, Martin; Liebich, Alex; Weiß, Uta; Kämper, Claudia (2013, rev. 2014): Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität (FKZ 0325071A). Heidelberg: IFEU-Institut.
- [4] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2014): HANDLUNGSLEITFADEN ELEKTROMOBILITÄT IN KOMMUNEN. Bausteine zur Entwicklung kommunaler Strategien für Planer und Entscheider. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- [5] Ben-Chaim, Michael; Shmerling, Efraim; Kuperman, Alon (2013): Analytic Modeling of Vehicle Fuel Consumption. *Energies* 6, no. 1: 117-127.
- [6] Haken, Karl-Ludwig (2013): Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. München: Carl Hanser Verlag.
- [7] Perez, Hector E.; Siegel, Jason B.; Lin, Xinfan; Stefanopoulou, Anna G.; Ding, Yi; Castanier, Matthew P. (2012): PARAMETERIZATION AND VALIDATION OF AN INTEGRATED ELECTRO-THERMAL LFP BATTERY MODEL. Michigan: University of Michigan; U.S. Army TARDEC.
- [8] Reif, Konrad (Hrsg.) (2010): Batterien, Bordnetze und Vernetzung. Bosch Fachinformationen Automobil. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- [9] Reif, Konrad (Hrsg.) (2012): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- [10] Eberspach, Günter; Kohle, Uwe; Beetz, Klaus (2010): Beheizungskonzepte für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben. ATZ 04/2010 112. Jahrgang.
- [11] Konz, Martin; Lemke, Nicholas; Försterling, Sven; Eghtessad, Marjam (2011): Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge. FAT-Schriftenreihe: FAT 233.
- [12] Großmann, Holger (2013): PKW-Klimatisierung – Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

- [13] Baltzer, Sidney; Gissing, Jörg; Jeck, Peter; Lichius, Thomas; Eckstein, Lutz (2014): Integration of Micro-CHP Units into BEVs – Influence on the Overall Efficiency, Emissions and the Electric Driving Range. Michigan: 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV).

Autoren / *The Authors:*

B. Eng., Jan Kräck, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg

Dipl.-Physiker, Julius Jöhrens, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg

Dipl.-Geograph, Hinrich Helms, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg