



VDI-Fachtagung

Innovative Antriebe 2018

Der Ausblick auf die Fahrzeugantriebe für die kommenden Dekaden

VDI-BERICHTE
Herausgeber:
VDI Wissensforum GmbH



VDI-Fachtagung

Innovative Antriebe 2018

Der Ausblick auf die Fahrzeugantriebe für die kommenden Dekaden

Dresden, 27. und 28. November 2018

Bildquelle: © Volkswagen

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek (German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuscriptdruck.

Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092334-5

Inhalt

► Zukünftiges Mobilitätsverhalten

Mobilität 2050 – Selfdriving-eCo-Hyperflyyer, Drahtesel, oder was?	1
K. C. Keller, Avenirure GmbH, Freinsheim	

► Ökobilanzierung

Einfluss von Zellbauform und Zellchemie auf die Ökobilanz von batterieelektrischen Fahrzeugen	5
--	----------

T. Semper, M. Clauß, IAV GmbH, Stollberg;
A. Forell, IAV GmbH, Bad Cannstatt

Anwendungsfallabhängige CO₂-Bilanzen elektrifizierter Fahrzeugantriebe.	17
O. Ludwig, J. Muth, M. Gernuks, H. Schröder, T. Lösche-ter Horst, Volkswagen AG, Wolfsburg	

Prädiktion der Lebensdauer von Traktionsbatteriesystemen für reale Nutzungsszenarien	33
---	-----------

M. Ufert, Technische Universität Dresden, Professur für Fahrzeugmechatronik;
A. Batzdorf, L. Morawietz, IAM GmbH, Dresden

Predictive Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles: eHorizon for Battery Management System.	49
--	-----------

M. Caggiano, FEV Italia, Bologna, Italy;
N. Cavina, A. Capancioni, University of Bologna, Italy;
S. Mazzetti, Automobili Lamborghini, S. Agata Bolognese, Italy

► Antriebstopologien

Wasserstoff-betriebener Verbrennungsmotor als effizienter Antriebsstrang im Nutzfahrzeugsektor – Mit Hilfe eines innovativen 4-Komponentenansatzes zum emissionsfreien Verbrennungsmotor.	65
--	-----------

T. Korn, KEYOU GmbH, Unterschleißheim

From customer requirements to the optimal hybrid powertrain – High-performance hybrid transmission for future plug-in hybrid drives	83
--	-----------

J. Müller, J. Liebold, C. Danzer, IAV GmbH, Chemnitz/Stollberg

Schaeffler E-Mobilität – Systeme und Komponenten für hybridisierte und elektrische Antriebe	93
A. Englisch, Schaeffler, Bühl	
Concept studies of SI engines 2030+ – Challenging tasks in 0D/1D engine simulation	107
M. Grill, FKFS, Stuttgart; S. Hann, M.Sc. Sven Fasse, Mahir Tim Keskin, M. Bargende	

► **Antriebsmanagement in der vernetzten Umgebung**

Energieeffiziente Fahrstrategien für hochautomatisierte Fahrzeuge	137
J. Gutsche, Dr.-Ing. Rico Baumgart,	
J. Aurich, Dipl.-Ing. Wieland Gelke,	
F. Schrödel, IAV GmbH, Chemnitz	
Cloud-basierte Fahrzeugfunktionen – Cloud als neue Umgebung für die Fahrzeugregelung	147
F. Milani, Robert Bosch GmbH, Renningen;	
C. Beidl, Technische Universität Darmstadt	

Mobilität 2050

Selfdriving-eCo-Hyperflyyer, Drahtesel, oder was?

K. Christoph Keller MPhil, Dipl.-Ing. (FH), Avenirre GmbH, Freinsheim

Kurzfassung

Der Bandbreite absehbarer und möglicher zukünftiger Herausforderungen kann nicht mit Planung oder Agilität begegnet werden. Unternehmen – ob im Mobilitätsbereich oder in anderen Branchen – müssen zukünftig für unerwartete und emergente Veränderungen gerüstet sein.

1. Lehren aus der Technikgeschichte

Alternative Antrieb waren vor 30 Jahren bereits ein Thema. 1982 wurde im Labor von General Electric das erste Hybridfahrzeug gebaut – die Patente gingen später nach Japan. Zu Toyota. Auch die deutsche Automobilindustrie war auf der Höhe der Zeit. 1989 wurde der Audi ‚Duo‘ vorgestellt. Zum Fünfzylindermotor gesellte sich ein E-Motor mit einer NiCd Batterie als Energiespeicher. Keines dieser Fahrzeuge wurde allerdings in Großserie gebaut.

Das erste Kameragesteuerte Fahrzeug, VaMoRs (Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen), konnte bereits 1987 völlig autonom mit Geschwindigkeiten bis zu 96 km/h fahren. Alles schonmal dagewesen? Oder alles völlig neu? Was kann uns die Technikgeschichte über die Zukunft sagen?

Erstens: Eine Technologie wird immer auf dem Stand ihrer höchsten Reife abgelöst. Die potentielle Nachfolgetechnologie treibt, wie vom Beispiel der Schifffahrt unter Segeln bekannt, ihre Vorläufer zu Höchstleistungen an, bevor das Rennen endgültig verloren ist. Die besten Verbrennungsmotoren wird es geben, wenn die Alternativen längst etabliert sind. Wer zu lange festhält, geht mit der alten Technologie unter.

Zweitens: Neue Technologien wirken wie ein Jungbrunnen auf alte Technologien. Die digitale Transformation hat die Antriebswelt bereits erfasst. Neue Antriebe und neue Geschäftsmodelle gehen – z.B. bei Fahrakkumulatoren – Hand in Hand. Ein moderner Verbrennungsmotor ist ein Computer mit einem ‚exotischen‘ Peripheriegerät.

Drittens: Langfristig machen multifunktionale Infrastrukturen zu geringen Kosten das Rennen. Kuriosa der Technikgeschichte wie die ‚Atmospheric Railway‘ von Brunnel – einem der angesehensten Ingenieure seiner Zeit – zeigen das (und machen wenig Hoffnung für einen Hyperloop). Sie war weder mit den bestehenden Schienenfahrzeugen kompatibel, noch mit dem

Straßenverkehr, da ein schienengleicher Bahnübergang wegen des massiven Antriebsrohres zwischen den Gleisen unmöglich war.

Viertens: Jede neue Technologie heilt (alle) Krankheiten, macht den Menschen überflüssig, stellt eine Gefahr für Jugend und Familie dar, ... NICHT! Das Muster kennen wir von der Einführung der Elektrizität, der Atomenergie und jetzt von der Blockchain. Die neue Technologie wird nach allen sich anbietenden Problemen geworfen – und manchmal bleibt sie kleben. Ausprobieren ist unabdingbar – eine gesunde Skepsis gegenüber den Erwartungen der ersten Stunde auch.

Fünftens: Die beste Technologie ist nicht die beste Innovation, wie das Beispiel Betamax vs. VHS und viele andere belegen. Es kommt für die Durchsetzung von neuen Technologien auch und vor allem auf die Kontextfaktoren aus Gesellschaft, Wirtschaft, Politik an. Eine Aufzählung technischer Vorteile sagt nichts über die Chancen einer Innovation.

Sechstens: Von der Pole-Position zu starten bedeutet nicht als Sieger durchs Ziel zu gehen. Kodak hat die Digitalfotografie erfunden und trotzdem alles verloren. Das gilt für Unternehmen wie für Technologien. Eine Technologie entwickelt sich nur weiter, wenn (mit Zeit und Geld) an ihrer Verbesserung gearbeitet wird.

Siebentens und letztens: Der Technologielebenszyklus ist eine Halbwahrheit. Die Brennstoffzelle wurde bereits einmal vom Markt verdrängt – vom Dynamo eines gewissen Herrn Siemens. Der Elektroantrieb wurde bereits einmal vom Markt verdrängt – vom Verbrennungsmotor eines Herrn Otto in der Ausführung Henry Fords. Der Austausch (oder Fortschritte in) einer Teil-Technologie mischen die Karten für alle realisierbaren Technologien neu. Auch die ‚Windmühle‘ ist wieder auferstanden. Um eine Vorstellung von den möglichen und wahrscheinlichen Technologien eines zukünftigen Automobilantriebs zu bekommen muss das Netz also weiter ausgeworfen werden als dies heute meist geschieht.

2. Aktuelle Trends und Technologien

Trends sind ein Versuch, die Zukunft wenigstens teilweise zu erklären und durchschaubar zu machen. Trends sind eben gerade nicht Moden, wie die häufige Frage nach ‚neuen Trends‘ suggeriert, sondern andauernde Veränderungen, von denen wir annehmen, dass sie in Zukunft weiterlaufen. Trends entstehen auch nicht durch die Behauptungen von Trend-Gurus, sondern sollten, wenn sich Entscheidungen auf sie stützen, empirisch belegbar sein. Für die Mobilität der Zukunft gibt es eine Reihe relevanter und mehrheitlich sicher bekannter Trends, weswegen eine Aufzählung mit wenigen kurzen Erläuterungen genügen soll.

Autonomes Fahren, heute bereits Assistenzsysteme. Alternative Antriebe (Hybrid, Batterie-elektrische Antriebe, Brennstoffzelle, ...), Neue Verkehrssysteme (Hyperloop, Tunnelsysteme

unter Städten, ...) und zu guter Letzt die ‚individual air mobility‘, die große Mengen Investoren-
gelder angezogen hat.

Die digitale Transformation, insbesondere das unbundling genannte aufbrechen bestehender
Geschäftsmodelle durch Digitalkonzerne und Startups, kann die Wettbewerbslandschaft in-
nerhalb weniger Jahre stark verändern.

Neben den technischen Trends sind gesellschaftliche Entwicklungen jedoch von zentraler Be-
deutung für die Frage, welche Innovationen sich durchsetzen werden. Die politischen Prioritä-
ten haben sich stark verschoben – die Gesundheit der Bürger wird über Mobilität und Wirt-
schaftsinteressen gestellt. Das Leitbild der Nachhaltigkeit ist gestaltungswirksam und hat prakti-
sch den Alleinvertretungsanspruch für eine erstrebenswerte Zukunft übernommen.

Und: Der Atlantik ist schon lange nicht mehr das Zentrum der (Automobil-)Welt. Zukünftig ist
jedes Produkt, das nicht auf den chinesischen oder indischen Markt ausgerichtet ist automa-
tisch ein Nischenprodukt.

3. Ausblick: 2050 wird sich ganz normal anfühlen

Warum normal? Venkatesh Rao [1] hat dieses Phänomen so beschrieben: Es scheint eine
gesellschaftliche Vereinbarung zu geben, neue (Verkehrs)technologien (im Massenmarkt) ma-
ximal soweit auszureißen, dass sie nicht unbequemer werden als die Postkutsche zu Goethes
Zeiten. Vom Start vielleicht einmal abgesehen würde Kolumbus den Flug über den Atlantik
sicher als überaus komfortabel beschreiben. Mit derselben Maschine kann man auf einer Pa-
rabelflugbahn aber problemlos für 20 Sek. Schwerelosigkeit erzeugen. Wir nutzen Technolo-
gien aktiv nur so weit, dass sie uns keine Angst machen – leben als Techniknutzer quasi in
einem prekär verlängerten 15 Jahrhundert.

4. Szenarien

Nachdem nun die Randbedingungen etabliert sind können Szenarien, wie sie zum Beispiel in
Strategieberatung, Vorentwicklungsplanung oder Unternehmensentwicklung zum Einsatz
kommen aufgezeigt werden. Szenarien sind Peter Bishop [2] zufolge Prognosen auf Basis
alternativer Annahmen. Diese Annahmen sind für das erste und dritte Szenario bewusst an
den Rändern des Zukunftsraums angesiedelt. Keines dieser Szenarien soll die Zukunft vor-
hersagen; keines ist eine wünschenswerte Zukunft. Sie sind bewusst als Grenzen des heute
denkbaren Zukunftsraums angelegt.

Szenario 1: Drahtesel

Grundannahme: Nationalisierung, Protektionismus, Autoritäre Demokratien

Leitgedanke: „Weaponisation of Sustainability“ Die besten Werbeagenturen der Welt haben die Bevölkerung überzeugt, wie nachhaltig es ist zu Fuß zu gehen und welchen Luxus ein Fahrrad darstellt.

Auswirkungen: Konventionelle Antriebe dominieren bei wesentlich geringeren Stückzahlen und gesunkener Fahrleistung. Das Luxusauto - 3.5 t Super-SUV wegen schlechter Infrastrukturen für die 1% Top-Verdiener. 30% der Bevölkerung gehen zu Fuß oder fahren mit dem Rad.

Szenario 2. Selfdriving-eCo-Hyperflyyer

Grundannahme: Fortschritt ist technologischer Fortschritt

Leitgedanke: Aus einer Phase des diversifizierten Portfolios alternativer Antriebe und Energiespeicher / Energiezufuhr mit einem Höhepunkt um 2035 geht eine standardisierte Technologie hervor.

Auswirkungen: Dominante Technologie: batterieelektrisch oder Brennstoffzellen für autonome (Land- und Luft-)Fahrzeuge (in Infrastrukturen, die einem ÖPNV vergleichbar sind). In Nischen andere Lösungen (>500kW möglicherweise LNG mit Verbrennungsmotoren; Baumaschinen kabelgebunden; Militär ggf. weiterhin Verbrennungsmotor / Gasturbine).

Szenario 3. Unbundled Disruption

Grundannahme: Digitalisierung over the top – Fahrzeughersteller werden abhängig von den Digitalkonzernen.

Auswirkungen: Alternative Antriebe - ja. Wahrscheinlich batterieelektrisch (liefert am einfachsten Daten, geringste Wartungsintensität. Ladeinfrastruktur wie aktuell Mietfahrrad-Stationen). Immer low-cost! Designed in California, Made in China. Operated by Alphabet / amazon / Uber

Dieser Bandbreite möglicher Herausforderungen kann nicht mit einem Plan und einem Plan B in der Hinterhand begegnet werden. Auch Agilität kann – angesichts teilweise langer Entwicklungszeiträume für Technologien für sich allein genommen keine Lösung darstellen. Unternehmen – ob im Mobilitätsbereich oder in anderen Branchen – müssen zukünftig für unerwartete und emergente Veränderungen gerüstet sein.

Literatur

- [1] Rao, Venkatesh: Welcome to the Future Nauseous. 2012. Online: <https://www.ribbon-farm.com/2012/05/09/welcome-to-the-future-nauseous/>
- [2] Bishop, Peter & Hines, Andy: Teaching about the future. 2012. Palgrave Macmillan.

Einfluss von Zellbauform und Zellchemie auf die Ökobilanz von batterieelektrischen Fahrzeugen

Influence of Cell Design and Cell Chemistry on the Environmental Impact of Battery Electric Vehicles

**Torsten Semper, Michael Clauß, IAV GmbH, Stollberg;
Alexander Forell, IAV GmbH, Bad Cannstatt**

Kurzfassung

Bei Betrachtung der Treibhausgasemissionen von batterieelektrischen Fahrzeugen über deren gesamten Lebenszyklus ist zu erkennen, dass im Vergleich zu verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen wesentliche Nachteile innerhalb der Produktionsphase dieser Fahrzeuge bestehen. Insbesondere die Herstellung der Traktionsbatterie trägt signifikant zu diesen hohen Treibhausgasemissionen bei. Es werden detailliert Möglichkeiten zur Reduzierung des Treibhausgaspotenzials durch die Wahl angepasster Zellchemien in Verbindung mit geeigneten Zellbauformen diskutiert. Die möglichen Rückwirkungen dieser Maßnahmen auf Traktionsbatterieebene werden analysiert. Es erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse auf Gesamtfahrzeugebene im Vergleich mit verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen.

1. Einleitung

Die heute dominierenden Fahrzeugantriebe mit Hubkolbenverbrennungskraftmaschine werden zunehmend durch elektrische Antriebskomponenten ergänzt bzw. in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen auch von batterieelektrischen und Brennstoffzellenantrieben verdrängt. Die Methode der Ökobilanzierung, genannt auch Life Cycle Assessment (LCA), quantifiziert umweltrelevante Emissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs. So wird aufgezeigt in welcher Lebensphase, von der Rohstoffgewinnung - über die Fahrzeugherstellung und Nutzung - bis hin zur Verwertung, die jeweiligen Konzepte ihre spezifischen Vor- bzw. Nachteile aufweisen [1]. Mit Kenntnis dieser Zusammenhänge lassen sich die Handlungsfelder zur gesamthaften Verbesserung der Antriebskonzepte ableiten.

In Bild 1 ist ein Vergleich des Treibhausgaspotenzials von unterschiedlich angetriebenen Kompaktklassenfahrzeugen dargestellt. Die Bewertung des Treibhausgaspotenzials erfolgt in

Gramm Kohlendioxydäquivalenten pro Kilometer (gCO₂e/km) in Abhängigkeit der Laufleistung. Der erforderlichen Bestimmung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase liegen Fahrzeuglängsdynamiksimulationen zu Grunde. Die Energiebereitstellung erfolgt für alle Fahrzeuge mit dem jeweiligen EU27-Mix. Das batterieelektrische Fahrzeug ist mit einer 60 kWh Traktionsbatterie, bestehend aus prismatischen Zellen, ausgestattet. Die Produktion der Traktionsbatterie mit 30.000 Stück pro Jahr erfolgt in Deutschland.

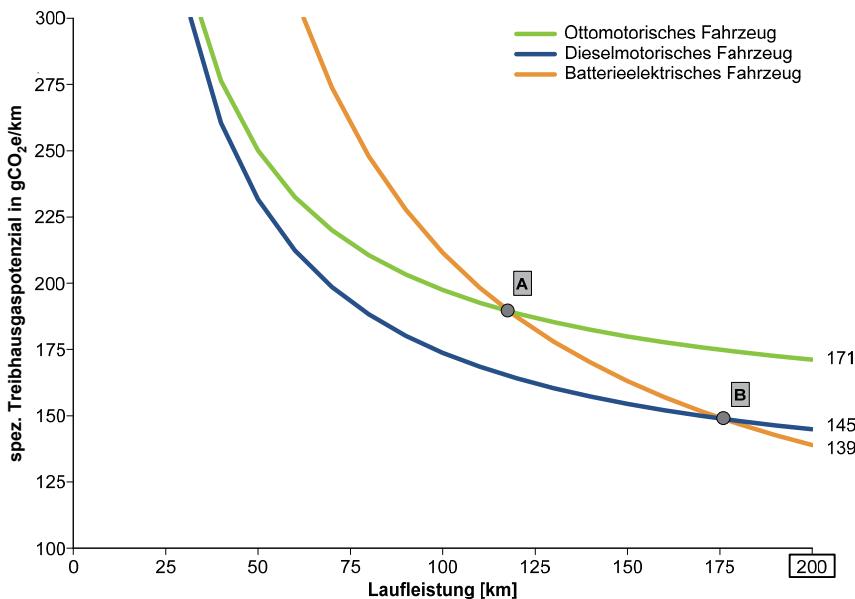


Bild 1: Treibhausgaspotenzial in Abhängigkeit von der Laufleistung für typische Kompaktklassefahrzeuge (Kraftstoffbereitstellung und Bereitstellung der elektrischen Energie: EU27, Fahrzyklus: WLTC, Energieinhalt Traktionsbatterie: ca. 60 kWh)

Es wird deutlich, dass das batterieelektrische Fahrzeug unter den gewählten Randbedingungen erst bei einer Gesamtlaufleistung ca. 120.000 bzw. 175.000 Kilometern einen Vorteil gegenüber den verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen erzielt (Punkte A und B). Unter Berücksichtigung einer überwiegenden Nutzung im urbanen Bereich und den damit verbundenen vergleichsweise geringen Jahreslaufleistungen von batterieelektrischen Fahrzeu-

gen ist die Lage dieser Break-even Punkte kritisch zu bewerten, da das Lebensende des Großteils dieser Fahrzeuge in Realität möglicherweise schon vor dem Erreichen dieser Schnittpunkte liegt. Somit ist nach geeigneten Möglichkeiten zu suchen die Treibhausgasemissionen für batterieelektrische Fahrzeuge zu verringern, sodass die ökologischen Vorteile gegenüber den etablierten Antriebstechnologien nach kürzeren Laufleistungen erreicht werden.

2. Fahrzeuglebensphasen und Handlungsfelder

Die Verläufe in Bild 1 zeigen auch, dass nach einer Laufleistung von 200.000 km das batterieelektrische Kompaktklassefahrzeug 139 gCO₂e/km emittiert hat. Demgegenüber emittieren die verbrennungsmotorischen Fahrzeuge 145 bzw. 171 gCO₂e/km. Mit zunehmender Laufleistung nähern sich die Verläufe aller Fahrzeuge asymptotisch der Summe des jeweiligen Treibhausgaspotentials aus der Energiebereitstellung (Kraftstoff und elektrische Energie) und dem Fahren an. Dieser Wert sinkt für das batterieelektrische Fahrzeug in Zukunft weiter durch den stetigen Zuwachs des Anteils regenerativ erzeugter elektrischer Energie in Europa. Bei kleiner werden Laufleistungen streben alle Werte gegen unendlich. Auffallend sind in diesem Zusammenhang die signifikant höheren Treibhausgasemissionen des batterieelektrischen Fahrzeugs gegenüber den Vergleichsfahrzeugen im Laufleistungsbereich von ca. 60.000 km. Dieses grundsätzliche Verhalten soll anhand des Bild 2 näher erläutert werden. Dargestellt ist die Verteilung der Treibhausgasemissionen der Fahrzeuge nach Lebensphasen. Im Fahrbetrieb emittieren die verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge 104 bzw. 118 gCO₂e/km. Das batterieelektrische Fahrzeug emittiert keine Treibhausgasemissionen in dieser Lebensphase. Dafür werden innerhalb der Phase der Energiebereitstellung deutlich mehr spezifische CO₂-Äquivalente emittiert. Durch die Normierung auf einen Kilometer verhalten sich diese Werte laufleistungsunabhängig. Die Emissionen für die Produktion und die Verwertung der Fahrzeuge sind in diesem Zusammenhang laufleistungsabhängige Größen. Daher steigen diese Werte, bezogen auf einen Kilometer, bei kleiner werdenden Laufleistungen an, sodass diese zunehmend dominierend werden. Dies ist im Fall des batterieelektrischen Fahrzeugs umso dramatischer, da die Emissionen für die Produktion des batterieelektrischen Fahrzeugs (Summe aus Fahrzeugproduktion ohne Batterie und Traktionsbatterieproduktion) im Vergleich zu den verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen signifikant höher sind. Dies liegt insbesondere in der Herstellung der Hochvolt-Komponenten begründet [1]. Innerhalb dieser Kategorie nimmt wiederum die Traktionsbatterie eine dominierende Stellung ein.

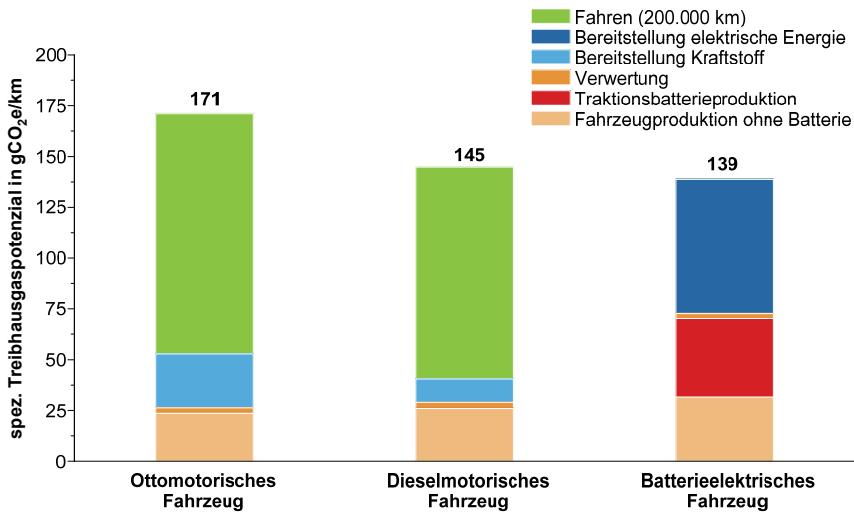


Bild 2: Treibhausgaspotenzial für typische Kompaktklassefahrzeuge nach 200.000 km

(Kraftstoffbereitstellung und Bereitstellung der elektrischen Energie: EU27,

Fahrzyklus: WLTC, Energieinhalt Traktionsbatterie: ca. 60kWh)

Wie im Bild 2 ersichtlich, trägt unter den gewählten Randbedingungen die Traktionsbatterieproduktion mit ca. 55% zu den gesamten Produktionsemissionen des Fahrzeugs bei. Zur Verbesserung der Gesamtbilanz liegt somit ein wesentliches Handlungsfeld in der Reduzierung der Treibhausgasemissionen innerhalb der Herstellung der Traktionsbatterie. Die nachfolgenden Betrachtungen konzentrieren sich daher auf einige wesentliche Einflussfaktoren für die Traktionsbatterieherstellung.

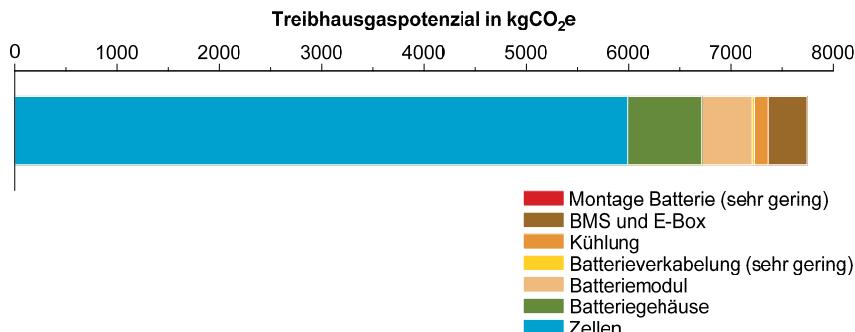


Bild 3: Treibhausgaspotentialverteilung für die Herstellung einer typischen Traktionsbatterie (Energieinhalt Traktionsbatterie: ca. 60kWh)

Bild 3 zeigt die Verteilung der Treibhausgasemissionen für die Traktionsbatterie des betrachteten batterieelektrischen Fahrzeugs. Zu besseren Veranschaulichung sind diese Werte in absoluten CO₂-Äquivalenten dargestellt. Es wird deutlich, dass ca. 75% der Emissionen auf die Herstellung der Zellen entfallen. Deutlich untergeordnet sind die Einflüsse von Kühlung, Verkabelung und Montage. Bei den peripheren Komponenten haben das Batteriemanagementsystem (BMS), das umgebende Batteriemodul für die Zellen und das Batteriegehäuse ebenfalls einen deutlichen Einfluss. Nachfolgend sollen Möglichkeiten der Reduzierung des Einflusses der Zellherstellung durch die Wahl angepasster Zellchemien in Verbindung mit geeigneten Zellbauformen diskutiert werden. Auf mögliche Rückwirkungen dieser Maßnahmen auf Traktionsbatterieebene wird ebenfalls eingegangen.

3. Einfluss der Batteriespeichermaterialien

Die für die Speicherung von Energie in Lithium-Ionen-Batterien notwendigen Materialien setzen sich aus einem Anoden- und Kathodenwerkstoff zusammen. In Abhängigkeit von elektrischer Leitfähigkeit und Haftungsvermögen der Partikel werden Additive zugemischt, die diese Eigenschaften weiter positiv beeinflussen. Dabei sind Graphit (C) und Lithiumtitanat (LTO) typisch für die Verwendung auf der Anodenseite. Auf der Kathodenseite finden Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) in den Zusammensetzungen 1:1:1 bzw. 8:1:1, Lithium-Nickel-Mangan-Aluminium-Oxid (NCA) und Lithium-Nickel-Mangan-Oxid (LNMO) Anwendung [2]. In Bild 4 sind die möglichen Materialkombinationen dargestellt. Die Basis bildet die Aktivmaterialkombination C/NMC (111) der Traktionsbatterie des batterieelektrischen Fahrzeugs. Deutlich zu erkennen, sind die grundsätzlich geringen Treibhausgaspotenziale in Kombination mit

Graphit im Vergleich zu Kombinationen mit LTO. Ursache sind das niedrige elektrische Potenzial und die hohe Kapazität von Kohlenstoff. Der im Vergleich zu LTO geringen Dichte von Kohlenstoff wirkt die deutlich höhere Kapazität entgegen. Beim Vergleich der Kathodenwerkstoffe zeigt LNMO weitere Vorteile. Diese Vorteile sind durch das hohe Ruhepotential der Materialkombination von ca. 4,6 V und den hohen Materialdichten begründet. Des Weiteren wird in dieser Kombination auf die Verwendung von Kobalt verzichtet. Die Stabilität der Elektrolyte stellen bei der Verwendung von LNMO derzeit aber noch eine Herausforderung dar. Die Aktivmaterialkombination C/NMC (811) erreicht hinsichtlich der CO₂-Äquivalente ähnlich niedrige Werte wie C/LNMO. Gegenüber C/NMC (111) entspricht dies einer Verringerung des Treibhausgaspotenzials von 41 %. Dies wird im Wesentlichen durch die Reduzierung des Kobaltanteils erreicht. Unter Berücksichtigung weiterer entscheidender Kriterien wie Kosten, Masse, Volumen und Stabilität ist daher C/NMC (811) derzeit die allgemein favorisierte Kombination. Zur weiteren Steigerung der Speicherdichte, wird auf der Anodenseite Silizium zugegeben. Auf der Kathodenseite hingegen wird der Kobaltanteil tendenziell noch weiter abgesenkt um weitere ökologische und ökonomische Potenziale zu erschließen.

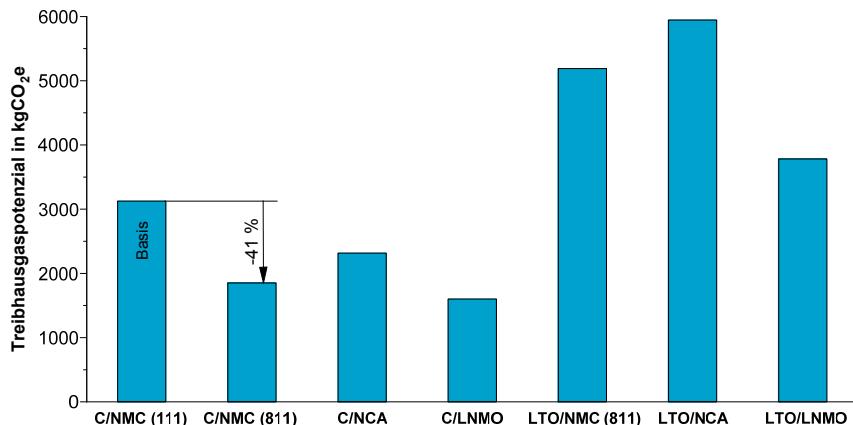


Bild 4: Vergleich der Aktivmaterialkombinationen

(bezogen auf einen Energieinhalt von ca. 60 kWh)

Die Auswirkung der Substitution von C/NMC (111) durch C/NMC (811) auf Traktionsbatterieebene ist in Bild 5 abgebildet. Das deutlich geringere Treibhauspotential der Aktivmaterialkombination C/NMC (811) wirkt sich auch positiv auf Zellebene aus. Allerdings wird der Vorteil innerhalb dieser Bezugsebene in etwa halbiert, da dieser innerhalb der Zelle im Wesentlichen

nur auf der Kathodenseite wirkt. Anode, Elektrolyt, Elektrodenableiter, Separator, Zellgehäuse und die Verarbeitung der Zelle bleiben von dieser Maßnahme weitestgehend unbeeinflusst. Bei Bewertung auf Traktionsbatterieebene verkleinert sich dieser Wert nochmals auf ca. 17%.

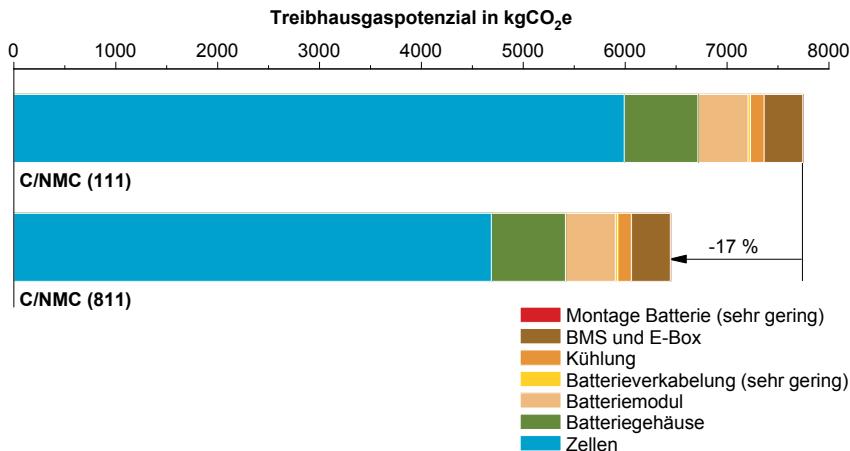


Bild 5: Auswirkung der Aktivmaterialsubstitution auf Traktionsbatterieebene
(Energieinhalt: ca. 60 kWh)

3. Einfluss der Zellbauformen

Batteriezellen werden typischerweise nach der geometrischen Form eingeteilt. Etabliert sind die prismatische Zelle, die Rund- und die Pouchzelle. Ein aktivmaterialunabhängiger Vergleich der benannten Zellbauformen ist in Bild 6 zu sehen. Das einheitliche Speichermaterial basiert auf der favorisierten Aktivmaterialkombination C/NMC (811). Die Unterschiede der Treibhausgasemissionen basieren somit ausschließlich auf den unterschiedlichen Gehäuseformen.

Dominiert wird das Treibhausgaspotential bei allen Bauformen von den Vorprodukten, welche in nachfolgenden Fertigungsprozessen zur Zelle verarbeitet werden. Der Einfluss der Verarbeitung zur Zelle ist demgegenüber vergleichsweise gering. Die geringsten CO₂-Äquivalente liefert die Pouchzelle. Sie zeichnet sich durch eine hohe Kapazität pro Einzelzelle und einen verhältnismäßig geringen peripheren Materialaufwand für Gehäuse und Kontaktierung aus. Der erhöhte Einsatz von Aluminium beim Gehäuse der prismatischen Zelle führt u.a. zu höheren Treibhausgasemissionen. Bei der Rundzelle wird auf Grund der geringen Kapazität pro Einzelzelle und der damit verbundenen hohen Stückzahl je Kilowattstunde eine große Anzahl von Gehäuseteilen benötigt. Diese verursachen gegenüber der Pouchzelle eine Erhöhung der

Treibhausgasemissionen beim Zellgehäuse. Auf Zellebene erzielt die Pouchzelle das beste Ergebnis. Auch mit der Rundzelle wird eine Verbesserung gegenüber der prismatischen Zelle erreicht.

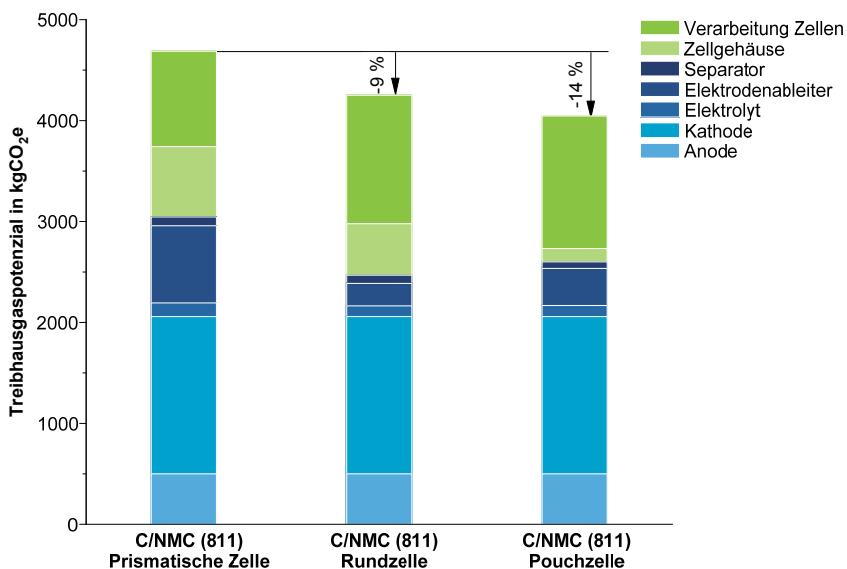


Bild 6: Vergleich der Zellbauformen (bezogen auf einen Energieinhalt von ca. 60 kWh)

In Bild 7 zeigt die Auswirkungen der verschiedenen Zellbauformen auf Traktionsbatterieebene im Vergleich zur Ausgangsbasis (Prismatische Zelle, C/NMC 111). Die Herstellung des Batteriemoduls und –gehäuses des Rundzellkonzepts zieht die Verbindung der hohen Anzahl von Zellen erhöhte Treibhausgasemissionen nach sich. Die prismatische Batterie und die Pouchbatterie weisen hinsichtlich der resultierenden CO₂-Äquivalente nur geringe Unterschiede auf. Der geringere Materialeinsatz der Pouchzelle wird auf Traktionsbatterieebene durch den Nachteil der notwendigen Verwendung von zusätzlichen Finnen und Gehäuseteilen kompensiert. Demgegenüber steht eine erhöhte Flexibilität hinsichtlich des Einsatz der Pouchzellen, da diese durch die Anpassung der Kühlfinnen gut an bestehende thermische Anforderung angepasst werden können. Prismatischen Zellen weisen durch ihr Aluminiumgehäuse dahingehend Nachteile auf. Insgesamt wird mit allen Zellkonzepten unter Verwendung der Aktivmaterialkombination C/NMC (811) eine Verbesserung gegenüber der Ausgasbasis erreicht. Aller-

dings wird der Vorteil der angepassten Zellchemie in Fall des Rundzellenkonzepts durch erhöhte Treibhausgasemissionen fast kompensiert, sodass der Vorteil gegenüber der Ausgangsbasis gering ist. Da mit keinem alternativen Zellformat (Rund- und Pouchzelle) eine Verbesserung gegenüber der prismatischen Zelle auf Traktionsbatterieebene erzielt wird, wird an dieser Zellbauform für die weiteren Betrachtungen festgehalten.

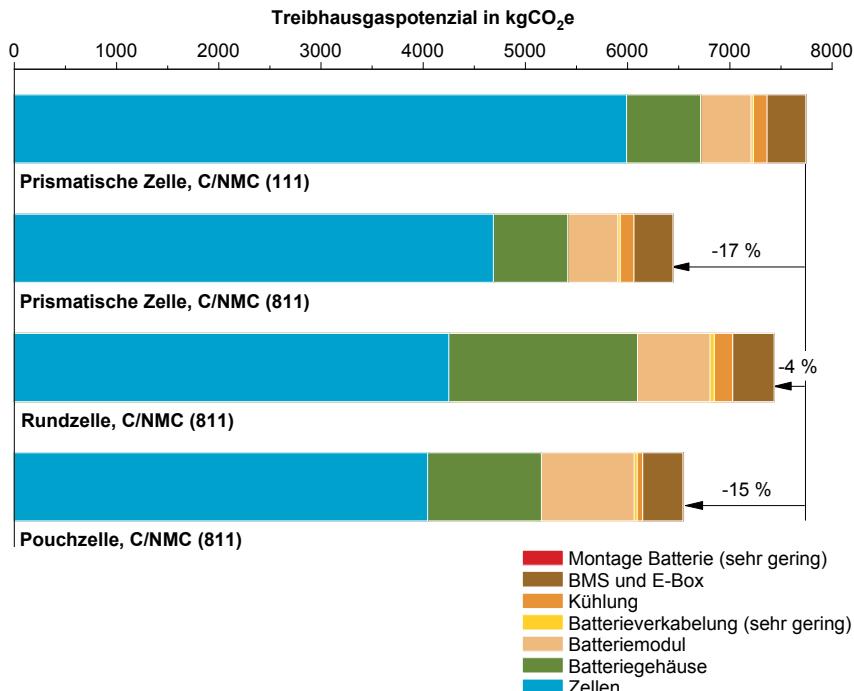


Bild 7: Auswirkung der Zellbauformen auf Traktionsbatterieebene

(Energieinhalt: ca. 60 kWh)

5. Auswirkung auf die Ökobilanz des batterieelektrischen Fahrzeugs

Abschließend wird der Einsatz der Aktivmaterialkombination C/NMC (811) in prismatischen Zellen gegenüber der Ausgangsbasis auf Gesamtfahrzeugebene anhand des Bildes 8 diskutiert. Das batterieelektrische Fahrzeug weist für den gesamten Lebenszyklus nun ein geringeres Treibhausgaspotential im Vergleich zu Ausgangsbasis auf. Die jeweiligen Break-even

Punkte verschieben sich in Richtung geringerer Laufleistungen. Der Schnittpunkt mit dem ottomotorischen Fahrzeug liegt nun bei ca. 100.000 km (vgl. Punkte A und A'). Gegenüber dem dieselmotorischen Fahrzeug wird jetzt ein Vorteil ab ca. 150.000 km erreicht (vgl. Punkte B und B').

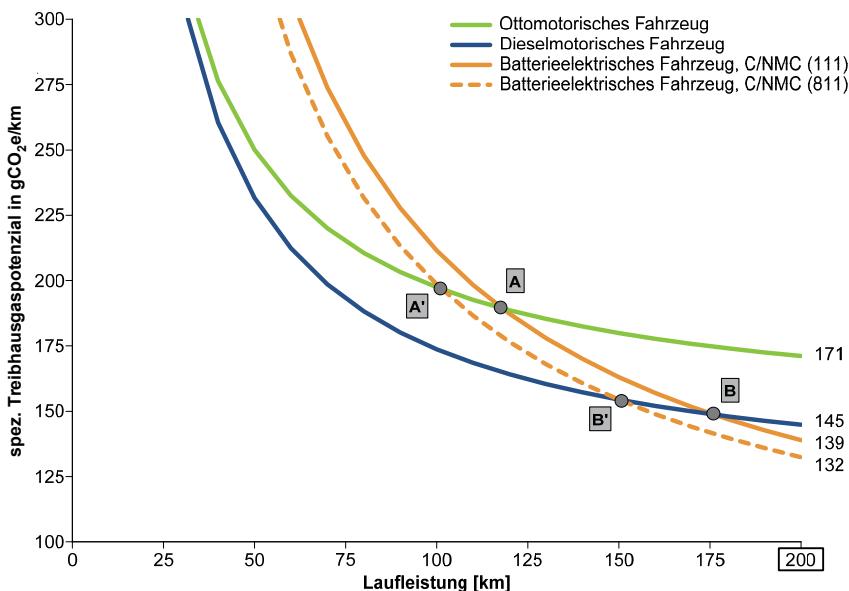


Bild 8: Verbesserung des Treibhausgaspotentials auf Gesamtfahrzeugebene
(Kraftstoffbereitstellung und Bereitstellung der elektrischen Energie: EU27,
Fahrzyklus: WLTC, Energieinhalt Traktionsbatterie: ca. 60 kWh)

Die erreichten Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung gegenüber der Ausgangssituation. Trotzdem müssen noch erhebliche Anstrengungen unternommen werden um ein batterieelektrisches Fahrzeug hinsichtlich seiner Gesamtbilanz weiterhin gegenüber den konventionellen Fahrzeugen zu verbessern. Ansätze die dazu beitragen können, sind beispielsweise neue Trockenbeschichtungsmethoden für Aktivmaterialien, großformatigere Zellen, Optimierung der Materialsynthese von Kathodenwerkstoffen und Reduktion des Aluminiumanteils in Batterien. Die Erhöhung der Reichweite durch Vergrößerung des Energieinhaltes der Traktionsbatterie und der Einsatz eines CO₂-intensiveren Energiemixes würden allerdings den hier

diskutierten und möglichen weiteren Maßnahmen entgegenwirken. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge innerhalb der Nutzungsphase ein signifikantes Verbesserungspotential durch den Einsatz strombasierter Kraftstoffe (Power to X) aufweisen [3]. Dies würde eine Verschiebung der Break-even Punkte hin zu deutlich größeren Laufleistungen nach sich ziehen.

- [1] Torsten Semper, Marek Gawor, Bernd Becker, Heiko Neukirchner: „Ganzheitliche Bewertung ausgewählter Antriebskonzepte im Kontext zukünftiger Mobilitätsanforderungen“, 8. Emission Control Conference 06/2016
- [2] Michael Clauß, Torsten Semper, Michael Barth: „Gesamthafte Bewertung von Hochvolt-Energiespeichern“, ATZelektronik 05/2018
- [3] Stephan Schmidt, Torsten Semper, Petra Seidel, Marek Gawor, Bernd Becker, Heiko Neukirchner: “Synthetic Gasoline - Impact on Life Cycle Assessment“, International Conference “Advanced Fuels for Sustainable Mobility” 11/2016

Anwendungsfallabhängige CO₂-Bilanzen elektrifizierter Fahrzeugantriebe

Use case driven CO₂ footprint of electrified powertrains

Dr.-Ing. Oliver Ludwig, Dipl.-Ing. Juliane Muth, Dr.-Ing. Marko Gernuks,
Dr.-Ing. Hendrik Schröder, Dr.-Ing. Tobias Lösche-ter Horst,
Volkswagen AG, Wolfsburg

Kurzfassung

Das Pariser Klimaabkommen von 2015 formuliert das Ziel einer deutlichen Reduzierung globaler CO₂-Emissionen. Auf den Automobilsektor bezogen erfordert dieses Ziel die Identifikation und Quantifizierung der Emissionsquellen im gesamten Fahrzeuglebenszyklus. Dieser Beitrag behandelt die CO₂-Lebenszyklusanalyse zukünftig prognostizierter Fahrzeugantriebe in verschiedenen Auslegungs- und Anwendungsfällen.

Als wesentliche Parameter werden die Art und Dimensionierung des Antriebs, und die daraus resultierenden, kundenrelevanten Fahrzeugeigenschaften diskutiert. Darüber hinaus sind die Annahmen zu Energiekette, Produktion und Gesamtaufleistung von großer Bedeutung.

Zusammenfassend bleibt je nach Anwendungsfall kritisch zu prüfen, welches Antriebskonzept den besten Kompromiss zwischen CO₂-Emissionen und Kundennutzen zeigt. Dabei werden aus heutiger Sicht ergänzend zum batterieelektrischen Antrieb zukünftig auch Brennstoffzellen- und stark hybridisierte verbrennungsmotorische Antriebe eine Rolle spielen.

Abstract

The 2015 Paris climate agreement demands a significant reduction of global CO₂ emissions. Regarding the automotive sector, this goal requires the identification and quantification of emission sources throughout the whole vehicle life cycle. This paper deals with the CO₂ life cycle assessment of future vehicle powertrains in different design and use cases.

The results proof to be significantly influenced by the powertrain architecture and dimensioning, and the corresponding costumer relevant vehicle properties. Aside to these, the assumptions regarding the energy provision, production and the total mileage are deciding.

In summary the powertrain concept with the best trade-off between CO₂ emissions and costumer benefits has to be sensibly determined depending on the certain use-case. From today's point of view, complementary to battery electric vehicles, fuel cell but also highly electrified combustion engine driven vehicles will play an important role in the future.

1. Motivation

Mit dem Pariser Klimaabkommen von 2015 wurde das weltweite Ziel formuliert, den anthropogenen Anteil an der globalen Erwärmung auf zwei Grad zu begrenzen. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, müssen weltweit und sektorübergreifend schon heute teilweise drastische Maßnahmen definiert und umgesetzt werden. Hierbei wird es entscheidend sein, die richtigen Maßnahmen hinsichtlich ökologischer Effizienz und ökonomischer Umsetzbarkeit zu bestimmen.

Mit Blick auf den Automobilsektor entstehen klimarelevante Emissionen über die gesamten Fahrzeuglebenszyklen hinweg. Durch die aktuelle Abgasgesetzgebung und öffentliche Debatten stehen zwar zumeist die Emissionen während der Fahrt (engl.: tank to wheel) im Fokus. Darüber hinaus sind typische Quellen für CO₂-Emissionen aber auch beispielsweise die Energie- und Transportaufwände für die Rohstoffbeschaffung, die Fahrzeugproduktion sowie das Recycling am Lebenszyklusende. Bild 1 zeigt eine Übersicht der Lebenszyklusphasen.



Bild 1: Fahrzeug-Lebenszyklus aus der Lebenszyklusanalyse (LCA)

Die Ableitung sinnvoller Schritte der technischen Weiterentwicklung erfordert die Identifikation und Quantifizierung der relevanten Emissionsquellen über all diese Phasen. Gleichzeitig sind aber auch ökologische und ökonomische Randbedingungen sowie die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Sektoren, wie etwa Mobilitäts- und Energiesektor, zu berücksichtigen.

Das geeignete Werkzeug für diese Fragestellung ist die in der DIN EN ISO 14040/44 [1] beschriebene Lebenszyklusanalyse (engl. life cycle assessment, LCA). Diese wird in der Konzernforschung der Volkswagen AG bereits seit 1996 eingesetzt und hinsichtlich ihrer Ergebnisse normgerecht durch externe Gutachter geprüft, um die Umweltperformance von Produkten und Technologien zu bestimmen. Im Folgenden werden Ergebnisse vorgestellt, die sich aus einer umfangreichen LCA-Studie zu verschiedenen heutigen und zukünftig prognostizierten Antrieben ableiten.

2. Lebenszyklusanalyse, Basisstudie

In der Regel fokussiert die Lebenszyklusanalyse jeweils aktuelle Serienfahrzeuge, für die sich die einzelnen Emissionsquellen recht genau bestimmen lassen. So können z.B. die Prozessschritte in der Produktion anhand der detaillierten Stückliste quantifiziert, und die Emissionen während der Nutzungsphase durch eine Hochrechnung der zertifizierten Emissionen aus der Fahrzeugzulassung abgebildet werden.

Auf diese Weise werden zwar recht genaue Ergebnisse erzielt, diese gelten entsprechend des Vorgehens aber nur für das spezifische Fahrzeug und den Sekundärennergiebedarf (tank-to-wheel) aus dem im Zulassungsverfahren festgeschriebenen Fahrprofil, wie etwa dem WLTC (new worldwide harmonized light vehicles test cycle) [2].

Ziel der hier zugrunde liegenden Basisstudie war einerseits die Berücksichtigung verschiedener realer und synthetischer Fahrprofile. Anderseits sollte eine Prognose für eine zukünftige Technologiegeneration mit Serieneinsatz 2030 gegeben werden. Diese Zielsetzung erforderte einen vollständig simulationsbasierten Ansatz. Für die Simulation der verschiedenen Antriebsstränge wurde hierzu eine in der Volkswagen Konzernforschung programmierte, kennfeld- und parameterbasierte Fahrzeuglängsdynamiksimulation eingesetzt. Neben der üblichen Modellierung der Energieflüsse vom Tank bzw. von der Batterie zum Rad im warmen, quasistationären Zustand berücksichtigt die Simulation auch das Kalt- und Warmlaufverhalten von Komponenten, dynamische Effekte sowie die Fahrzeugklimatisierung. Innerhalb der Studie wurde die Simulation anhand von Katalogwerten bekannter Serienfahrzeuge validiert.

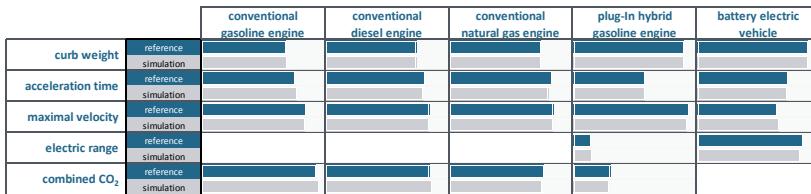


Bild 2: Validierung der Fahrzeuglängsdynamiksimulation

Im Allgemeinen hängt die Qualität von Simulationsergebnissen nicht nur von einer hohen Modellierungsgüte der physikalischen Zusammenhänge ab, sondern auch von den Eingangsparametern. Die Herausforderung bei der durchgeföhrten Lebenszyklusanalyse bestand in diesem Zusammenhang darin, einen im Sinne hoher Ergebnisgüte ausreichend großen Parameterraum zu definieren, gleichzeitig aber auch eine beherrschbare Übersichtlichkeit für Prognosen zu zukünftigen Technologiegenerationen zu wahren. Tabelle 1 gibt einen groben Überblick

über den gewählten Parameterraum. Zur Bestimmung der einzelnen Kennzahlen wurden intensive Diskussionen mit internen Experten geführt und ein Abgleich mit verschiedenen internen und externen Studien vorgenommen.

Tabelle 1: Parameterraum der Basis-Lebenszyklusanalyse (Auswahl)

Anwendung		Kennzahlen
Längsdynamik-simulation	Fahrzeugparameter	Fahrwiderstandsparameter und Bordnetzlast
	Gewichtsmodell	Fahrzeuggesamtgewicht (ohne Antrieb), spezifische Komponentengewichte, Zusatzgewichte (z.B. HV-Kabel, Versteifung)
	Komponenten	Verlustkennfelder, Grenzkennlinien, Trägheiten, spezifische (phänomenologische) Parameter
	Thermisches Modell	Ersatzmassen, Wärmekapazitäten und spezifische Wärmeübergangskoeffizienten
Energie- und Kraftstoffe	Zusammensetzung	Kraftstoff- und Energiemix
	Bereitstellung	Kennzahlen für Erzeugung und Verteilung
	Fahremissionen	Emissionskennzahlen für Kraftstoffe
Produktion und Recycling	Fahrzeug	Emissionen für das Basisfahrzeug
	Antriebskomponenten	Spezifische Emissionskennzahlen

Die Nutzungsphase wurde in der Studie auf 200.000 km mit 15.000 km pro Jahr festgelegt. Für die Energiebereitstellung wurden Kraftstoffe und elektrische Energie aus dem europäischen Mix unterstellt, und eine konventionelle Produktion innerhalb der EU. Als vergleichsweise einfach umzusetzende Maßnahme wird hier abweichend zur Basisstudie bereits der Einsatz von regenerativem Strom für die Batterie-Zellfertigung angenommen. Weitere Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen aus der Produktion der Batterien und anderer Antriebskomponenten sind Bestandteil aktueller Forschungsprojekte, können zum Zeitpunkt dieses Beitrags jedoch hinsichtlich ihrer Auswirkungen noch nicht abschließend quantifiziert werden.

Bei den nachfolgend dargestellten Fahrzeug- und Antriebskonzepten, wie auch der Zusammensetzung der Energiekette handelt es sich um beispielhafte Annahmen. Sie lassen zwar Rückschlüsse auf die grundlegenden Zusammenhänge und Abhängigkeiten zu, es handelt sich aber ausdrücklich weder um einen Ausblick auf zukünftige Serienprojekte, noch spiegeln die Szenarien eine allgemeine Sichtweise der Volkswagen AG wider.

3. Ausgewählte Antriebe und Energieszenario

Die Basisstudie umfasst diverse konventionelle und elektrifizierte Antriebe für die aktuelle Technologiegeneration und die Prognose 2030. Um gezielt auf unterschiedliche Einflüsse einzugehen, wird im Rahmen dieses Beitrags eine Auswahl getroffen. So konzentrieren sich die nachfolgenden Betrachtungen zunächst auf einen dieselmotorischen Antrieb, ein reines Elektrofahrzeug und ein Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug aus dem prognostizierten Serienhorizont 2030, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Der Dieselmotor ist aus heutiger Sicht auch zukünftig der effizienteste Verbrennungsmotor mit der höchsten Gesamtreichweite. Dem allgemeinen technologischen Trend folgend wird für den dieselmotorischen Antrieb 2030 (DIESEL) eine 48V-Hybridisierung angenommen. Um mit den eingeschränkten elektrischen Leistungen dieser Spannungslage auch hohe Antriebwirkungsgrade zu erreichen, wird der Antrieb als P2-Vollhybrid ausgeführt.

Für das batterieelektrische Fahrzeug (BEV) wird eine evolutionäre Weiterentwicklung prognostiziert. Auch in 2030 werden Li-Ionen Batterien im Volumen erwartet, mit einer Erhöhung der Energiedichte im Wesentlichen durch den Einsatz von NMC 8-1-1 Kathoden.

Das Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) verfügt, wie auch das BEV, über eine permanenterregte Synchronmaschine und ein Eingang-Getriebe. In der Ausführung als Vollhybrid wird das Brennstoffzellensystem durch eine Hybridbatterie und einen brennstoffzellenseitigen DCDC-Wandler ergänzt.

Eine Übersicht der drei Antriebsstränge sowie der resultierenden Fahrzeugeigenschaften ist in Bild 3 zu finden. Außerdem sind darin jeweils unter der Annahme 100 % konventioneller und 100 % erneuerbarer Energiebereitstellung die CO₂-Emissionen pro Kilometer für einen 200.000 km langen Lebenszyklus im WLTC-Szenario dargestellt.

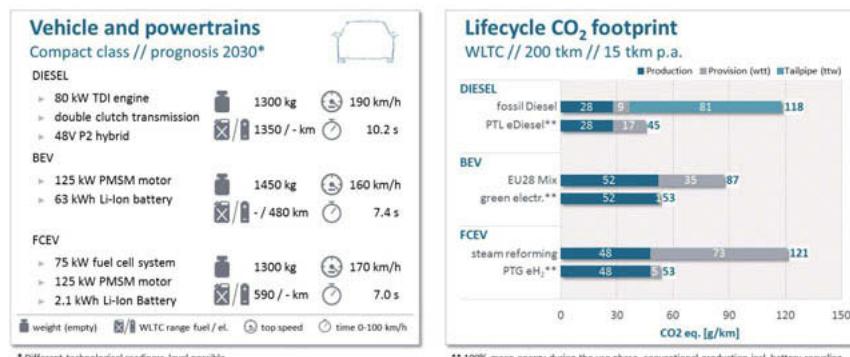


Bild 3: Ausgewählte Antriebe – Fahrzeugeigenschaften und CO₂-Bilanz

Aus der Darstellung geht deutlich hervor, wie sich mit dem Einsatz verschiedener Antriebe unterschiedliche Ausprägungen der Gesamtfahrzeugeigenschaften ergeben. Wie sich eine Variation dieser Fahrzeugeigenschaften auf die Lebenszyklus CO₂-Emissionen auswirkt, wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

Ein weiterer aus Bild 3 ersichtlicher Aspekt ist der deutliche Einfluss der Energievorkette auf die Gesamtemissionen. Im Falle konventioneller Energiebereitstellung erzielt das BEV in der Kompaktklasse trotz eines gegenüber dem Dieselfahrzeug nahezu doppelten Betrags aus der Produktion die geringsten CO₂-Emissionen über 200.000 km. Neben dem geringen Sekundärenergiebedarf des BEV profitiert dieses auch im konventionellen Pfad vom zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien im Stromnetz. Wird vollständig erneuerbare Energie für alle Antriebe unterstellt, so liegen die Ergebnisse sehr nahe beieinander und der Dieselantrieb weist die geringsten Gesamtemissionen auf.

Ein solches Hundertprozent Szenario in 2030 ist aufgrund der unterschiedlichen Primärenergiewirkungsgrade, Preisstrukturen und auch geographischer und politischer Gegebenheiten aus heutiger Sicht jedoch wenig realistisch. Mit Blick auf steigenden CO₂-Druck und technische Fortschritte, vor allem aber auch durch abnehmende Anteile konventioneller Antriebe am Gesamtmarkt, wird der Anteil erneuerbarer Energien pro Fahrzeug jedoch wahrscheinlich zunehmen. Die nachfolgenden Betrachtungen basieren auf dem in Bild 4 dargestellten Energieszenario, welches diese Tendenzen qualitativ berücksichtigt. Dieses Szenario basiert im Wesentlichen auf Erkenntnissen aus Expertengesprächen sowie einer Studie der Deutschen Energie-Agentur GmbH [3].

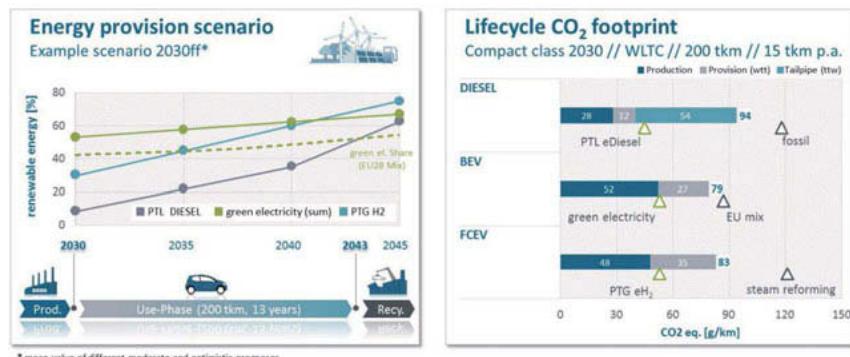


Bild 4: Energieszenario und resultierende Lebenszyklus CO₂-Emissionen

Wie in Bild 4 ersichtlich ist, unterstellt das hier gewählte Energieszenario eine deutliche Zunahme des Anteils erneuerbarer Energien in der Vorkette aller betrachteten Antriebe.

Das batterieelektrische Fahrzeug profitiert bereits von den erneuerbaren Energien im Netz, wie die gestrichelte Linie andeutet. Darüber hinaus werden solche Fahrzeuge zukünftig wahrscheinlich auch über private Photovoltaik-Anlagen geladen, oder sogar direkt vom Fahrzeughersteller mit einem Kontingent erneuerbarer Energie verkauft. Wie die hohen CO₂-Emissionen für erdgasdampfreformierten Wasserstoff zeigen, wird erneuerbarer Wasserstoff eine wichtige Voraussetzung für eine H₂-Mobilität sein. In dem hier gewählten Szenario wird das Erreichen einer erneuerbaren Wasserstoffversorgung in 2050 prognostiziert. Die Herstellung von erneuerbarem (PTL) Diesel ist zwar mit einem schlechten Primärenergiewirkungsgrad und damit auch hohen Kosten verbunden. Die hier dennoch gewählte Zunahme begründet sich wie schon angedeutet in einem zunehmenden CO₂-Druck mit Blick auf 2050, einer starken Abnahme des Dieselanteils an der Gesamtflotte und der Attraktivität eines Business-Case für Staaten mit hohem Primärenergieangebot.

Alle weiteren Betrachtungen in diesem Beitrag beruhen auf diesem hier beispielhaft skizzierten Energieszenario und den daraus resultierenden, spezifischen CO₂-Emissionen in der Kraftstoffvorkette inklusive Distribution und während der Fahrt.

4. Variation der Fahrzeugeigenschaften

Aus den bisher dargestellten CO₂-Emissionen über dem Fahrzeuglebenszyklus ließe sich im Grunde genommen ein sinnvoller Technologiepfad zur Erreichung der Ziele des Pariser Abkommens ableiten. Letzten Endes wird aber der reale Marktanteil von Fahrzeug- und Antriebskonzepten durch die Kaufentscheidung des Endkunden bestimmt. Diese Entscheidung ist jedoch nicht bzw. nicht ausschließlich von den Emissionen abhängig, sondern insbesondere auch von den erlebbaren Gesamtfahrzeugeigenschaften wie etwa Reichweite, Performance und Kosten. Damit CO₂-arme Konzepte die Zielsetzungen aus langfristigen Absatzplanungen erfüllen, müssen diese auch aus Kundensicht attraktiv bleiben. Im Folgenden wird deshalb auf die Sensitivität der CO₂-Emissionen gegenüber den Gesamtfahrzeugeigenschaften eingegangen. Aufgrund der starken Wechselwirkungen zwischen Antrieb und Fahrzeug werden hier ergänzend zur bisher fokussierten Kompaktklasse jeweils ein SUV aus der Kompakt- und der Oberklasse betrachtet.

Als eine wesentliche, kundenrelevante Fahrzeugeigenschaften wird nachfolgend der Einfluss der Reichweite auf die CO₂-Emissionen diskutiert. Da lange Reichweiten vor Kunde insbesondere auf der Autobahn von Interesse sind, wird als Fahrprofil der Autobahnzyklus aus den Artemis-Zyklen [4] verwendet.

Die Skalierung der Reichweite erfolgt über eine Variation der Größe des Energiespeichers, also der Tanks beim Diesel- und Brennstoffzellenfahrzeug und der Traktionsbatterie beim batterieelektrischen Fahrzeug. Aufgrund der unterschiedlichen Energiedichten der Speicher ergibt sich ein antriebsspezifischer Einfluss auf der Fahrzeuggewicht. Zusätzlich skaliert bei festgelegter Zelle bzw. P/E-Verhältnis mit der Batterie auch die für das BEV verfügbare elektrische Quellenleistung, wodurch aktuelle batterieelektrische Fahrzeuge mit hoher Reichweite auch zumeist hohe Antriebsleistungen aufweisen. Mit Blick auf die Vergleichbarkeit der Reichweitenaussage wird nachfolgend die Beschleunigungszeit von Null auf 100 km/h für alle Fahrzeug- und Antriebskonzepte bei 8 Sekunden konstant gehalten, und der jeweilige Masseneinfluss durch eine Skalierung der Antriebsleistung kompensiert.

Neben den Wechselwirkungen der Fahrzeugeigenschaften sind der technischen Darstellbarkeit dieser Eigenschaften fahrzeug- und antriebsspezifische Grenzen hinsichtlich Volumen und Masse gesetzt. Damit können beispielweise nicht beliebig große Batterien eingesetzt werden. Diese Limitierungen werden nachfolgend jedoch vernachlässigt.



Bild 5: CO₂-Bilanzen in Abhängigkeit von Autobahnreichweite und Fahrzeugsegment

Bild 5 zeigt die fahrzeug- und antriebsspezifischen Sensitivitäten der CO₂-Gesamtemissionen gegenüber der Autobahnreichweite. Daran wird deutlich, dass ein batterieelektrisches Fahrzeug die größte Sensitivität aufweist, während die Reichweite des Dieselfahrzeugs nahezu ohne CO₂-Einfluss variiert werden kann. Es ergeben sich für alle Fahrzeugklassen große Bereiche, in denen ein Brennstoffzellenantrieb in dem gewählten Energieszenario (vgl. Bild 4) und bei gleicher Reichweite zu den anderen Konzepten für die lange Strecke CO₂-optimal wäre. Der Übergangsbereich zwischen BEV und FCEV wird im Wesentlichen durch die Fahrwiderstände und die Dimensionierung der Komponenten bestimmt. Mit zunehmenden Fahrwiderständen steigt der CO₂-Anteil aus der Batteriefertigung stark an, so dass für ein Kompaktklasse-SUV rein aus CO₂-Sicht hier bereits oberhalb von 300 km Autobahnreichweite ein Brennstoffzellenantrieb zu bevorzugen wäre.

Beim Oberklasse-SUV verschiebt sich dieser Schnittpunkt wieder zu leicht höheren Reichweiten, da das Brennstoffzellensystem häufiger in spezifisch höheren Betriebspunkten arbeiten muss, was mit Wirkungsgradnachteilen einhergeht. Trotz der Hybridisierung ist der Dieselantrieb für alle Fahrzeugsegmente erst oberhalb von 1000 km eine CO₂-optimale Antriebsalternative. Die Ausführung als Plug-In Hybrid würde die Emissionen des Diesels auf das Niveaus der anderen Antriebe senken. Die damit verbundenen Anschaffungsmehrkosten verdeutlichen aber nochmals das Spannungsfeld zwischen Emissionen und Gesamtfahrzeugeigenschaften für den Kunden. Ferner ist natürlich bei der Auswahl des Fahrzeug- und Antriebskonzepts immer die Gesamtheit der Fahrzeug-eigenschaften zu vergleichen, so dass z.B. nicht zwingend wie in dieser einfachen Betrachtung Varianten mit identischer gegenübergestellt werden müssen.

In wieweit die hier getroffenen Aussagen auch für gemischte Szenarien mit Stadt-, Land- und Autobahnfahrten gelten, ist Gegenstand des folgenden Abschnitts.

5. Auswirkung von Nutzungsprofilen und Klimazone

Die Einführung des WLTP stellt einen Schritt dar, die vielfach diskutierte Diskrepanz zwischen Fahrzeug-Normverbräuchen und den realen Verbräuchen zu verringern. Dennoch wird sich in Kundenhand immer eine Verbrauchsbandbreite ergeben, die aufgrund der Dynamik individueller Fahrprofile und dem Zusatzverbrauch von Komfortverbrauchern wie etwa der Klimatisierung in der Regel oberhalb des Normverbrauchs liegt. Nachfolgend werden die Einflüsse verschiedener Nutzungsszenarien sowie der Klimazone auf die CO₂-Bilanzen der unterschiedlichen Antriebe dargestellt.

Exemplarisch werden hierfür die Nutzungsszenarien „Pendler“, „Vertreter“ und „Zweitwagen“ unterschieden. Bild 6 gibt eine Übersicht über die jeweiligen Streckenverteilungen und Jahresfahrleistungen.



Bild 6: Ausgewählte Nutzungsszenarien

Den einzelnen Szenarien liegen Jahresfahrprofile zugrunde, die mittels statistischer Methoden aus den Ergebnissen der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ [5] abgeleitet sind. Hierbei wird pro Szenario jeweils ein Profil beispielhaft ausgewählt, um die Einflüsse auf die CO₂-Bilanzen darzustellen. Unter statistischen Gesichtspunkten sind diese Profile jedoch ausdrücklich nicht repräsentativ für einen gesamten Anwendungsfall bzw. eine Kundengruppe.

Neben den Jahresfahrprofilen, die sich in der Verteilung und Anzahl der einzelnen Fahrten sowie der Jahresfahrlistung stark unterscheiden, wird für die einzelnen Szenarien auch ein unterschiedliches Ladeverhalten angenommen. Neben den genannten regelmäßigen Ladepunkten wird das Fahrzeug auch unterwegs geladen, wenn der Ladezustand am Fahrtende 20 % unterschreitet oder während der Fahrt nicht mehr genügend Energie zur Erreichung des Ziels zur Verfügung steht.

Insbesondere in Verbindung mit batterieelektrischen Fahrzeugen wird häufig der Reichweiteinfluss der Klimatisierung und die damit verbundene Abnahme der Realreichweite bei tiefen Temperaturen diskutiert. Um auch diesen Effekt der realen Fahrzeugnutzung zu berücksichtigen, werden nachfolgend mit den Klimareferenzjahren in Berlin, Sevilla und Bergen [6] drei europäische Klimafälle unterschieden. Bild 7 gibt einen Überblick über die Jahrestemperaturverteilungen.



Bild 7: Ausgewählte europäische Klima-Referenzjahre

In Bild 8 sind zunächst die CO₂-Bilanzen für die verschiedenen Nutzungsszenarien dargestellt, unter Annahme der Jahrestemperaturverteilung in Berlin. Der hier gewählte Ansatz generiert für jede Einzelfahrt einen repräsentativen Fahrzyklus, dessen Gesamtlänge und Durchschnittsgeschwindigkeit der Vorgabe aus den Jahresfahrprofilen entspricht.

Somit enthält das hier dargestellte Ergebnis auch die antriebsspezifischen Verbrauchseinflüsse von Fahrzyklus (Beschleunigungen und Geschwindigkeiten) und Klimatisierung. Wie auch in den anderen Bilanz-Diagrammen sind die Emissionen pro Kilometer gezeigt. Die Gesamtfahrleistungen sind auf 13 Jahre hochgerechnet und unterscheiden sich von den 200.000 km aus der Basisstudie. Diese Annahme dient der Veranschaulichung der Effekte unterschiedlicher Nutzungsszenarien in diesem Beitrag, bildet die Komplexität realer Fahrzeugnutzungszyklen, z.B. mit mehr als einem Besitzer bzw. Anwendungsfall damit aber nur eingeschränkt ab.



Bild 8: CO₂-Bilanzen der Nutzungsszenarien im Klimareferenzjahr Berlin

Für den Pendler und den Vertreter zeigen sich für den Diesel und das BEV geringe Emissionen pro Kilometer als im 200.000 km WLTC-Szenario. Beim Brennstoffzellenfahrzeug ergibt sich ein ähnlicher Wert für den Pendler und ein leicht höherer für das Vertreter-Profil. Die Sekundärenergie-Bedarfe sind in allen Fällen höher als im WLTC, durch die höhere Laufleistung fallen jedoch die Emissionen aus der Produktion weniger stark ins Gewicht. Beim BEV dominiert letztgenannter Effekt. Für Diesel- und Brennstoffzellenfahrzeug zeigen sich zudem die Auswirkungen realitätsnäher, hochlastiger Fahrzyklen auf die Sekundärenergiebedarfe. Während der Wirkungsgrad des Dieselmotors mit zunehmender Dynamik steigt, nimmt er beim Brennstoffzellensystem ab. Für den Fall des Zweitwagens mit geringer Laufleistung dominieren die Emissionen aus der Produktion, was sich insbesondere bei den stark elektrifizierten Antrieben zeigt. In diesem Szenario erzielt der Diesel trotz deutlich höheren Sekundärenergiebedarfs im Kurzstreckenbetrieb ein ähnliches Niveau wie der batterieelektrische Antrieb und geringere Gesamtemissionen als der Brennstoffzellenantrieb.

Da sich Fahrzeugkaltstart und –klimatisierung am stärksten im Kurzstreckenbetrieb auswirken, werden im nächsten Schritt anhand des Zweitfahrzeug-Szenarios die Abhängigkeiten von der Klimazone dargestellt.



Bild 9: CO₂-Bilanzen des Zweitwagens in unterschiedlichen Klimazonen

Bild 9 zeigt die CO₂-Bilanzen für die gewählten europäischen Klimazonen. Der Querbalken stellt ergänzend jeweils den Betrieb bei konstanter Außentemperatur von 25 °C ohne Klimatisierung dar. Im Mittel über das gesamte Klimajahr zeigt sich insgesamt ein recht geringer Einfluss, die stark abnehmenden Reichweiten bei tiefen Temperaturen bleiben für einzelne Trips im Winter jedoch ein Nachteil mit Blick auf die kundenerlebbaren Eigenschaften. Der Betrieb mit überwiegendem Heizbedarf in Norwegen geht in der Betrachtung mit den höchsten Gesamtemissionen einher. Aufgrund kalter Thermodynamik und Reibung zeigt der Diesel-Antrieb hier trotz der vorhandenen Abwärme den höchsten CO₂-Anstieg.

Zusammenfassend gilt für die Betrachtung der Anwendungsfälle, dass ein batterieelektrisches Fahrzeug aus CO₂-Sicht insbesondere bei von einer hohen Gesamtaufleistung gegenüber dem Diesel- und Brennstoffzellenfahrzeug profitiert. In den gemischten Betriebsszenarien weist der Brennstoffzellenantrieb die größten spezifischen Abweichungen gegenüber dem WLTC-Szenario auf, während die Gesamtemissionen des Dieselantriebs sich pro Kilometer als sehr robust gegenüber dem Anwendungsfall zeigen. Die Abhängigkeit von der Klimatisierung spielt im Mittel in Europa eine eher untergeordnete Rolle. Der dargestellte große Einfluss der Produktionsemissionen bei Szenarien mit geringer Gesamtfahrleistung unterstreicht den Bedarf, auch in diesem Bereich insbesondere bei stark elektrifizierten Antrieben Reduktionsmaßnahmen zu ergreifen.

Abschließend ist anzumerken, dass das hier skizzierte Bild eine reine CO₂-Betrachtung darstellt. Die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Szenarien hängt insbesondere an deren Attraktivität aus Kundensicht, u.a. bestimmt durch Gesamtkosten, Infrastruktur, politische Entwicklungen und Gesamtfahrzeugeigenschaften.

6. Einfluss des Batterieenergieinhalts

Heutzutage sind die batterieelektrischen Reichweiten von reinen Elektrofahrzeugen und auch Plug-In Hybriden zum Teil stark eingeschränkt, und die Ladeinfrastruktur befindet sich noch im Aufbau. Unter anderem deshalb ist die darstellbare Reichweite ein starkes Wettbewerbskriterium. Eine größtmögliche Batterie geht jedoch mit hohem Fahrzeuggewicht, höheren Verbräuchen und CO₂-Emissionen aus der Produktion sowie hohen Kosten für den Kunden einher, so dass sich zukünftig die Fragestellung nach einer anwendungsfallabhängigen sinnvollen Batteriegröße stellen wird. Aus den verschiedenen damit verbundenen Zielkonflikten sollen hier exemplarisch die CO₂-Emissionen und der Kundenkomfort adressiert werden. Für das batterieelektrische Fahrzeug wird als quantifizierbare Komfortgröße die Gesamtzeit von Ladevorgängen außerhalb der regelmäßigen Ladeplätze wie etwa zu Hause gewählt. Für einen Plug-In Hybrid ergibt sich das Problem externer Ladung in der Regel nicht, so dass in diesem Fall der Anteil rein elektrischer Fahrten bezogen auf die Gesamtanzahl betrachtet wird.

Insbesondere wenn die Fahrzeughersteller sich auf eine bestimmte Zellchemie konzentrieren, was aus Kostensicht sicherlich die richtige Wahl ist, lässt sich der Batterieenergieinhalt nicht losgelöst von der angebotenen Quellenleistung für die elektrischen Fahreigenschaften und der Spannungslage des Batteriesystems betrachten. Aus diesem Grund werden nachfolgend auch diese beiden Kriterien berücksichtigt. Als kleinstmögliche Nennspannung wird 280 V festgelegt, und das Batteriesystem soll dauerhaft ausreichend Leistung für eine konstante Fahrt in der Ebene mit 130 km/h bereitstellen.

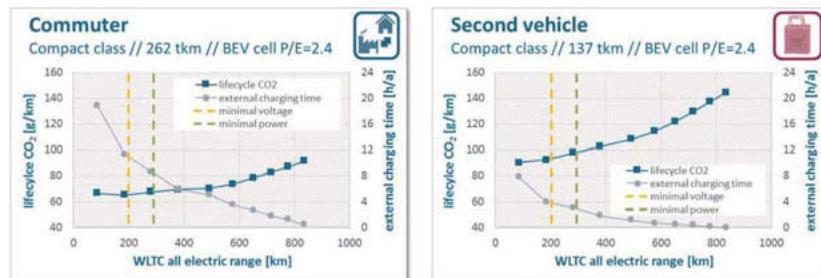


Bild 10: CO₂ Emissionen und externe Ladezeiten beim BEV

In Bild 10 sind zunächst die Resultate für ein batterieelektrisches Fahrzeug im Pendler- und Zweitwagenszenario dargestellt. Das Vertreterprofil weist insgesamt sehr hohe Reichweitenbedarfe auf und lässt sich hinsichtlich des regelmäßigen Ladeverhaltens schwer beschreiben, so dass dieses hier nicht weiter berücksichtigt wird.

Wie die gestrichelten Linien für Mindestspannung und Mindestleistung zeigen, ermöglicht das kleinstmögliche Batteriesystem mit den hier prognostizierten Hochenergiezellen eine WLTC Reichweite von etwa 300 km. Dieser Punkt ist für beide Szenarien gleich und markiert jeweils die minimalen CO₂-Emissionen bei geringstem Ladekomfort. Beim Pendlerfahrzeug (links) sind dann immerhin 10 Stunden pro Jahr an externen Ladepunkten zu verbringen. Hier zeigt sich bis etwa 600 km nur ein geringer Anstieg der CO₂-Emissionen, aber eine Halbierung der Wartezeit. Aus Kundensicht wäre hier also in dieser einfachen zweidimensionalen Betrachtung eine größere Batterie zu bevorzugen. Für den Zweitwagen (rechts) zeigt sich ein etwas anderes Bild. Die minimale Batterie erfordert eine externe Ladezeit von 4 Stunden pro Jahr, und eine Batterievergrößerung geht mit deutlich zunehmenden Gesamtemissionen einher. Hier wäre also eine kleine Batterie zu bevorzugen.

Diese Aussagen vernachlässigen natürlich weitere Kriterien, wie etwa die kundenrelevanten Kosten für einen Komfortgewinn, unterschiedliche Ladeverhalten und –präferenzen und ggf. technische Restriktionen.

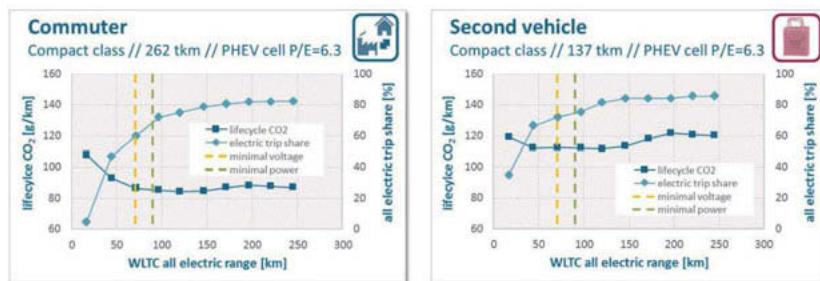


Bild 11: CO₂-Emissionen und elektrische Fahranteile beim Plug-In Hybrid

Bild 11 zeigt über der elektrischen Reichweite die Gesamt CO₂-Emissionen für einen beispielhaften Plug-In Hybriden. Die Spannungs- und Leistungsgrenzen zeigen, dass die unter diesen Kriterien minimal darstellbare elektrische Reichweite im WLTC etwa 90 km beträgt. Hiermit lassen sich für beide betrachteten Fälle im Mittel 70 % aller Fahrten rein elektrisch abdecken. Hinsichtlich der CO₂-Emissionen zeigen sich deutliche Minima als Optimum zwischen den Emissionen aus der Batterieproduktion und einem möglichst hohen rein elektrischen Fahranteil und damit geringere spezifische Emissionen aus der Energieversorgung. Obwohl sich beide Nutzungsszenarien in den mittleren Streckenlängen zwischen zwei festen Ladepunkten sowie in der Gesamtfahrleistung stark unterscheiden, ergibt sich in beiden Fällen ein Auslegungsoptimum bei etwa 120 km WLTC Reichweite.

7. Zusammenfassung

Die Elektrifizierung von Fahrzeugantrieben ist ein wesentlicher Schritt zur Reduzierung der CO₂-Emissionen des Verkehrssektors. Auf absehbare Zeit werden jedoch weiterhin auch für rein batterieelektrische Antriebe Emissionsquellen im gesamten Fahrzeuglebenszyklus zu verzeichnen sein.

Die Ergebnisse in diesem Beitrag zeigen, dass der Anwendungsfall vor Kunde darüber entscheidet, welches Fahrzeug- und Antriebskonzept das Optimum aus CO₂-Sicht darstellt. Während die Fahrzeugklimatisierung in verschiedenen europäischen Klimaregionen im Jahresmittel hierbei eine untergeordnete Rolle spielt, besteht eine starke Abhängigkeit von den kundenindividuellen Laufleistungen und Fahrprofilen. Von entscheidender Bedeutung sind außerdem die Fahrzeug- und Antriebsdimensionierung, insbesondere die Auslegung der Batterie sowie die der Anteil erneuerbarer Energien in den jeweiligen Vorketten.

Die Lebenszyklus CO₂-Emissionen und deren Reduzierungsmaßnahmen sind jedoch nicht losgelöst von den kundenerlebbaren Fahrzeugeigenschaften zu diskutieren, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Attraktivität der Fahrzeuge und deren möglicher Marktdurchdringung haben werden.

Neben den rein batterieelektrischen Antrieben sind aus heutiger Sicht auch zukünftig Brennstoffzellen- und stark elektrifizierte Verbrennungsmotorantriebe zu berücksichtigen und das optimale Fahrzeug- und Antriebskonzept anwendungsspezifisch nach ökologischen, ökonomischen, und kunderelevanten Aspekten auszuwählen.

Literatur

- [1] International Organization for Standardization: ISO 14040, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework, 2. Aufl. Genf: International Organization for Standardization
- [2] European Commission Regulation (EU) 2017/1151, 06/2017
- [3] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): The potential of electricity based fuels for low-emission transport in the EU, 11/2017
- [4] André, M.: The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions, Science of the Total Environment, 2004, Seiten 73-84
- [5] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Verkehrsforschung, Mobilität in Deutschland 2008, Bonn und Berlin, Februar 2010
- [6] EQUA Simulation AB: Climate Data Download Center,
<http://www.equaonline.com/ice4user/indexIWEC.html>, aufgerufen am 25.09.2018

Prädiktion der Lebensdauer von Traktionsbatteriesystemen für reale Nutzungsszenarien

Martin Ufert, Technische Universität Dresden,
Professur für Fahrzeugmechatronik;
Andy Batzdorf, Lutz Morawietz, IAM GmbH, Dresden

Kurzfassung

Die Lebensdauer von Traktionsbatteriesystemen stellt ein wesentliches Merkmal der Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen dar. Im vorliegenden Beitrag wird ein Modell zur Prädiktion der Lebensdauer von Li-Ionen-Hochvolt-Traktionsbatteriesystemen vorgesellt. Die Bedeutung des Modells basiert auf lehrstuhleigenen Labormessungen. Das Modell kann sowohl auf gemessene Lastzyklen realer Systeme als auch auf simulierte Lastverläufe angewendet werden. Die Lastzyklen werden zunächst in einer Zyklusanalyse aufbereitet und in alterungs-äquivalente Teilzyklen zerlegt, für welche anschließend eine prozentuale Schädigung berechnet wird. Die Gesamtschädigung eines betrachteten Lastzyklus ergibt sich mittels linearer Schadensakkumulation.

Es werden die typischen Alterungsphänomene Kapazitätsverlust und Innenwiderstandsanstieg betrachtet. Die Phänomene können mittels linearer Funktionen approximiert werden. Für die Modellierung des Alterungsverhaltens werden sog. Schädigungsfaktoren ermittelt, welche einen separierten Einfluss der in diesem Modell berücksichtigten Einflussfaktoren auf den Alterungsprozess anzeigen. Als wesentliche Einflussfaktoren werden die Temperatur, der SOC-Hub, der mittlere SOC sowie die C-Rate betrachtet.

Die grundlegende Funktionalität des entwickelten Alterungsmodells wird anhand zweier Validierungsmessungen nachgewiesen.

1 Einleitung

Die Lebensdauer der Hochvolt-Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten des Fahrzeugs. Eine detaillierte Kenntnis über die zu erwartende Lebensdauer über der Fahrzeugnutzungsdauer ist deshalb von besonderer Wichtigkeit. Die Motivation zur Prognose der Batterielebensdauer gründet auf dem Forschungsprojekt „Elektrobus-Linie 79 – Fahrzeug mit konduktivem Ladesystem“, welches von 2013 – 2016 am Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik der TU Dresden bearbeitet wurde [1] [2]. Eines der Ziele dieses Projektes war die Untersuchung zu Auswirkungen hoher Ladeleistungen auf die Lebensdauer der Traktionsbatterie. Im Rahmen des Projektes wurde eine umfangreiche Labormesskampagne gestartet, in welcher eine Vielzahl einzelner Batteriezellen sog. beschleunigten Alterungsdauertests unterzogen wurde. Die Dauer der Messkampagne betrug ca. 2,5 Jahre. Des Weiteren wurde im Rahmen des Projektes ein 12m Elektrobus implementiert, welcher seit Mitte 2015 im regulären Fahrgastbetrieb täglich eingesetzt wird und bisher über 90.000 km Laufleistung aufweist. Das Fahrzeug wurde derart mit Messtechnik ausgestattet, dass die Einsatzbedingungen und -belastungen permanent aufgezeichnet werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse zur Belastung der Traktionsbatterie eines Elektrobusses im realen Betrieb wurden bei der Planung der Messkampagne entsprechend berücksichtigt. Im aktuellen Forschungsprojekt „Innovationen für eine nachhaltige Mobilität – EKE-ÖPNV: Energie- und kosteneffiziente Elektrifizierung von ÖPNV-Flotten“ [3] [4] werden die Alterungsuntersuchungen fortgesetzt.

Das im vorliegenden Beitrag beschriebene Alterungsmodell ermöglicht es, die typischen Alterungssphänomene von Hochvolt-Li-Ionen-Traktionsbatterien unter realen Einsatzbedingungen zu bestimmen. Das beschriebene Modell kann dabei sowohl für Prognoserechnungen während der Fahrzeugentwicklung als auch für Nachweisrechnungen bestehender Fahrzeuge verwendet werden.

2 Lebensdauerbestimmung von Li-Ionen Batterien – Grundlagen, Daten-generierung, Workflow

Die Alterung von Li-Ionen Batterien ist in ständig ablaufenden chemischen Prozessen innerhalb der Zellen begründet, welche an dieser Stelle nicht behandelt werden sollen.

Vielmehr werden im folgenden Ursache und Wirkung verschiedener äußerer Einflüsse auf die messbaren Alterungsphänomene beschrieben und erläutert.

2.1 Allgemeines

Grundsätzlich existieren zwei verschiedene Phänomene, welche typischer Weise zur Beurteilung der Batteriealterung herangezogen werden. Zum einen sinkt die nutzbare Kapazität der Zellen im Laufe der Zeit, wodurch eine geringere Menge an der Zelle entnehmbarer Energie zur Verfügung steht. Bei Elektrofahrzeugen wirkt sich dies vor allem als reduzierte Reichweite aus. Zum anderen steigt der Innenwiderstand der einzelnen Zellen an. Dadurch verliert die gesamte Batterie an Leistungsfähigkeit. Dies wirkt sich derart aus, dass hohe Fahrleistungen u.U. nicht mehr realisierbar sind (vermindertes Beschleunigungsvermögen und reduzierte Höchstgeschwindigkeit) sowie hohe Ladeleistungen nicht mehr erreicht werden können (längere Ladezeiten für gleiche Energiemengen).

Per Definition erreicht eine Li-Ionen Batterie ihr Lebensdauerende (EoL – End of Life), wenn mindestens eines der beiden folgenden Kriterien erfüllt ist.

- Verdopplung des Zellinnenwiderstands (auf 200%), oder
- Reduzierung der nutzbaren Kapazität auf 80% der Nennkapazität.

Grundsätzlich gilt, dass die Zellen bei Erreichen dieser Kriterien nicht physisch defekt sind, sondern noch weiter verwendet werden können. Jedoch ist allgemein davon auszugehen, dass diese dann nicht mehr den hohen Leistungsanforderungen im Automotive Bereich genügen und entsprechend auszutauschen sind. Einer Weiterverwendung in Second Life Anwendungen (z.B. als stationäre Speicher) ist jedoch in vielen Fällen möglich [5].

Die Alterung von Li-Ionen Batterien ist ein kontinuierlich voran schreitender Prozess, welcher in zwei Anteile unterteilt werden kann:

- Kalendarische Alterung (bei unbelasteter Batterie), und
- Zyklische Alterung (bei belasteter Batterie).

Eine Li-Ionen Batterie altert auch, wenn sie nicht in Betrieb ist (z.B. während der Fahrzeugabstellung). Dieser Anteil des Alterungsprozess beginnt streng genommen direkt nach dem Ende der Zellproduktion. Diese sogenannte kalendarische Alterung ist eine Funktion

in Abhängigkeit der Zeit. Gemäß dem derzeitigen Stand der Technik können zwei wesentliche Einflussfaktoren auf den kalendarischen Alterungsprozess definiert werden:

- **Lagerungstemperatur**, und
- Prozentualer Ladezustand der Zelle während der Lagerung (**SOC** – State of Charge).

Die zyklische Alterung ist eine Funktion in Abhängigkeit des Ladungsdurchsatzes der Batterie, welcher in Amperestunden (Ah) angegeben wird. Die zyklische Alterung beschreibt demnach den Alterungsprozess aufgrund der Verwendung der Batterie (Fahren und Laden). Gemäß des derzeitigen Standes der Technik können vier wesentliche Einflussfaktoren auf den zyklischen Alterungsprozess definiert werden:

- **Batterietemperatur** während des Betriebs,
- Obere und untere Grenze des Ladezustands zu Beginn und Ende eines Lastzyklus (**SOC-Hub** bzw. **ΔSOC**)
- Höhe des Batteriestroms (**C-Rate**), und
- Mittlerer Ladezustand der Batterie (**SOC**) während eines Zyklus.

Bild 1 fasst die wesentlichen Aussagen des Kapitels zusammen.



Bild 1: Übersicht Alterung von Li-Ionen Traktionsbatterien

Das am Lehrstuhl Fahrzeugmechatronik der TU Dresden entwickelte Alterungsmodell ist derart aufgebaut, dass ein Einsatz sowohl in der Prädiktion neuer Systeme und Fahrzeuge

(Entwicklungsprozess) als auch in der Nachweisrechnung bestehender Systeme und Fahrzeuge möglich ist. Dafür wurde ein modulares Framework mit einheitlichen Schnittstellen sowie fest definierten Eingangs- und Ausgangsparametern gewählt. Somit kann das Modell als Stand-alone Anwendung genutzt oder als Sub-Modul in ein bestehendes Simulationsmodell integriert werden und ist sowohl für Messwerte (Nachweisrechnungen) als auch für Simulationswerte (Prädiktionsrechnungen) verwendbar.

2.2 Möglichkeiten der Alterungsbestimmung

In Bild 2 sind zwei verschiedene Möglichkeiten skizziert, wie die Alterung einer Batterie bestimmt werden kann. Zum einen besteht die Möglichkeit, Messungen am realen System durchzuführen und anschließend die Belastungen auszuwerten sowie die resultierende Alterung zu messen (Bild 2 links). Eine eindeutige Zuordnung einzelner Einflussgrößen auf die Alterung ist dabei aufgrund der großen Streuung der Belastungskenngrößen im realen Betrieb (klimatische Bedingungen, dynamische Leistungsanforderungen, etc.) nur bedingt möglich. Des Weiteren ist bei dieser Form der Alterungsbestimmung mit sehr langen Messzeiten zu rechnen, da sich diese über mehrere Jahre erstrecken, beispielsweise 5-10 Jahre im Anwendungsfall eines Linienbusses.



Bild 2: Möglichkeiten zur Generierung von Daten für das Alterungsmodell

Die genannten Schwierigkeiten können mittels beschleunigter Alterungstests umgangen werden (Bild 2 rechts). Dabei werden einzelne Batteriezellen unter erhöhten Belastungsbedingungen im Labor vermessen. Die Laborbedingungen ermöglichen eine Untersuchung der Alterungerscheinungen unter konstanten Rahmenbedingungen. Somit können die einzelnen Einflussfaktoren gezielt untersucht werden. Dafür werden die Zellen mit gleichbleibenden Stromprofilen beaufschlagt, welche in Amplitude und Dauer unterschiedlich gewählt werden können (Bild 3, links). Die Messungen werden dann in regelmäßigen Abständen unterbrochen, um die Zellen hinsichtlich Kapazität und Innenwiderstand zu vermessen und somit die bis zu diesem Zeitpunkt erreichte Schädigung zu bestimmen.



Bild 3: konstantes Stromprofil vs. realer Lastzyklus

Die Herausforderung besteht nun darin, die bekannte Schädigungswirkung der gleichbleibenden Stromprofile auf dynamische Stromprofile (Bild 3, rechts) im Fahrzeug anzuwenden. Es ist deutlich erkennbar, dass das Stromprofil des Fahrzeugs keine konstanten Bedingungen wie die Laborzyklen aufweist, wodurch eine direkte Anwendung nicht möglich ist. Aus diesem Grund wurde ein Workflow zur Alterungsbestimmung hergeleitet, welcher im Folgenden erläutert wird.

2.3 Workflow zur Alterungsbestimmung

Den Eingang des Workflows stellt ein realer Lastzyklus dar. Dabei kann es sich um Messwerte aus einem Fahrzeug oder um einen simulierten Lastverlauf handeln. Da die Schädigungswirkung der einzelnen Einflussfaktoren (Bild 1) jedoch nur für die synthetischen Laborzyklen bekannt ist, muss der reale Zyklus zunächst einer Zyklusanalyse unterzogen werden. Dabei wird der Lastzyklus in sog. in alterungsäquivalente Teilzyklen zerlegt. Per Modelldefinition wird davon ausgegangen, dass während dieser Teilzyklen konstante Umgebungs- und Lastbedingungen vorherrschen. Dies ermöglicht nun eine Anwendung der bekannten Schädigungswirkungen der synthetischen Laborzyklen. Für jeden Teilzyklus kann somit eine prozentuale Schädigung ermittelt werden. Per linearer Schadensakkumulation wird anschließend die Gesamtschädigung des betrachteten Lastzyklus berechnet. Für den Arbeitsschritt der Schädigungsanalyse wird ein Alterungsmodell benötigt, welches im folgenden Abschnitt beschrieben und erläutert wird. Der Workflow ist in Bild 4 grafisch dargestellt.



Bild 4: Grundlegender Workflow zur Alterungsbestimmung

3 Alterung von Li-Ionen Batterien – Modellierung und Parametrierung

Zur Bestimmung der Schädigungswirkung der einzelnen Einflussfaktoren wurde eine Messkampagne durchgeführt, welche auf einer Separierung von Effekten basiert. Dafür wurde jeweils einer der Einflussfaktoren variiert, während die übrigen Faktoren konstant gehalten wurden. Die Aufstellungen der Zusammenhänge ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Zulässigkeit dieser Modellgrundlage wurde in [6] nachgewiesen.

Tabelle 1: Messreihen zur Alterungsmodellerstellung

Temperatur	SOC	ΔSOC	C-Rate
$T_1/T_2/T_3$	konstant	konstant	konstant
konstant	$SOC_1/SOC_2/SOC_3$	konstant	konstant
konstant	konstant	$\Delta SOC_1/\Delta SOC_2/\Delta SOC_3$	konstant
konstant	konstant	konstant	$C\text{-Rate}_1/C\text{-Rate}_2/C\text{-Rate}_3$

In Bild 5 (Kapazität) und Bild 6 (Innenwiderstand) ist jeweils eine repräsentative Auswahl der Messreihen abgebildet. Aus den Bilden geht hervor, dass sowohl die Abnahme der Kapazität als auch den Anstieg des Innenwiderstands mittels linearer Funktionen approximiert werden können.

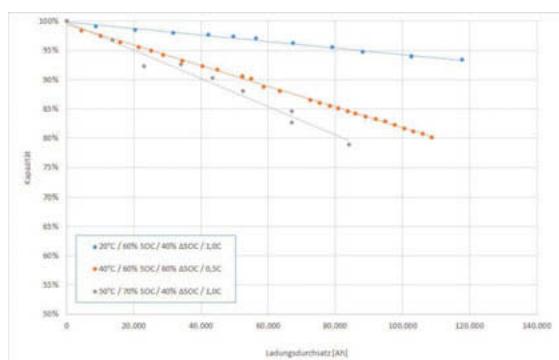


Bild 5: Beispiele für Messreihen – Abnahme Kapazität

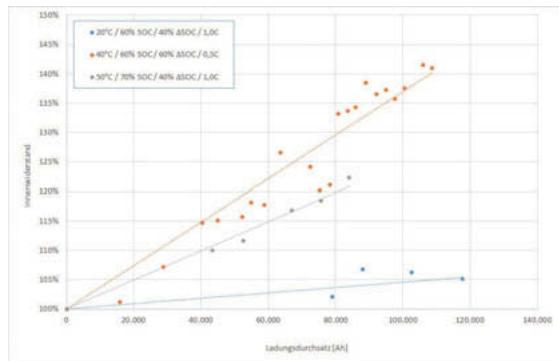


Bild 6: Beispiele für Messreihen – Anstieg Innenwiderstand

Um aus den gemessenen Alterungsverläufen ein allgemeingültiges Modell erstellen zu können, es ist notwendig, von vorhandenen (gemessenen) Parametersätzen auf beliebige Parameterkombinationen zu schließen.

3.1 Ermittlung von Schädigungsfaktoren

Da alle gemessenen Verläufe linear approximiert werden, ist es möglich, die Anstiege der Funktionen ins Verhältnis zu setzen und daraus sog. Schädigungsfaktoren zu ermitteln. Diese Faktoren können nun als Funktion der jeweiligen Betrachtungsgröße dargestellt werden. Aus einer solchen Darstellung geht hervor, in welchem Maße eine Änderung des jeweiligen Einflussfaktors den Alterungsprozess der Batterie beeinflusst.

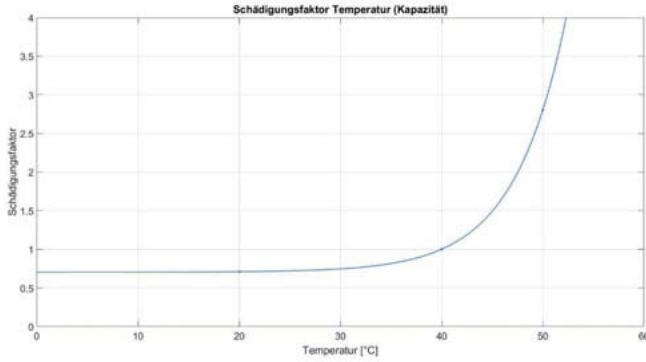


Bild 7: Ermittelte (normierte) Funktion des Schädigungsfaktors S der Temperatur (Kapazität)

In Bild 7 ist die ermittelte Funktion eines Schädigungsfaktors beispielhaft für den Einflussfaktor Temperatur (auf die Kapazität) dargestellt. Für eine bessere Übersicht wurde die Funktion normiert. Es ist deutlich erkennbar, dass die Abnahme der Kapazität exponentiell von der Temperatur abhängig ist. Derartige Schädigungsfunktionen werden nun analog für die übrigen Schädigungsfaktoren (sowohl für den Einfluss auf die Kapazität als auch auf den Innenwiderstand) ermittelt.

3.2 Alterungsmodell

Mittels der ermittelten Schädigungsfaktoren soll nun in diesem Abschnitt das Alterungsmodell hergeleitet werden. Aus Bild 5 und Bild 6 geht hervor, dass sowohl die Kapazitätsabnahme als auch der Anstieg des Innenwiderstands linear approximiert werden können. Die mathematische Grundgleichung beider Funktionen lautet somit:

$$y = m \cdot x + n$$

Bezogen auf den Anwendungsfall der Alterung ergibt sich folgender Zusammenhang.

$$C_1 = -m \cdot Q + C_0$$

Dabei sind:

- C_0 die Kapazität vor der zu betrachtenden Belastung (Ausgangskapazität),
- Q der Ladungsdurchsatz in Ah der zu betrachtenden Belastung, und
- C_1 die reduzierte Kapazität am Ende der betrachteten Belastung.

Für den Anstieg des Innenwiderstands ergibt sich analog folgende Grundgleichung.

$$R_{i1} = m \cdot Q + R_{i0}$$

Soll statt der zyklischen Alterung die kalendarische Alterung berechnet werden, so ist als unabhängige Größe anstatt des Ladungsdurchsatzes die Zeit in Tagen einzusetzen.

Der Anstieg in beiden Funktionen ist definiert als sog. Referenzanstieg. Dieser Anstieg kennzeichnet diejenige Messreihe, welche als Normierungsreihe verwendet wurde. Aus Bild 7 ist erkennbar, dass für den Schädigungsfaktor Temperatur eine Normierung auf die Stützstelle 40°C gewählt wurde.

Zur Berechnung beliebiger Parameterkonfigurationen werden nun die im vorherigen Abschnitt eingeführten Schädigungsfaktoren hinzugezogen. Diese Schädigungsfaktoren S werden mit dem jeweiligen Referenzanstieg m_{ref} multipliziert, um die Relation zum Normierungspunkt abzubilden. Damit ergeben sich folgende Modellgleichungen:

$$C_1 = -m_{\text{ref,C}} \cdot S_{\text{Temp,C}} \cdot S_{\Delta \text{SOC,C}} \cdot S_{\text{SOC,C}} \cdot S_{\text{C-Rate,C}} \cdot Q + C_0$$

$$R_{i1} = m_{\text{ref,R}} \cdot S_{\text{Temp,R}} \cdot S_{\Delta \text{SOC,R}} \cdot S_{\text{SOC,R}} \cdot S_{\text{C-Rate,R}} \cdot Q + R_{i0}$$

Es gilt zu beachten, dass für Kapazität und Innenwiderstand unterschiedliche Referenzanstiege gelten. Für die Bestimmung der kalendarischen Alterung sind lediglich die Schädigungsfaktoren für Temperatur und SOC zu verwenden. Des Weiteren ist statt des Ladungsdurchsatzes die Lagerungszeit in Tagen in die Modellgleichungen einzusetzen.

4 Anwendungsbeispiele und Validierung

In diesem Kapitel soll die Funktionalität des entwickelten Alterungsmodells anhand zweier Validierungsmessungen gezeigt werden. Dafür wurden zwei Zellen der gleichen Charge wie die Zellen der Messreihen mit unterschiedlichen realen Lastzyklen (auf Zellebene skalierte Stromamplituden) beaufschlagt. Diese Lastzyklen stammen aus Leistungsmessungen im 12m Elektrobus in Dresden. In Bild 8 und Bild 9 ist jeweils der SOC-Verlauf sowie der Stromverlauf gezeigt. Die Temperatur wurde innerhalb enger Grenzen bei nahezu 50°C konstant gehalten.

Die Zyklisierung der beiden Zellen wurde analog zum Vorgehen der Messreihen in regelmäßigen Abständen unterbrochen, um den bis dahin vorangeschrittenen Alterungsprozess messtechnisch zu erfassen. Als maßgeblicher Vergleichswert zwischen Messung und Simulation wird stets der letzte gemessene Funktionswert herangezogen. Idealerweise sollte dafür jeweils der Wert gewählt werden, welcher dem EoL-Kriterium entspricht. Bei beiden Belastungsprofilen wurde jeweils das Kapazität-EoL-Kriterium (80% der Nennkapazität) erreicht. Beim Anstieg des Innenwiderstands konnten dagegen bei beiden Belastungsprofilen Werte kleiner 150% (bezogen auf den Nennwert) gemessen werden. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Zellen im Elektrobus vermutlich aufgrund einer zu geringen Kapazität ersetzt werden müssen, nicht jedoch aufgrund eines zu hohen

Innenwiderstands. Bedingt durch eine fehlerhafte Speicherung der Messdaten ist der Kapazitätsverlauf des Fahrzyklus A nur bis 83% dargestellt.

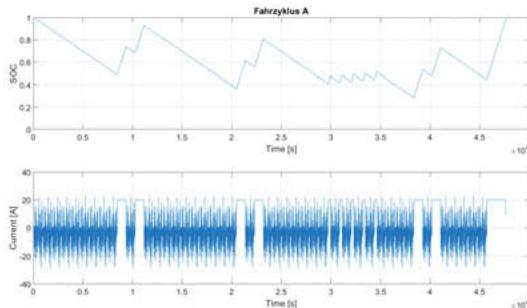


Bild 8: Fahrzyklus A - SOC-Verlauf und Stromverlauf

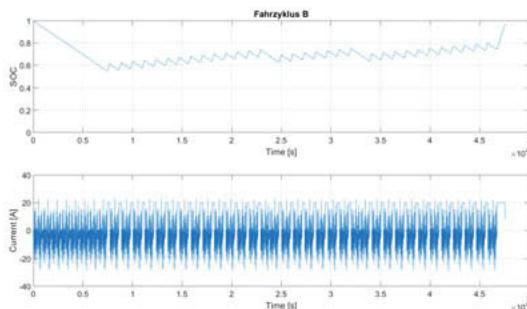


Bild 9: Fahrzyklus B - SOC-Verlauf und Stromverlauf

Die folgenden Bilden zeigen die Ergebnisse der Messungen und Simulationen im Vergleich.

Fahrzyklus A

Für die Abnahme der Kapazität ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Verläufe (Bild 10). Die prozentuale Abweichung am Ende der Messung (ca. 31.000 Ah nach ca. 1,5 Jahren) beträgt ca. 1%. Dies ergibt sich aus dem Vergleich der letzten beiden Datenpunkte in Bild 10.

$$C_{\text{mess}}(Q = 31.000 \text{ Ah}) = 83\%$$

$$C_{\text{sim}}(Q = 31.000 \text{ Ah}) = 84\%$$

Des Weiteren geht aus der Bild hervor, dass die Abweichung über den gesamten Verlauf der Alterung gleichbleibend verläuft und somit kein sich aufsummierender Fehler entsteht.

Der Verlauf des Innenwiderstands zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Werten (Bild 11). Die prozentuale Abweichung am Ende der Messung (ca. 31.000 Ah nach ca. 1,5 Jahren) beträgt ca. 4%. Dies ergibt sich aus dem Vergleich der letzten beiden Datenpunkte in Bild 11.

$$R_{i,\text{mess}}(Q = 31.000 \text{ Ah}) = 130\%$$

$$R_{i,\text{sim}}(Q = 31.000 \text{ Ah}) = 134\%$$

Im Vergleich zur Kapazitätsabnahme ist hier jedoch eine Zunahme des Fehlers mit steigendem Amperestundendurchsatz zu beobachten, wodurch die Gültigkeit des Modells je nach Genauigkeitsanforderung einzuschränken ist.

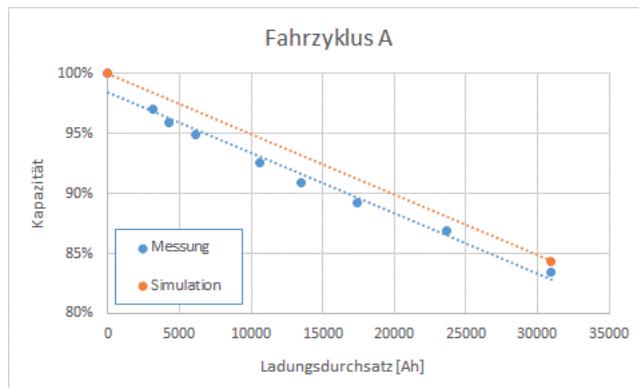


Bild 10: Fahrzyklus A - Vergleich Messung und Simulation der Kapazitätsabnahme

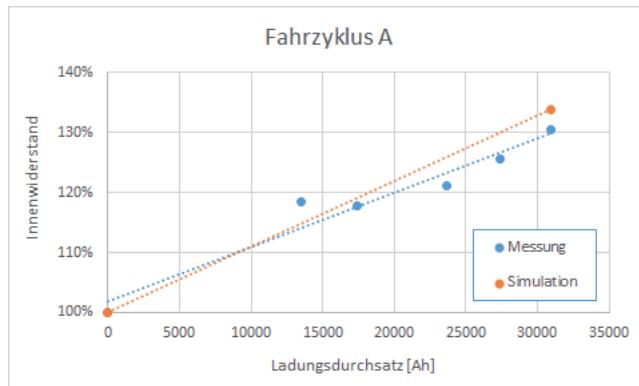


Bild 11: Fahrzyklus A - Vergleich Messung und Simulation des Innenwiderstandsanstiegs

Fahrzyklus B

Für die Abnahme der Kapazität ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Verläufe (Bild 12). Die prozentuale Abweichung am Ende der Messung (ca. 38.000 Ah nach ca. 1,5 Jahren) beträgt ca. 4%. Dies ergibt sich aus dem Vergleich der letzten beiden Datenpunkte in Bild 12.

$$C_{\text{mess}}(Q = 38.000 \text{ Ah}) = 79\%$$

$$C_{\text{sim}}(Q = 38.000 \text{ Ah}) = 83\%$$

Im Vergleich zur Kapazitätsabnahme bei Fahrzyklus A ist hier jedoch eine Zunahme des Fehlers mit steigendem Ladungsdurchsatz zu beobachten. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass auch das Modell für die Kapazitätsänderung einer limitierten Gültigkeit, je nach Genauigkeitsanforderung, unterliegt.

Der Verlauf des Innenwiderstands zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Werten (Bild 13). Die prozentuale Abweichung am Ende der Messung (ca. 38.000 Ah nach ca. 1,5 Jahren) beträgt ca. 10%. Dies ergibt sich aus dem Vergleich der letzten beiden Datenpunkte in Bild 13.

$$R_{i,\text{mess}}(Q = 38.000 \text{ Ah}) = 143\%$$

$$R_{i,\text{sim}}(Q = 38.000 \text{ Ah}) = 133\%$$

Ähnlich wie beim Innenwiderstandsanstieg bei Fahrzyklus A ist auch hier eine Zunahme des Fehlers mit steigendem Amperestundendurchsatz zu beobachten. Die Aussage der limitierten Gültigkeit für den Anstieg des Innenwiderstands wird dadurch bestätigt.

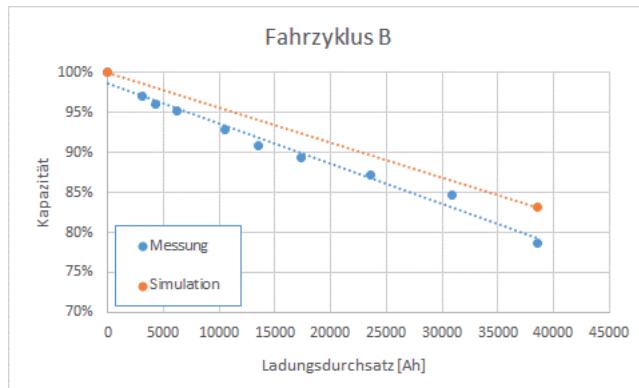


Bild 12: Fahrzyklus B - Vergleich Messung und Simulation der Kapazitätsabnahme

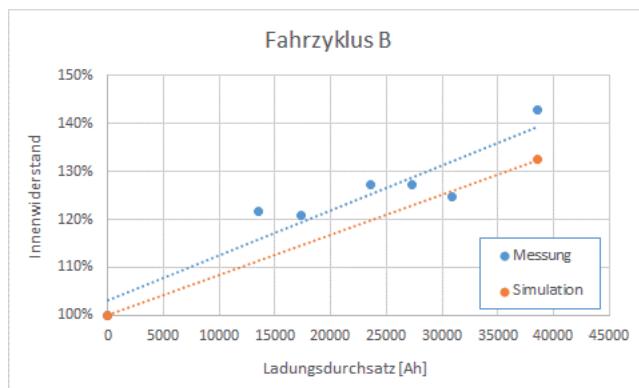


Bild 13: Fahrzyklus B - Vergleich Messung und Simulation des Innenwiderstandsanstiegs

5 Fazit

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Alterungsmodell für Li-Ionen Traktionsbatteriesysteme mit realen Nutzungsprofilen (Lastzyklen) entwickelt. Das Modell behandelt die beiden typischen Phänomene der Batteriealterung, den Verlust der Kapazität sowie den Anstieg des Innenwiderstands. Bei der Modellbildung des Alterungsprozesses wurde sowohl die zyklische Alterung (als Funktion der durchgesetzten Ladungsmenge) als auch die kalendarische Alterung (als Funktion der Zeit) berücksichtigt.

Dieses Modell ist für Simulationsdaten (Prognose der Alterung im Fahrzeugentwicklungsprozess) als auch für Messdaten (Nachweisrechnungen bestehender Fahrzeuge) anwendbar. Grundlage des Modells ist die Annahme, dass sowohl die Abnahme der Kapazität als auch der Anstieg des Innenwiderstands mittels linearer Funktionen approximiert werden können. Die Verläufe der ausgewerteten Messreihen bestätigen dies. Es wurden verschiedene Messreihen durchgeführt, auf Basis derer Schädigungsfaktoren ermittelt werden konnten. Diese Faktoren beschreiben die jeweils anteilige Schädigungswirkung der in diesem Modell berücksichtigten Einflussfaktoren (Temperatur, SOC, Δ SOC, C-Rate). Sie ermöglichen eine Anwendung des Modells auf beliebige Parameterkonstellationen außerhalb der durchgeführten Messreihen. Das Modell konnte mit Hilfe eines Vergleichs gegenüber Zellen, welche mit realen Lastzyklen beaufschlagt wurden, validiert werden.

Der Vergleich aus gemessenen und simulierten Werten ergibt für die Kapazitätsabnahme mit 1% (Fahrzyklus A) bzw. 4% (Fahrzyklus B) ein sehr gutes Ergebnis. Der Vergleich der Werte beim Anstieg des Innenwiderstands weist hingegen größere Abweichungen auf. Während für Fahrzyklus A mit einer Abweichung von 4% zwischen gemessenen und simulierten Werten ein noch akzeptables Ergebnis erzielt wurde, liegt die Abweichung der Werte bei Fahrzyklus B mit 10% bereits in einem nicht akzeptablen Bereich. Der Grund dafür wird jedoch nicht im generellen Modellansatz, sondern in einer unzureichenden Parametrierung vermutet. Es wurden bereits zusätzliche Messungen initiiert, um eine Verfeinerung der Modell-parametrierung vornehmen zu können.

Quellen

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (Hrsg.); Dr. Michael Faltenbacher (Mitarb.); Dr. Olga Vetter (Mitarb.); Annekristin Rock (Mitarb.); Julian Grafetstätter (Mitarb.) : *Statusbericht 2015/16 Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutschland*, 2016
- [2] ALEXANDER BUNZEL; PETERSOHN, Ronny (Mitarb.); BÄKER, Bernard (Mitarb.) : Dresden's bus route 79 turned into full electric - Opportunity and challenge. In: HOFF, Carsten; SIRCH, Ottmar (Hrsg.): *Elektrik, Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement VII*. Renningen : expert Verlag, 2016 (Fachbuch / Haus der Technik, Band 142).
- [3] UFERT, Martin: *Innovationen für eine nachhaltige Mobilität – EKE-ÖPNV: Energie- und kosteneffiziente Elektrifizierung von ÖPNV-Flotten* (5. Fachkonferenz Elektromobilität vor Ort). Leipzig, 27.02.2018
- [4] BUNZEL, Alexander: *Software aided planning tool for choosing vehicle / infrastructure / charging strategy of e-bus lines* (EV2017VÉ Conference). Markham, Toronto, 31.05.2017
- [5] RAHIMZEI, Ehsan ; REGETT, Anika ; FISCHHABER, Sebastian ; SCHUSTER, Simon F.: *Maßnahmenpapier zur Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen*. August 2016. Frankfurt am Main : Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität, Deutsches Dialog Institut GmbH, 2016 (Ergebnispapiere der Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität)
- [6] MEINERT LEWERENZ: *Sezierung und quantitative Beschreibung der Alterung von Lithium-Ionen-Batterien mittels zerstörungsfreier Methoden validiert durch Post-Mortem-Analysen*. 07.06.2018

Predictive Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles: eHorizon for Battery Management System

Dipl.-Ing. **M. Caggiano**, FEV Italia, Bologna, Italy;
Prof. Dr.-Ing. **N. Cavina**, Dipl.-Ing. **A. Capancioni**,
University of Bologna, Italy;
Dipl.-Ing. **S. Mazzetti**,
Automobili Lamborghini, S. Agata Bolognese, Italy

1. Abstract

This paper presents the development of an Electronic Horizon (or eHorizon) strategy able to increase the electric range of a plug-in hybrid supersport vehicle, thanks to the detailed knowledge of the vehicle mission ahead (traffic lights timings, road profile, road congestion, dangerous events, etc.). Speed and load profiles estimation allows optimizing the thermal management strategies on the high voltage energy storage system, with a model-based approach.

Due to the increasing diffusion of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) and Connectivity and Communication technologies (V2X) on vehicles, the reconstruction of the electronic horizon can today be considered feasible. eHorizon represents a detailed information of the mission ahead through the knowledge of traffic conditions and road characteristics. This detailed information along the route can be used by eHorizon function in short terms (0-250m, so-called short eHorizon) medium terms (250-1000m, so-called medium horizon), and long terms (over 1000m, so called long eHorizon). Long eHorizon information are normally used to adapt the powertrain strategies to optimize the energy usage.

2. Introduction

Most people accept that there is a correlation between the increasing content of human-related greenhouse gases (GHG) in the atmosphere and the increase in global temperature. Following the 2015 Paris Agreement, to decelerate global warming, the European Commission has significantly sharpened its plans for greenhouse gas reduction against the previous policy of 2010. Now we see a target of cutting GHG emissions of all sectors by 40% until 2030 and 80% by 2050. In 2050, we aim at an almost complete decarbonisation of the electric power sector using 97% renewable energy sources. Transport shall reduce 60% greenhouse gas emissions [1].

Up to now, EU legislation considers Tank-to-Wheel CO₂ production, but in the next future it will change into a Well-to-Wheel (W2W) approach, including also electric power sources, which are different throughout Europe. In a W2W scenario, a battery electric vehicle (BEV) is not CO₂-free anymore. Considering the European average CO₂ emission of the power sector and its ongoing decarbonisation, the W2W balance for BEVs in NEDC is 47 g/km of CO₂ in 2016 and it will become 24 g/km in 2030¹ [2].

At a certain date, the completeness of discussion and – hopefully – the legislation will become LCA (Life Cycle Assessment) based, including the sourcing and processing of raw materials needed to build the vehicle, its production, its maintenance, and finally its recycling and disposal. Only then we will know how “green” a given vehicle is. In a lifecycle analysis of a BEV, the battery production and the sourcing of its material have a tremendous environmental impact. In terms of lifecycle particulate emissions and soil acidification, BEVs are worse than conventional cars, because mining and ore extraction takes place in third world and emerging countries under possibly dramatic conditions.

From 2016 to 2030, the ERTRAC (European Road Transport Research Advisory Council) electrification road map (2030) expects to reduce the energy demand of a compact BEV in NEDC to less than 120 Wh/km and to 0.45L/100km for PHEV in standard test conditions [2]. Major contributors are: weight reduction using even lighter materials and lighter high energy-density batteries, advanced driver assistance systems and automated driving.

The preceding paragraphs clearly imply that the roadmap followed by all OEMs is hybridization of the powertrain and, for light-duty applications, the most widespread solution is the electrified one. A hybrid electric vehicle (HEV) has, regardless of the architecture, one or more electric machines and, usually, one internal combustion engine. The energy stored on board has two different natures: electrochemical, flowing from the battery packs through the electrical path and vice-versa; chemical, flowing from the fuel tank to the engine. If the battery packs can be externally recharged, then the vehicle is referred to as plug-in HEV (PHEV) and, generally, it has larger battery capacity than a HEV. Hybrid vehicles control system is normally hierarchical, and the control level that manages the power/energy flows among the powertrain is the supervisory controller. This level implements the energy management strategy.

The present work is focused on the development of a predictive control strategy based on navigation data knowledge and oriented to battery thermal management for PHEVs. The main focus of the strategy is to reduce as much as possible battery energy usage related to power

¹ Assuming that the electric power is delivered by the 2016 and 2030 overall EU power production, respectively.

request from the related cooling circuit, to actuate high voltage compressor, pumps and valves. For this aim, a 1-D thermo-hydraulic model of the in-vehicle battery cooling circuit has been developed. Then, it has been implemented in an already existing 0-D vehicle model. The core of the work is the development of an analytical function developed to predict battery temperature behavior over the electronic horizon, on the basis of input signals such as estimated vehicle speed in actual traffic condition, traffic light management, and road slope profile. As a consequence of temperature prediction, the developed strategy is able to establish, in an energy-efficient way, if and when the battery cooling power is required or not. In comparison with the classical rule-based strategy, the results highlight the advantages of applying the predictive strategy in terms of all-electric range extension, and energy consumption reduction.

3. Vehicle model

A dynamic, control-oriented model has been used for this work, which means there is a driver model that inputs realistic acceleration and brake pedal signals, according to the desired vehicle speed. Consequently, the energy flow is transmitted from the prime or auxiliary mover, passing through the transmission and reaching the wheels, where vehicle acceleration is calculated.

3.1 Modelling environment

As in the most part of the works in literature, even here the modelling environment used is MATLAB/Simulink. Precisely, all the controllers, the supervisory and the components sub-models are directly implemented in Simulink, while for the physical modelling of the components a dedicated Simulink library has been used, Simscape. In this way, it is possible to physically connect parts of the vehicle, according to the powertrain layout, starting from the engine and arriving to the tires contribution.

3.2 Powertrain Characteristics

The vehicle in exam is an axle-split parallel hybrid electric vehicle, which has a P1-P4 architecture (Fig. 1).

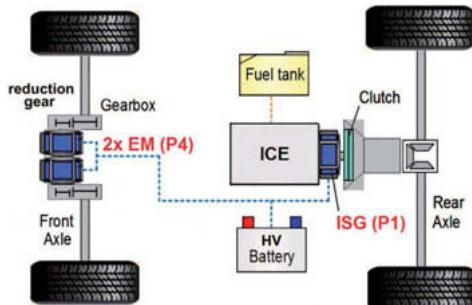


Fig. 1: Vehicle hybrid powertrain architecture

When it is in pure electric drive, the internal combustion engine (ICE) is switched off and the clutch is open, so it performs a front-wheels drive (FWD) with the two electric motors positioned on the front axle. When in hybrid mode, it has a four-wheels drive (4WD) traction capability.

Table 1: Vehicle powertrain data

Battery layout	1p108s
Cell capacity	25.5 Ah
Cell nominal voltage	4.2 V
Max EM Torque (in continuous)	213 Nm
Max EM Power (in continuous)	63 kW
Max ICE Power	596 kW
Vehicle mass	2050 kg

3.3 Vehicle dynamics model

For this study, only vehicle longitudinal dynamics are considered.

Hence, the fundamental equation representing the vehicle motion is the following

$$m_v \frac{d}{dt} v(t) = F_{mot}(t) - F_{res}(t)$$

and, according to [3], it is

$$F_{res}(t) = F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) + F_d(t)$$

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \rho_{air} A_f c_x v^2(t)$$

$$F_r(t) = c_r(t) m_v g \cos \alpha(t)$$

$$F_g(t) = m_v g \sin \alpha(t)$$

where the resistance force F_{res} takes into account the effects of the air resistance (F_a), the rolling resistance (F_r), the gradient resistance (F_g) and all the other not specified effects (F_d). For the sake of simplicity, the latter is neglected.

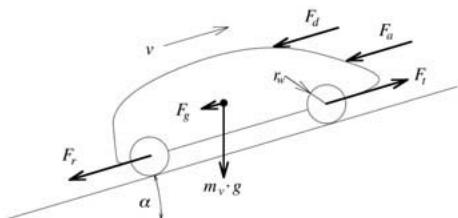


Fig. 2: Forces acting on a vehicle in motion

3.4 Heuristic energy management strategy

In its default configuration, the vehicle has a heuristic energy management strategy that only distinguishes between E-drive and Hybrid Drive. If the E-drive mode is enabled and activated, the propulsion comes only from the front axle, without switching on the hybrid power path. Otherwise, if Hybrid Drive mode is selected, the power split is defined by load point shift maps. Therefore, as depicted in Fig. 3, the selection of the driving mode depends on three main variables: battery SOC, torque request at the wheel, and vehicle speed. A pre-calibrated hysteresis is also added to guarantee stability.



Fig. 3: Rule-based control strategy for driving mode selection

4. Battery cooling circuit model

The in-vehicle battery cooling circuit has been physically modelled by means of AMESim software, as shown in Fig. 4. In order to reproduce in detail the battery thermal behavior, and to

obtain a control-oriented model for the application of the thermal management control strategies, both the refrigerant and the coolant loops have been considered.

Consequently, the hydraulic, thermal and air-conditioning libraries have been used. In particular, the battery has been thermally modelled by means of a thermal mass component, which allows to compute the temperature dynamics of a solid mass with respect to incoming and outgoing heat fluxes. In this case, they are represented by the electric power losses and the cooling power supplied by the coolant. The temperature of the thermal mass is then evaluated from the following energy balance

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{m \cdot c_p} \sum_{i=1}^4 dh_i$$

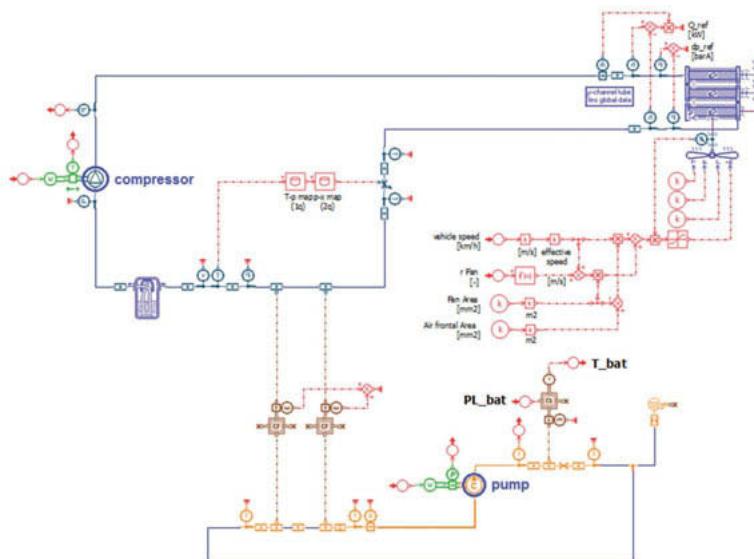


Fig. 4: Battery cooling circuit thermo-hydraulic model in AMESim environment.

Due to the availability of materials' data, in order to take into account the thermal dynamics of the global battery pack, the value of its equivalent specific heat capacity has been calibrated against experimental data (Fig. 5).

The model has then been exported by means of S-functions in Simulink environment, to enable co-simulation with the vehicle model previously described.

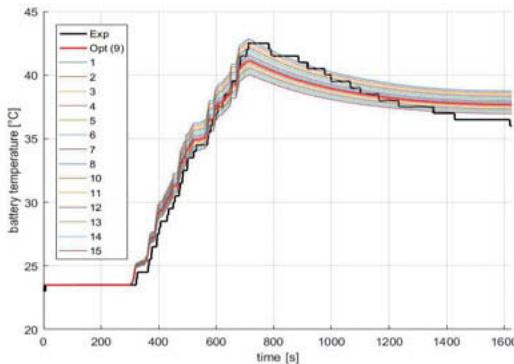


Fig. 5: Model calibration based on battery equivalent specific heat capacity

5. Thermal management control strategies

The electrical battery pack in HEVs and BEVs must deal with important thermal issues which can seriously compromise reliability, safety and ageing of the involved components [4]. Consequently, an advanced battery thermal management system (BTMS) is needed [5]. At this end an eHorizon control strategy has been developed, with particular attention to the predictive function for battery temperature estimation based on navigation data. Then, this strategy has been compared to the heuristic one, already implemented in the vehicle

5.1 Assumptions

Both the aforementioned control strategies have to comply with a fundamental physical constrain which is represented by battery maximum operating temperature, in order to avoid performances de-rating and premature ageing of the component. According to [6], a reasonable value of the limit temperature could be $T_{b,max} = 40^\circ\text{C}$. As an additional assumption, for the sake of simplicity, the HV compressor is either switched on or off depending on pump activity. Moreover, initial temperatures of the refrigerant, the coolant and the battery have been set to the environmental one.

5.2 Heuristic control strategies

Heuristic thermal management is based on intuitive rules and correlations involving various parameters, mainly temperatures. One guiding principle of such strategy is to preserve the temperature of thermal-stressed components within a restricted range of values. Therefore,

upper and lower temperature thresholds are set after a calibration phase, which can turn out to be an expensive and time-consuming task because the choice of the optimal values is influenced by the architecture of the examined cooling system. Moreover, those values are usually lower than the one related to the aforementioned thermal constrain because highly demanding operating conditions have to be taken into account in advance.

As shown in Fig. 6, the heuristic control approach of the pump is a rule-based one, which means it is switched on or off when the battery temperature is higher or lower than the threshold values, which are respectively $T_{pmp,ON} = 30^\circ\text{C}$, $T_{pmp,OFF} = 28^\circ\text{C}$.

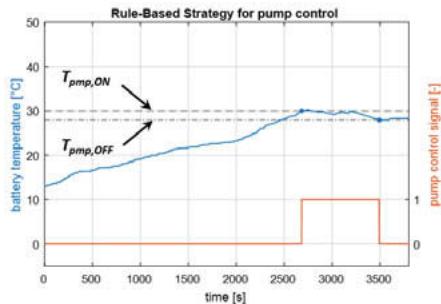


Fig. 6: Rule-based control strategy for the battery cooling circuit pump

5.3 Predictive eHorizon control strategy

The development of the predictive control strategy is described with particular attention to the description of its architecture and the analytical function for battery temperature prediction.

5.3.1 Architecture

The architecture of the control system based on eHorizon reconstruction is depicted in Fig. 7.

Recent passenger cars are commercialized with built-in navigation systems. A state-of-the-art approach is to employ an electronic horizon provider, which provides several routing information by means of a provider (back-end) [7]. In this project, a RDE cycle located in the city of Bologna, in Italy, has been defined and chosen as a benchmark driving schedule, according to new European legislation [8]. Therefore, road slope data $\alpha(t)$ are considered to be known at the beginning of the mission. Moreover, since due to real-world driving it is not possible to know a priori the speed profile of the vehicle using only map data, a driver model has been

developed and implemented in the vehicle supervisory controller. As a result, a predicted vehicle speed trajectory $v'(t)$ for the aforementioned cycle has been derived, as depicted in Fig. 8. Furthermore, a route estimation block provides the function with information regarding city passages, which are assumed to be the thermal-relevant events. In particular, a bit signal $u_{cs}(t)$ is generated (Fig. 8), which is zero outside zero-emissions zones.

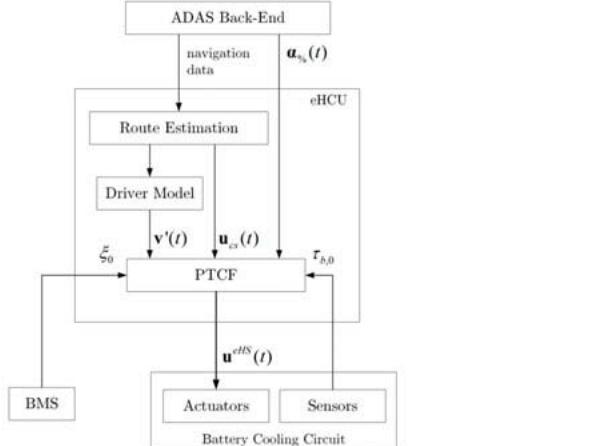


Fig. 7: Architecture of the eHorizon control strategy

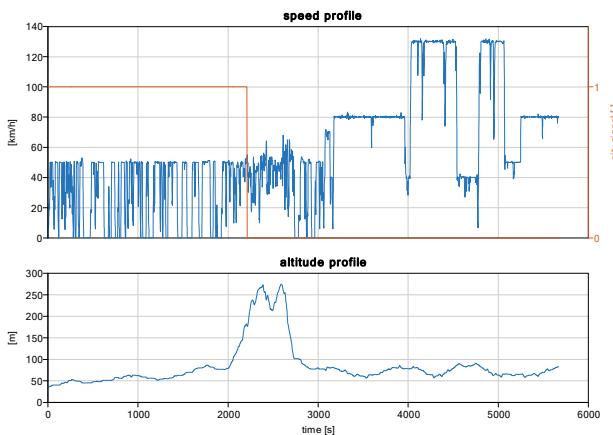


Fig. 8: Speed and altitude profile of the RDE-compliant driving cycle

5.3.2 Predictive analytical function

A predictive thermal management control function (PTCF) has been developed in order to calculate the temperature behavior of the high-voltage battery over a certain route section, which corresponds to a city passage. Indeed, it is assumed to be a zero-emissions zone, and consequently the torque request is totally satisfied by the electric propulsion system.

Function parameters are listed in Table 2.

Table 2: Parameters of the predictive function

Input signal(s)	Reconstructed speed profile, $v'(t)$ Road slope profile, $\alpha(t)$
State variable(s)	HV battery temperature, $T_b(t)$
Output signal(s)	Pump control bit signal, $u_{pmp}(t)$
Boundary condition(s)	Initial battery temperature, $T_{b,0} = T_b(0)$ Initial battery state of charge, $\xi_0 = \xi(0)$ Limit battery temperature, $T_{b,lim}$

The nature of the algorithm suggests following a backward-facing approach. Here, the traction force, and consequently torque and electric power request, are evaluated on the basis of the vehicle speed by solving the previously presented differential equation for the vehicle motion. Once the electric propulsion torque and power are known, it is possible to calculate the battery power losses due to resistive heating according to the following equation

$$P_{b,loss}(t) = R_b(t) i_b^2(t)$$

As a consequence, the thermal balance applied to the HV battery may be solved as follows

$$T_b(t) = T_{b,0} + \frac{P_{b,loss}(t)}{m_b \cdot c_{p,b}}$$

For sake of simplicity, cooling power is not considered in this evaluation step.

At the beginning of every simulation, i.e. when the route is ideally set in normal driving conditions, an evaluation task is always triggered. As previously explained, the battery temperature initial value is $T_{b,0} = T_{amb}$.

As shown in Fig. 9, when the function performs this task, the predicted battery temperature is evaluated and then compared to its physical limit value. The maximum battery temperature value ($T_{b,max}$) is calculated as the one that would be reached without activating the battery cooling systems (i.e., without actuating the HV compressor and the pump). If such value results to be higher than $T_{b,lim}$, then the battery needs to be cooled down and the pump and HV compressor are switched on. This evaluation task is periodically performed as long as this condition occurs. Otherwise, if the maximum battery temperature lies below the limit value, the actuators are switched off, or not switched on at all (no cooling power request).

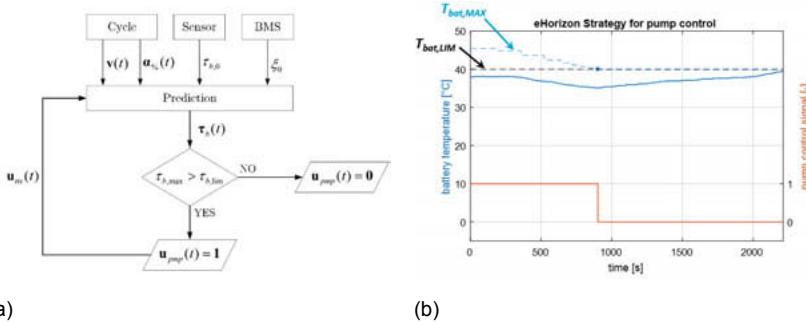


Fig. 9: Working principle of the eHorizon control strategy shown by (a) flowchart and (b) diagram

6. Results

In order to compare the effects of the rule-based (RBS) and the eHorizon (eHS) control strategies on the state of charge (SoC), the all-electric range (AER) and the fuel consumption (FC), three different test cases have been designed. For each of them different ambient temperatures have been simulated and the initial state of charge has been set to 95% due to the long distance of the urban trip.

Results are normalized with respect to the maximum value of the investigated parameter. Relative percentage differences $\Delta\%(\cdot)$ are calculated as well.

6.1 Test case 1 – City passage

Because urban areas have been considered as zero-emissions zones, the driving mode has been forced in pure electric.

As shown in Fig. 10, the major advantages of the eHS in terms of SoC at city exit ($\xi_{c,out}$) takes place at medium ambient temperatures (around 30-35°C). This is because cooling power is

never (or always) requested at very cold (or very hot) temperatures, respectively, and consequently the behavior of the two strategies is almost the same. Moreover, in the range $T_{amb} = 20\text{-}30^\circ\text{C}$, the positive effect of ambient temperature on power losses reduction (due to the decreasing of the cell internal resistance) is greater than the negative one related to the increasing amount of heat power to be absorbed from the battery. As a result, it follows that eHS SoC values remain quite high in that range. In particular, maximum efficiency is obtained at $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$.

Furthermore, at $T_{amb} = 50^\circ\text{C}$ the refrigerant pressure is high enough to exceed an upper safety threshold set to avoid dangerous cooling circuit overpressure. As a consequence, the HV compressor is repeatedly switched on and off until the previous condition is no more satisfied. Hence, the energy drained from the battery for the cooling task is lower than expected.

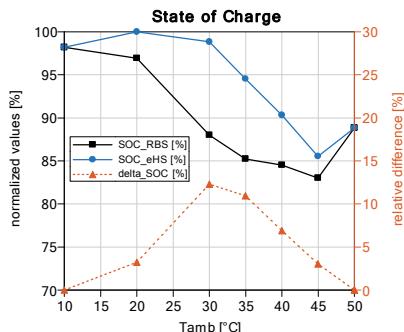


Fig. 10: Test case 1 – Comparison of normalized SoC at city exit

6.2 Test case 2 – Full RDE cycle

In order to estimate the all-electric range, the e-drive mode has been forced even outside the urban area until the rule-based condition on the SoC for the hybrid drive is satisfied (Fig. 3). Hence, the predictive strategy is applied only in charge-depleting mode, and while the heuristic one applies during other conditions.

Because SoC level and all-electric range are strictly correlated, it is clear that AER also decreases with increasing environmental temperature, except for extreme environmental conditions (Fig. 11). It can be also noticed that a sharp reduction of AER occurs at $T_{amb} = 35^\circ\text{C}$ and $T_{amb} = 45^\circ\text{C}$ applying the RBS and the eHS, respectively. This fact is due to the relevant road gradient section which mainly characterizes the rural trip of the driving schedule (Fig. 7). At those temperatures, the energy consumption related to battery cooling makes the state of

charge not high enough to overcome an up-hill section of the cycle, which is immediately followed by a down-hill one. Hence, it is shown that road gradient has a non-negligible effect on the vehicle global energy consumption.

Moreover, as expected, results show that fuel consumption exhibits an opposite trend with respect to the AER behavior. Relatively high values of FC at $T_{amb} = 45^{\circ}\text{C}$ are due to an engine ignition occurring during a strong acceleration phase of the driving cycle.

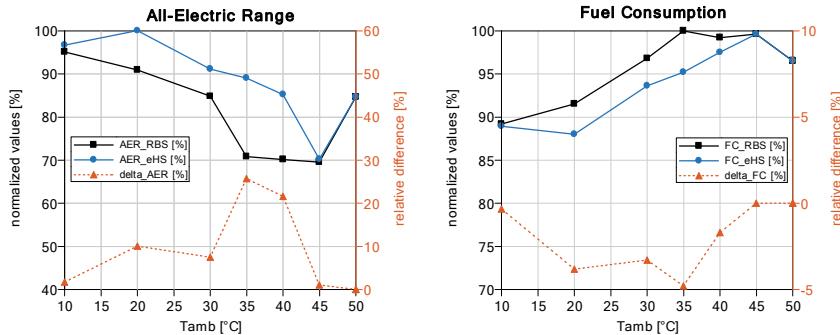


Fig. 11: Test case 2 – Comparison of normalized AER and FC

6.3 Test case 3 – Full RDE cycle with null slope

To further analyze the proposed strategy performance, and to better clarify the previously shown results, test case 2 is performed once again imposing a zero slope profile.

In these conditions the values of AER and FC vary directly in response to ambient temperature changes .

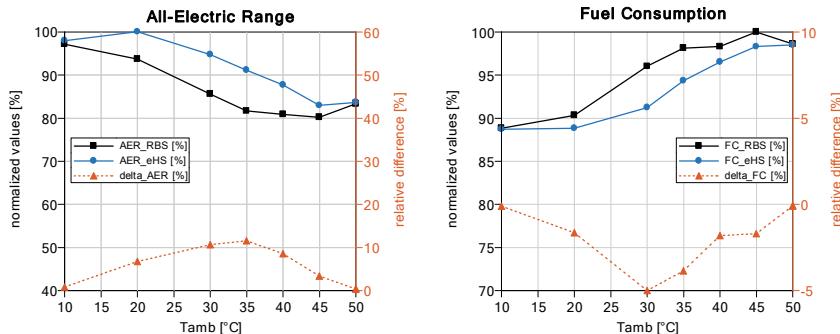


Fig. 12: Test case 3 – Comparison of normalized AER and FC

7. Conclusions

In this work, a predictive eHorizon control strategy based on navigation data for battery thermal management of a PHEV has been developed and compared to the in-vehicle heuristic one. Both the strategies control the same actuators, i.e. the e-pump and the HV compressor of the battery cooling circuit.

At first, as expected, this study has shown that at extreme environmental temperatures there are no advantages of applying a predictive strategy because battery cooling power is always or never requested in a hot summer or cold winter scenario, respectively.

Furthermore, maximum performance of the eHS are obtained at low-medium ambient temperatures. Indeed, the positive effect of cell internal resistance decrease due to the increasing of ambient temperature is larger than the cooling power request increase in the range $T_{amb} = 20\text{-}30^\circ\text{C}$.

Moreover, maximum advantages of the eHS compared to the RBS take place at medium-high ambient temperatures. In this condition, power from the battery is demanded by the heuristic strategy in order to cool down the component until its temperature drops below the lower threshold temperature related to pump activity, whose value, $T_{pmp,OFF} = 28^\circ\text{C}$, is quite low compared to the one $T_{b,lim} = 40^\circ\text{C}$ of the predictive strategy.

Acronyms

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AER	All-Electric Range
BEV	Battery Electric Vehicle
BTMS	Battery Thermal Management System
eHCU	Electronic Horizon Control Unit
eHS	Electronic Horizon Strategy
FC	Fuel Consumption
HV	High Voltage
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PTCF	Predictive Thermal management Control Function
RBS	Rule-Based Strategy
RDE	Real Driving Emissions
SOC	State Of Charge

8. References

- [1] Schernus, C., Schnorbus, T.: From T2W to LCA – zero-CO₂ mobility concepts and their different shades of green. ICE2017. 2017
- [2] European Roadmap Electrification of Road Transport, report, ERTRAC, EPoSS, ETIP-SNET 2017
- [3] Guzzella, L., Sciarretta, A.: Vehicle Propulsion Systems. Introduction to Modeling and Optimization. Berlin, Heidelberg: Springer 2013
- [4] Dincer, I., Hamut, H. S., Javani, N.: Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems. Wiley 2017
- [5] Khan, M., Swierczynski, M., Kær, S.: Towards an Ultimate Battery Thermal Management System: A Review. 3 (2017) 1 pp. 9
- [6] Neumeister, D., Wiebelt, A., Heckenberger, T.: Systemeinbindung einer Lithium-Ionen-Batterie in Hybrid- und Elektroautos. ATZ 122 (2010) 4 pp. 250-255
- [7] Varnhagen, R.: Electronic Horizon: A Map as a Sensor and Predictive Control. COMVEC17. 2017
- [8] Real-Driving Emissions test procedure for exhaust gas pollutant emissions of cars and light commercial vehicles in Europe, report, ICCT 2017

Wasserstoff-betriebener Verbrennungsmotor als effizienter Antriebsstrang im Nutzfahrzeugsektor

Mit Hilfe eines innovativen 4-Komponentenansatzes zum emissionsfreien Verbrennungsmotor

Dr.-Ing. Thomas Korn, KEYOU GmbH, Unterschleißheim

1 Kurzfassung

Der Verbrennungsmotor ist die verbreitetste und komplizierteste Maschine, die je entwickelt wurde. Durch die Verwendung von Wasserstoff (H_2) als Kraftstoff ist es möglich, den Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren zu steigern und gleichzeitig die Emissionen auf nahezu Null zu reduzieren. Der Einsatz von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren ist eine an sich bewährte Technologie. Unterschiedliche Automobilhersteller (z.B. BMW, MAN, Ford, Mazda) haben das Potential der Wasserstoffverbrennung bis ins letzte Jahrzehnt kontinuierlich erforscht. Aufgrund diverser technischer Grenzen konzentrierte sich die Entwicklung der letzten Jahre allerdings auf die Verbrennungssteuerung und ließ das Potential von Wirkungsgrad und Leistungsdichte außer Acht. Mit ihrem innovativen, proprietären Technologiekonzept - Einsatz einer intelligenten, mageren Verbrennung mit Abgasrückführung (AGR), Turbo-Aufladung und effizienter Einblasung - lenkt KEYOU die Aufmerksamkeit erneut auf den Wasserstoffverbrennungsmotor und zeigt, wie leistungsstark, effizient und emissionsarm die Motoren der Zukunft sein können.

2 CO_2 Emissionen als globales Problem – der Verbrennungsmotor von heute stößt an seine Grenzen

Aufgrund stetig wachsender Bevölkerungszahlen und dem Wunsch, Waren zu transportieren, begann im frühen 20. Jahrhundert der „Siegeszug“ von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Entwicklungs- und Herstellungsprozesse wurden über die Jahre etabliert und perfektioniert mit der Folge, dass Millionen Menschen in der Automobilindustrie arbeiten – bis heute. Entweder direkt bei Erstausrüstern oder bei Zulieferern. Heute werden jedes Jahr Millionen von Autos, Nutzfahrzeuge und Motorräder mit konventionellen Motoren verkauft. Die dadurch immer steigende Verschmutzung durch Abgase - voll von CO , NOx , unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) und anderen Feinstaubemissionen - verursachen jedoch enorme Gesundheits- und Umweltschäden. Insbesondere Großstädte leiden unter diesem Phänomen. Zusätzlich emittieren alle Kraftstoffverbrennungsmotoren große Mengen an CO_2 ,

was den Treibhauseffekt beschleunigt. Laut Weltbank wurden 20,4% der globalen CO₂-Emissionen im Jahr 2014 allein durch den Transportsektor verursacht.

Steigen die CO₂-Emissionen weiter ungehindert an, so besteht die Gefahr, dass die durchschnittlichen Temperaturen um +2°C und der Meeresspiegel um ca. 4 Meter ansteigen und bis zu 130 Millionen Klimaflüchtlinge ihre Heimat verlieren. Bei einem durchschnittlichen Temperaturanstieg von +4°C kann der Meeresspiegel sogar um bis zu ca. 7 Meter ansteigen mit der Folge, dass bis zu 500 Millionen Klimaflüchtlinge ihre Heimat verlieren.

3 EU-Kommission plant CO₂-Grenzwerte für Nutzfahrzeuge

Während die CO₂-Emissionen von Leichtfahrzeugen und PKW seit Jahren durch die EU reguliert sind, fehlt eine solche Regulierung auf EU-Ebene bislang für Schwerlastfahrzeuge wie LKW und Busse. Um die Klimaziele der EU zu erreichen, ist es von entscheidender Bedeutung, die Emissionen auch in diesem Bereich zu regulieren, da Schwerlastfahrzeuge für rund 6% der gesamten Emissionen in der EU und für ca. 25% der CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in der EU verantwortlich sind. "Alle Sektoren müssen dazu beitragen, unsere Klimaschutzverpflichtungen aus dem Pariser Abkommen zu erfüllen", so Miguel Arias Canete, EU-Kommissar für Klimaschutz und Energie. "Deshalb schlagen wir zum ersten Mal EU-Normen vor, um die Kraftstoffeffizienz und die Emissionen neuer schwerer Nutzfahrzeuge zu erhöhen."

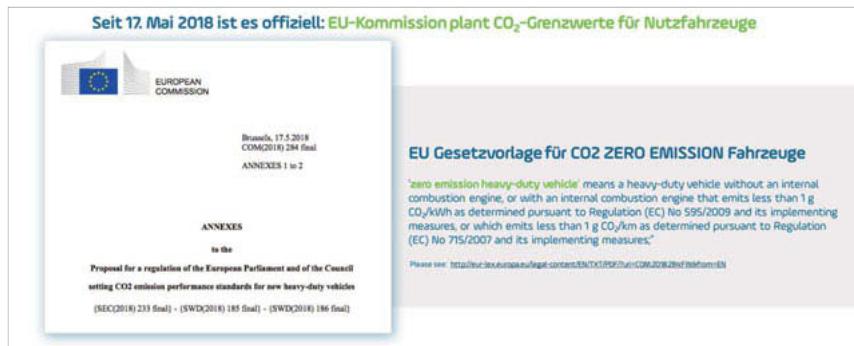


Bild 1: Der neue EU Gesetzesentwurf zu den CO₂-Vorgaben für Nutzfahrzeuge / Definition von zero emission Fahrzeugen, EU

Die neue Europäische Strategie für emissionsarme Mobilität setzt ein klares Ziel: Bis 2050 müssen die CO₂-Emissionen des Verkehrs um mindestens 60% niedriger sein als 1990.

Ebenso müssen die Emissionen von Luftschadstoffen aus dem Verkehr, die unserer Gesundheit schaden, unverzüglich drastisch reduziert werden.

Da emissionsfreie und emissionsarme Schwerlastwagen mit Ausnahme von Bussen noch nicht auf dem Markt erhältlich sind, plant die EU die Einführung eines speziellen Mechanismus in Form von „Super Credits“, um einen reibungslosen Übergang zur emissionsfreien Mobilität zu erleichtern. Dies wird Anreize für die Entwicklung und den Einsatz von emissionsfreien und emissionsarmen Schwerlastwagen auf dem europäischen Markt schaffen, welche die nachfrageseitigen Instrumente, wie die Richtlinie über saubere Fahrzeuge, ergänzen würden (siehe u.a. 2009/33/EG des Europäischen Parlaments und des Rates für Details)

Die EU definiert ein emissionsfreies schweres Nutzfahrzeug wie folgt: Ein emissionsfreies schweres Nutzfahrzeug ist ein schweres Nutzfahrzeug ohne Verbrennungsmotor oder mit einem Verbrennungsmotor, der weniger als 1 g CO₂/kWh gemäß der Verordnung (EC) 595/2009 und seiner Durchführungsmaßnahmen oder weniger als 1 g CO₂/km gemäß der Verordnung (EC) 715/2007 und seiner Durchführungsmaßnahmen emittiert. Von allen bestehenden Verbrennungsmotorkonzepten werden Wasserstoff-Verbrennungsmotoren die einzigen sein, die diese Grenzwerte einhalten können.

4 Zukünftige Anforderungen an Nutzfahrzeuge – Defizite bei heute diskutierten alternativen Antriebstechnologien

Die heutige konventionelle Antriebstechnologie im Nutzfahrzeugsektor basiert hauptsächlich auf dem Dieselmotor. Aufgrund steigender Umweltbedenken, gepaart mit Einschränkungen durch den Markt, stehen Flottenbetreiber verstärkt unter steigendem Druck, saubere Fahrzeuge zu kaufen, gleichzeitig jedoch konkurrenzfähig und profitabel zu bleiben. Fahrzeughersteller müssen deshalb Nutzfahrzeuge anbieten, die folgende Voraussetzungen erfüllen, sollen diese auch noch in Zukunft in hohen Stückzahlen verkauft werden:

- Emissionen: Keine NOx, CO₂ und andere Emissionen
- Kosten: Anschaffungs- und Betriebskosten vergleichbar mit Diesel
- Reichweite: Reichweiten müssen Betriebsanforderungen/-standards erfüllen
- Tankzeiten: Tankzeiten müssen Betriebsanforderungen erfüllen
- Nutzlast: Hohe Nutzlasten sind wichtig für die Kosten-Nutzen-Analyse
- Zuverlässigkeit/Verfügbarkeit: Dieseladäquate Verlässlichkeit und Robustheit nötig
- Lebensdauer: Typische Diesel-Lebensdauer wird als Standard erwartet

Dieselbetriebene Nutzfahrzeuge sind zwar weder emissionsarm noch emissionsfrei, erfüllen aber alle sonstigen Anforderungen wie niedrige Kosten, hohe Reichweiten, kurze Tankzeiten, hohe Nutzlasten, hohe Zuverlässigkeit und eine lange Lebensdauer. Derzeit verfügbare Alternativen sind batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV), die in Zukunft Dieselfahrzeuge „ablösen“ sollen. Wie fällt die bisherige Zwischenbilanz aus?

Die Produktion von Batterien ist sehr material- und energieaufwendig. Wenn die elektrische Energie nicht aus erneuerbaren Energien, sondern aus dem aktuellen Strommix stammt, werden bei der Produktion der Batterien große Mengen an CO₂ und anderen Schadstoffen wie Feinstaub und Stickoxide frei. Die Menge des produzierten CO₂ steigt mit der Speicherkapazität bzw. der erforderlichen Reichweite. Da Nutzfahrzeuge in der Regel weite Strecken abdecken und / oder hohe Nutzlasten transportieren müssen, ist der Einsatz rein elektrischer Antriebe in diesem Segment aus ökologischer und ökonomischer Sicht nicht sinnvoll. Außerdem werden in modernen Batterien Elemente wie Lithium und das hochgiftige Kobalt eingesetzt. Deren Verfügbarkeit beschränkt sich nicht nur auf einige wenige Länder, häufig werden sie zudem unter fragwürdigen Bedingungen abgebaut. Darüber hinaus sind sie endlich und werden daher bei intensiver Nutzung immer teurer werden. Heute wird das Recycling von Batterien nur rudimentär umgesetzt, der Aufwand für den gesamten Lebenszyklus kann also noch nicht beurteilt werden. Um die Abhängigkeit von Rohmaterialien zu vermeiden, ist Recycling allerdings unverzichtbar. Ein Brennstoffzellenfahrzeug kommt mit einem vergleichsweise kleinen Speicher aus, da er im Betrieb bei Bedarf ständig aufgeladen werden kann. Brennstoffzellen benötigen jedoch wiederum ein anderes sehr seltenes und teures Material, nämlich Platinum.

Neben den ökologischen Nachteilen besitzen BEV und FCEV auch diverse praktische Nachteile. Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge können nahezu so schnell betankt werden wie dieselbetriebene, üblicherweise in 10 Minuten oder weniger, BEV dagegen müssen ihre Batterien häufig über Stunden aufladen. Während neue Technologien wie Schnellladung oder Superkondensatoren den Prozess beschleunigen, erhöhen sie aber auch die Kosten der Fahrzeuge und der Infrastruktur. Zusätzlich sind Batterien für Nutzfahrzeuge mit hoher Reichweite sehr schwer und reduzieren dadurch die Nutzlast dramatisch. Beispielsweise könnte ein 40t-LKW je nach Batteriegröße und Fahrzeugkonstruktion 5t oder mehr verlieren. Elektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge sind heute nicht konkurrenzfähig und vorerst aufgrund ihrer hohen Kosten stark auf staatliche Subventionen angewiesen. Die Märkte benötigen

gen jedoch schon heute eine effektive und ökologische Lösung, die wirtschaftlich und nachhaltig zugleich ist.

5 Wasserstoff – Energiequelle und Kraftstoff der Zukunft

Wasserstoff ist das häufigste chemische Element im Universum. Aufgrund seiner hohen Energiedichte und endlosen Verfügbarkeit eignet er sich perfekt als nachhaltiger, "erneuerbarer" Energiespeicher. Ohne Wasserstoff wird das Stromnetz bereits im nächsten Jahrzehnt seine Grenzen erreichen und eine vollständige Lösung des Problems der schwankenden Versorgung durch erneuerbare Energien wird nicht möglich sein.



Bild 2: Von einer CO₂-basierten zu einer H₂-basierten Gesellschaft – die Notwendigkeit von Wasserstoff für eine nachhaltige Energie- und Mobilitätswende, © KEYOU

Wasserstoff ist der ideale Kraftstoff bzw. Energiespeicher der Zukunft. Selbst unter der Annahme, dass ab 2025 eine neue Generation von Batterien (Generation IV) zur Verfügung stünde, ist das Entwicklungs- und Kostenreduktionspotenzial von Wasserstoff aufgrund seiner spezifischen Speichereigenschaften im Vergleich zur Batterie um ein Vielfaches größer.

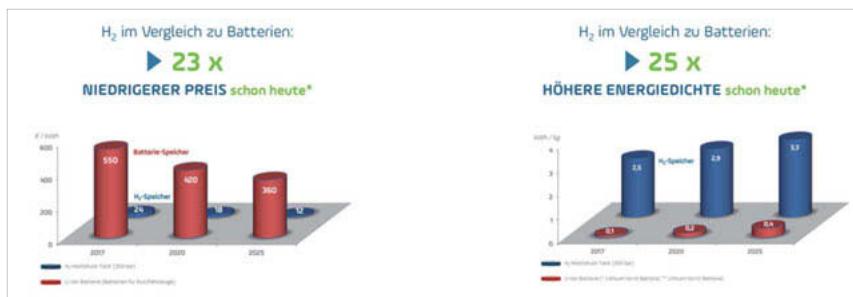


Bild 3: Batterie versus Wasserstoff im Vergleich, © KEYOU

Das bedeutet: Bei steigenden Verkaufszahlen können Wasserstoffspeicher im Vergleich zu Batteriespeichern überproportional kostengünstiger produziert werden. Es ist zu erwarten, dass der aktuell hohe Kostenvorteil von Wasserstoffspeichern in Zukunft weiter anwachsen wird.

Quellenangaben:

- Batteriespeicher: Herstellerangaben, Fraunhofer Institut ISI: Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030 / IKT für Elektromobilität, Abschlussbericht 2015, gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
- Wasserstoffspeicher: Herstellerangaben, Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Group; Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“
- Battery-Storage: Herstellerangabe / Marktrecherche (u.a. Angaben Akasol, Daimler)

6 Das 4-Komponentenkonzept von KEYOU

6.1 Vorteile von Wasserstoffverbrennungsmotoren

Die heutige konventionelle Antriebstechnologie im Nutzfahrzeugsektor basiert hauptsächlich auf dem Dieselmotor. Dank seiner Charakteristik mit hohem Drehmoment und hohem Wirkungsgrad hat sich der Diesel in diesem Segment mehr als etabliert. Der Dieselmotor muss deshalb Benchmark für alle künftigen alternativen Antriebstechnologien sein, so auch für den Wasserstoffverbrennungsmotor. Welche Vorteile hat ein Wasserstoffmotor gegenüber einem mit Diesel betriebenen konventionellen Motor?

6.1.1 Keine Emissionen

Die Hauptvorteile, H₂ als Kraftstoff zu nutzen, sind das Fehlen von Kohlenstoff im Gegensatz zu fossilen Treibstoffen sowie der große Zündbereich, der eine sehr magere und stabile Ver-

brennung ermöglicht. Heißt: bei der H₂-Verbrennung entstehen keine kohlenstoffhaltigen Abgase wie CO, CH oder das klimaschädliche Treibhausgas CO₂. Bei dem durch Schmiermittel verursachten kohlenstoffhaltigen Emissionen handelt es sich lediglich um Spurenelemente, die - weil so gering - kaum messbar sind. NOx entsteht hauptsächlich bei hohen Verbrennungstemperaturen durch in der Luft enthaltenen Stickstoff. Die Entstehung wird jedoch beim KEYOU-Verbrennungskonzept durch die magere Verbrennung, die mit einer AGR kombiniert wird, vollständig verhindert.

6.1.2 Hoher Wirkungsgrad

Eine weitere Besonderheit von Wasserstoff als Kraftstoff ist die extrem hohe Flammenverbrennungsgeschwindigkeit (6x schneller als Benzin), die einem „volumenkonstanten“ Prozess sehr nahekommt und somit einen hohen Wirkungsgrad impliziert. H₂ hat auch den größten Brennbereich aller Treibstoffe (4-75%), so dass sehr magere Gemische möglich sind. Am Prüfstand konnte bei einem Motor mit KEYOU-inside Technologie schon eine Steigerung des Wirkungsgrades im Vergleich zum Basisdieselmotor von über 5% erreicht werden (44,5% Maximum beim Prototypmotor). Der Wirkungsgrad kann durch den Einsatz eines H₂-Direkteinspritzkonzepts (DI) weiter erhöht werden.

6.1.3 Hohe Leistungsdichte

Die Brenneigenschaften und Thermodynamik von Wasserstoff erlauben eine hohe Leistungsdichte. Im Vergleich zu allen aktuellen und zukünftigen Verbrennungsmotoren bietet der Wasserstoffbetrieb das größte Potential bei Leistungsdichte und Drehmoment (siehe nachfolgende Bild). Gemeinsam mit dem Einsparpotential beim Kraftstoffverbrauch wird der H₂-Verbrennungsmotor auf diese Weise äußerst attraktiv für den Einsatz im Nutzfahrzeugsektor. Weitere Vorteile gegenüber anderen alternativen Antrieben sind Dauerhaltbarkeit, eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit sowie eine kosteneffiziente Produktion.

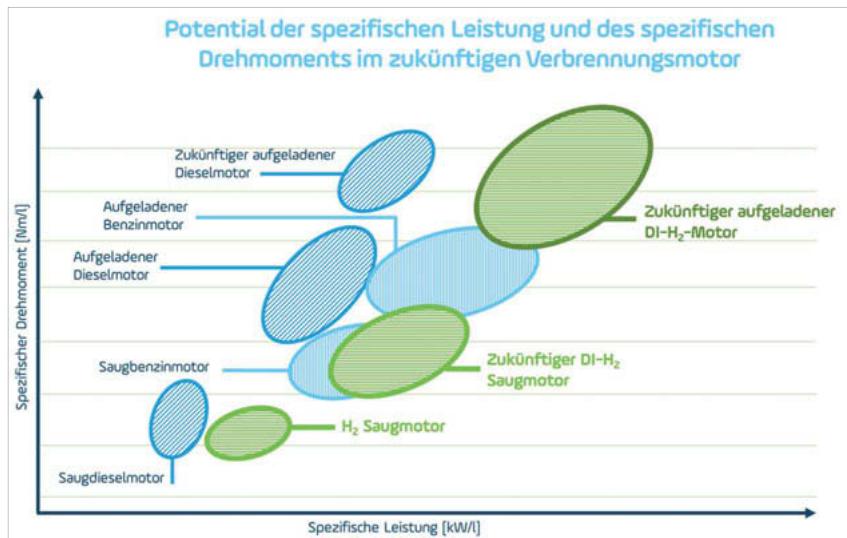


Bild 4: Größte Leistungsdichte beim H₂-Motor, © BMW, KEYOU

6.2 Das KEYOU-Wasserstoffverbrennungskonzept

Der Umbau eines konventionellen Motors zu einem H₂-Motor benötigt spezifische Modifikationen, ähnlich wie beim Umbau auf Erdgasantrieb. Nötige Anpassungen sind die Luft- und Kraftstoff-Leitungen, die Wahl eines geeigneten Turboladers, die Integration der Gaseinblasung und der Zündanlage sowie die Entwicklung eines stabilen Verbrennungsprozesses durch optimale Gemischbildung im Brennraum.

6.2.1 Magerverbrennungs-Prozess

Die Umrüstung eines Dieselmotors zu einem emissionsfreien H₂-Motor beinhaltet die Umstellung von der Dieselvebrennung auf eine aufgeladene, mageres und fremdgezündete Verbrennung. Durch die Einzigartigkeit von H₂ als Treibstoff kann der Motor effizient bis zu einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis von λ 5 betrieben werden. Im KEYOU Luft-Kraftstoff-Kennfeld liegt es dauerhaft über λ 2. Diese Verbrennung in Kombination mit innovativer AGR-Regelung verhindert die Bildung von NOx. Die folgende Bild zeigt die Bildung von NOx über dem Luft-Kraftstoff-Verhältnis. Es ist zu sehen, dass sich die Stickoxidbildung (schwarze Kurve) bei einer mageren Verbrennung mit $\lambda > 2$ Null annähert.

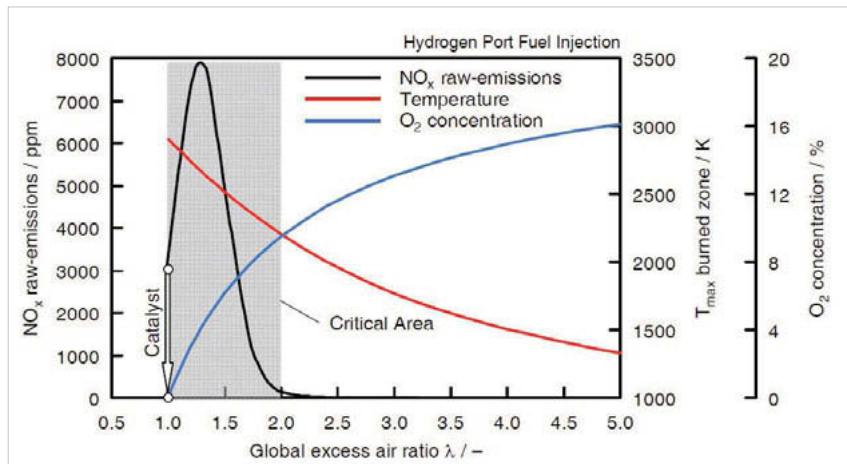


Bild 5: H₂-Motor mit KEYOU-inside Technik: NO_x Emissionskontrolle,
Prof. Hermann Rottengruber, Universität Magdeburg

6.2.2 Turbo-Aufladung

Durch die magere Verbrennung steht weniger Kraftstoff für die Verbrennung mit dem Sauerstoff im Brennraum zur Verfügung. Um die niedrigere spezifische Leistung zu kompensieren, integriert KEYOU eine H₂-spezialisierte Aufladung, die bei optimaler Kalibrierung das benötigte Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen bereitstellt. So kann der Brennraum mit mehr Sauerstoff versorgt und mehr Kraftstoff zugeführt werden, wodurch eine Leistungssteigerung erreicht wird.

6.2.3 Saugrohreinblasung (PFI)

Die Wasserstoffeinblasung erfolgt in der ersten Generation per Saugrohreinblasung (Port Fuel Injection - PFI). Der Kraftstoff wird im Ansaugtrakt direkt vor dem Einlassventil eingeblasen. Durch diese Methode ist eine individuelle Einblasung und exakte Dosierung der Kraftstoffmenge pro Zylinder möglich. Dies bewirkt einen ruhigen Lauf und eine homogene Leistungsentfaltung.

6.2.4 Abgasrückführung (AGR)

Aufgrund von Kohlenstoffpartikeln aus der Dieselverbrennung ist der AGR-Einsatz bei Dieselmotoren limitiert. Da Wasserstoff keinen Kohlenstoff enthält, ist diese Beschränkung bei Wasserstoffverbrennungsmotoren hinfällig. Hierdurch und durch die schnelle Brennge-

schwindigkeit von Wasserstoff ist eine hohe AGR-Rate möglich, die durch eine verringerte Verbrennungstemperatur die NOx-Entstehung verhindert, ohne Effizienz einzubüßen.

6.2.5 H2-SCR-Katalysator

Der SCR-Katalysator wurde speziell für den Einsatz mit Wasserstoff als Reduktionsmittel entwickelt (statt Ammoniak NH₃ wie in heutigen Dieselmotoren). Mit Hilfe dieses Katalysators kann praktisch jeder Stickoxid-Überrest aus den Abgasen eliminiert werden. Durch dieses neuartige Katalysatordesign werden keine zusätzlichen Verbrauchsstoffe wie AdBlue benötigt. Die Entwicklung eines solchen H₂-SCR gibt die zusätzliche Freiheit, bei Bedarf die Leistungsdichte weiter zu erhöhen und gleichzeitig emissionsfrei zu bleiben.

6.2.6 Motorkonstruktion – H₂-verbrennungsspezifische Komponenten

Um eine optimale Leistungsfähigkeit zu erreichen, müssen die speziellen (thermodynamischen) Eigenschaften der H₂-Verbrennung in Betracht gezogen und dementsprechend die Komponenten der Luft- und Kraftstoffführung neu entwickelt oder angepasst werden. Modifikationen im Brennraum sowie an der Zündanlage ermöglichen eine stabile Verbrennung ohne Anomalien im gesamten Betriebskennfeld.

6.3 Technischer Ausblick - Direkteinblasung (DI)

Parallel zu den aktuellen Entwicklungen arbeitet KEYOU an einer modifizierten Wasserstoffverbrennung. Die aktuelle äußere Gemischbildung (PFI) wird im nächsten Evolutionsschritt durch eine innere Gemischbildung (DI) ersetzt. Hierdurch ist eine weitere Steigerung von Wirkungsgrad und Leistungsdichte möglich.

	Benzin PFI	H ₂ -PFI	H ₂ -DI	H ₂ -DI inkl. Turbo
Bedingungen: $l = 1$ $V_0 = 1000 \text{ ml}$ $h = \text{konst.}$ $h_{\text{vol}} = \text{konst.} = 1$ $T = \text{konst.}$				
Kraftstoffmenge [ml]	17	296	420	420
Luftvolumen [ml]	983	704	1000	1000
Gemischbrennwert [MJ/m³]	3,9	3,2	4,5	up to 7,8
Ausgangsleistung [%] (Im Vergleich zu Benzin)	100	82	117	up to 200

Bild 6: Einschätzung des Potentials der H₂-Verbrennung (Verbrennung mit PFI und DI), Prof. Herrmann Rottengruber (Universität Magdeburg)

7 Innovationssprung im Bereich Wasserstoffverbrennungsmotoren

Der Einsatz von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren ist eine an sich bewährte Technologie. Unterschiedliche Automobilhersteller (z.B. BMW, MAN, Ford, Mazda) haben zwar das Potential der Wasserstoffverbrennung bis ins letzte Jahrzehnt kontinuierlich erforscht, Wirkungsgrad und Leistungsdichte blieben allerdings hinter den Erwartungen zurück.

Mit dem innovativen, proprietären Technologiekonzept von KEYOU - Einsatz einer intelligenten, mageren Verbrennung mit Abgasrückführung (AGR), Turbo-Aufladung und effizienter Einblasung – kann jedoch gezeigt werden, wie leistungsstark, effizient und emissionsarm Wasserstoffverbrennungsmotoren der neuesten Generation sein können.

Die nachfolgende Bild zeigt die wesentlichen Komponenten des technischen Konzeptes sowie den Innovationssprung, der damit verbunden ist.



Bild 7: Innovationssprung mit KEYOU-inside Technik bzw. dem 4-Komponentenkonzept,
© KEYOU

Eine weitere Variante des Wasserstoffverbrennungsmotors ist die Hybridvariante. Mit der spezifischen KEYOU-inside Technik würde ein hybridisierter H₂-Motor, integriert bspw. in einem städtischen Bus, in der Kraftstoffeffizienz einen Brennstoffzellenbus übertreffen.

7.1 Prüfstandergebnisse – Validierung der Technologie

7.1.1 Drehmoment- / Leistungskurve

In Abb. 8 ist die Leistung des Prototypmotors zu sehen. Die maximale Leistung hier beträgt 182 kW bei 2000 U/min, das maximale Drehmoment 990 Nm bei 1300 U/min (Stand Mai 2018).



Bild 8: Motor-Ausgangsleistung; Offizielles Prüfstandergebnis vom Mai 2018

7.1.2 Motor-Wirkungsgrad-Kennfeld

Auf dem Prüfstand konnten auch sehr gute Ergebnisse im Hinblick auf den Wirkungsgrad erzielt werden: Der Wirkungsgrad des Basisdieselmotors konnte mit einem Maximum von 44,5% um rund 5% übertreffen werden (Stand Mai 2018).

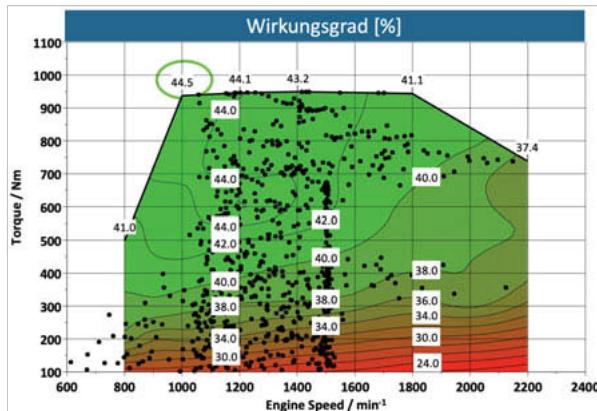


Bild 9: Wirkungsgrad; offizielle Prüfstandergebnisse, Stand Mai 2018

7.1.3 NOx-Emissionen-Kennfeld

Die aktuelle EU6 NOx-Grenze von 0,46 g/kWh unterschreitet der KEYOU-Motor mit lediglich 0,04 g/kWh deutlich – bereits ohne Abgasnachbehandlung.

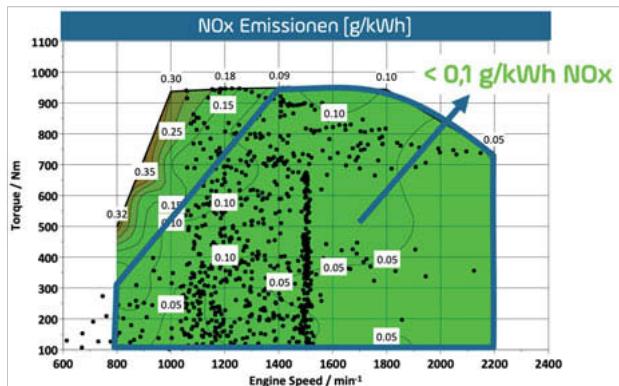


Bild 10: Spez. NOx-Rohemissionen; offizielle Prüfstandergebnisse, Stand Mai 2018

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das hier vorgestellte Konzept eines Wasserstoffmotors bietet viele ökonomische und ökologische Vorteile im Vergleich zu anderen Antriebstechnologien:

- Hohe Leistung und Drehmoment (ähnlich wie Diesel)
- Hohe Reichweiten (ähnlich wie Diesel)
- Einfache und schnelle Betankung (ähnlich wie Diesel)
- Langlebigkeit, Robustheit und einfache Instandhaltung (ähnlich wie Diesel)
- Hohe Verfügbarkeiten
- Niedrige Kosten (ähnlich wie CNG-Fahrzeuge)
- Kosteneffiziente Produktion (Infrastruktur und Technologie existieren)
- Unabhängig von seltenen Erden (im Gegensatz zu BEV oder FCEV)
- Bessere Gesamt-CO₂-Bilanz als BEV oder FCEV (aktueller Energiemix GER)

Es zeigt sich, dass der Zielkonflikt zwischen Umweltschutz und Kundennutzen mit einem Wasserstoffverbrennungsmotor am besten gelöst werden kann. Ein weiteres Plus: Die EU hat in Zusammenhang mit der Vorgabe von CO₂-Grenzwerte für Nutzfahrzeuge den Wasserstoffverbrennungsmotor als „Zero Emission-Fahrzeug“ klassifiziert. Somit bekommen OEMs eine Technologie an die Hand, um die neuen, strengen EU-CO₂-Vorgaben für den Nutzfahrzeugsektor erfüllen zu können – als attraktive Alternative zu Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge. Ein weiterer Vorteil: Vorhandene Produktionsinfrastrukturen und das Mitarbeiter-Know-how der OEMs können weiter genutzt werden, außerdem profitieren heutige Automobilhersteller von einer reifen Zulieferindustrie, milliardenschwere Investitionen sind nicht notwendig.

	DIESEL	ELEKTRISCH	BRENNSTOFFZELLE	KEYOU H ₂
Klimaschutz	✗	→	✓	✓
Air quality	✗	✓	✓	✓
Kosten	✓	✗	✗	✗
Fahrreichweiten	✓	✗	✓	✓
Nutzlast	✓	✗	✗	✓
Zuverlässigkeit	✓	✗	✗	✓
Lebensdauer	✓	✗	✗	✓

Bild11: Erfüllungsgrad heutiger Anforderungen an alternative Antriebstechnologien,

© KEYOU

Die Umweltbilanz eines wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotors ist im Vergleich zu allen anderen Antriebsarten äußerst positiv, die Technik nachhaltig und sauber zugleich, da keine Seltenen Erden verbraucht, noch giftige Rohstoffe verwendet werden.

Fazit: OEMs werden in die Lage versetzt, ihre Fahrzeuge mit einer robusten, zuverlässigen und nachhaltigen Technik auszustatten, Endkunden profitieren von der kosteneffizienten Herstellung und extremer Alltagstauglichkeit und bekommen leistungsstarke und saubere Fahrzeuge zu einem attraktiven Preis. Am Ende profitieren Mensch und Natur gleichermaßen.

9 Literaturhinweise

- [1] Adolf, Jörg; Arnold, Karin; Balzer, Christoph H. und Louis, Jurgen: Wasserstoff – Energie der Zukunft? Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 67 (2017), 11, S. 74-77
- [2] *Fouquet, M. C. T.:*
Niedrigstemissionskonzept für einen wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor 2012
- [3] *Grabner, P.:*
Potentiale eines Wasserstoffmotors mit innerer Gemischbildung hinsichtlich Wirkungsgrad, Emissionen und Leistungsdichte
Dissertation, Graz 2009
- [4] *Eichlseder, H.; Klem, M.:*
Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden 2010
- [5] *Rottengruber, H.; Wiebicke, U.; Woschni, G.; Zeilinger, K.:*
Wasserstoff-Dieselmotor mit Direkteinspritzung, hoher Leistungsdichte und geringer Abgasemission. Teil 3: Versuche und Berechnung am Motor. MTZ Motortechnische Zeitschrift 61 (2000) Nr. 2, S. 122–128

From customer requirements to the optimal hybrid powertrain

High-performance hybrid transmission for future plug-in hybrid drives

Dr. **Jörg Müller, Jens Liebold, Dr. Christoph Danzer,**
IAV GmbH, Chemnitz/Stollberg

Zusammenfassung

Dieses Paper beschreibt einen Weg, wie man mittels spezieller IAV-Vorentwicklungs-Werkzeuge, die richtigen Komponenten eines Antriebsstranges (Batterie, Elektro und Verbrennungsmotoren, Getriebe) findet, um die heutigen Kundenanforderungen bestmöglich zu erfüllen. Darüber hinaus wird daraus ein neues, leistungsstarkes Hybridkonzept abgeleitet, welches hochleistungsfähige Fahrzeuge mit guter Fahrleistung und niedrigem Kraftstoffverbrauch ermöglicht.

Um eine geeignete Antriebsstranglösung für zukünftige Fahrzeuge zu definieren, nutzt die IAV einen fortschrittlichen Vorentwicklungsprozess, der systematische computergestützte Entwicklungswerkzeuge intensiv einsetzt. Die Werkzeugkette beginnt mit der "Antriebsstrang-Synthese", welche die Startwerte und Randbedingungen für die folgenden Entwicklungsschritte bestimmt. Weitere spezialisierte Werkzeuge wie "Getriebe-Synthese" und "E-Motor-Synthese" finden die richtigen Lösungen, welche diese Anforderungen optimal erfüllen.

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist ein Antriebsstrangkonzept, das auf einem Benzinmotor, kombiniert mit einem Elektromotor und einem 4-Gang-Planetengetriebe, basiert. Ein erstes 3D-Design des Getriebes zeigt, dass es möglich ist, den Elektromotor und den Radsatz des Getriebes in ein Gehäuse von ca. 360 mm Länge zu integrieren. Das Ziel-Fahrzeug des B-Segment kann in ca. 4 Sekunden von 0 auf 100 km/h beschleunigen und verbraucht 4,0 l/100 km Benzin im NEFZ, ohne Energie zu verwenden, die vor dem Start des Antriebszyklus in der Batterie gespeichert wurde („Charge-Sustaining“ Modus).

Abstract

This paper describes a way to right-size powertrain components (battery, e-motor(s), ICE, transmission) to fulfil today's customer requirements in a best possible way by using special IAV's tools for advanced development. Furthermore a new powerful hybrid concept will be derived which enables high performance vehicles with good driving performance and low fuel consumption.

To define a suitable powertrain solution for future vehicles IAV uses an advanced development process which makes intensive use of systematic computer-aided development tools. The tool chain starts with the "Powertrain synthesis" which determines the initial boundaries for the following development steps. Further specialized tools like "Transmission synthesis" and "E-motor synthesis" find the right solutions which fulfil these requirements in a best possible way.

The result of this investigation is a powertrain concept that bases on a gasoline engine combined with an electric motor which is connected to a 4-speed planetary automatic transmission. A first 3D-design of the transmission shows that it is possible to pack the electric motor and also the whole gear set into a housing of around 360 mm length. The target B-segment vehicle may accelerate in around 4 seconds from 0 to 100 *kph* and consume 4.0 *l/100 km* gasoline in the NEDC without using energy which was stored in the battery before the start of the drive cycle (charge-sustaining mode).

OBJECTIVE OF FUTURE HYBRID DRIVES

Plug-in hybrids offer great potential for meeting future fuel consumption and emission targets and satisfying growing mobility demands. They permit local pollution-free urban travel combined with dynamic performance as well as high driving comfort and range. At the same time, defining the powertrain architecture is getting increasingly complex [1].

In current scenario, the global focus is on drive systems where a hybrid derivative can be derived to the greatest possible extent as a modular, low-cost solution, based on a conventional transmission and using as many carry-over parts as possible. Particularly where high-powered full hybrids are concerned, ideal prerequisites are provided by integrating the electric motor (EM) at the input shaft to the internal combustion engine (ICE) with an additional disconnecting clutch (K0). Essential hybrid functions can be implemented with this kind of P2 arrangement as a parallel hybrid.

Free adaptability of the EM offers advantages compared to the electrically power-split continuously variable transmission (eCVT) with two EMs integrated in the transmission. The size and output of the electric motor can be changed with minimum impact on the remaining transmission thanks to its structural position and design in the P2 hybrid at the input shaft. Furthermore – in contrast to the eCVT – the EM power map does not have to correlate with the torque characteristics of the ICE. This warrants on the one hand more efficient use of the electric power for hybrid functions and, on the other hand, more flexible use for various vehicle/ICE combinations.

Pending emission legislations will demand much greater electrification of the vehicle fleet. This puts the motivation for a modular powertrain architecture as described before into perspective. Economies of scale will result in new dedicated hybrid transmissions (DHTs) as a technically and economically appropriate further development of currently available hybrid generations.

A major argument in favor of DHTs is the greater geometrical and functional integration of the EM in the transmission in order to generate further synergy effects in future. Important aspects here include reducing the number of gears in the transmission, dispensing with the classic mechanical reverse gear and today's K0 clutch. The reduced complexity of the gear set compared to current systems with up to ten gears will help to reduce costs, weight and inertia. These development trends are currently investigated in various studies. [2, 3] This paper describes the DHT potential as illustrated by a P2 hybrid for high-power applications. A major contribution comes from a new computer-based method for achieving high development safety when devising new technologies. Furthermore the paper concludes by looking at the chances for future DHTs as P2.5 hybrids.

DETERMINING APPLICATION-OPTIMIZED POWERTRAINS

The growing complexity of future powertrains is currently making engineers rethink conventional development processes that focused primarily on optimization of single powertrain components. Increasing significance is being attached to interaction between individual powertrain components, particularly in hybrid powertrains with high levels of electrification as well as conventional and all-electric systems.

Fig. 1 shows the development process and illustrates how powertrain configurations are determined with a high overall benefit for implementing the technical and economic requirements. IAV's powertrain synthesis tool plays a central role in the process chain of advance and concept development [1]. This development methods permits systematic generation, analysis and evaluation of all technically suitable powertrain configurations. Every powertrain is based on parameters and maps for ICE, transmission, EM, energy storage system and vehicle and is examined with regard to drive topology, operating strategy and driving cycles in terms of its properties such as emissions, performance and system costs. The final benefit analysis takes account of limit filters and weighting factors for all computed properties to produce a ranking of the most beneficial powertrain configurations with high overall benefit.

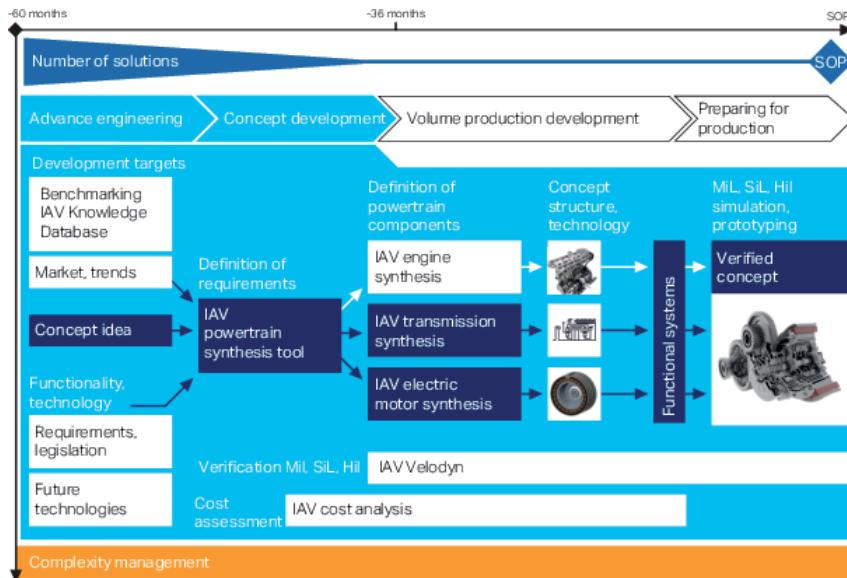


Fig. 1: Process for determining application-optimized powertrain configurations – dark blue development path as a development process

In turn, the determined preferential properties for individual powertrain components form the input values for downstream processes, such as IAV's combustion engine synthesis, transmission synthesis [4] and electric motor synthesis [5], Fig. 1. On completing the computations, preferred variations are suggested for specific technological implementation of the respective components, which then have to be put into greater detail in the ongoing development process.

GENERATION OF AN EFFICIENT PLUG-IN HYBRID POWERTRAIN

The following looks at the potential and efficiency of this development process as illustrated by a new plug-in hybrid by way of example, as it is shown in Fig. 1, with the dark blue development path. The study is based on a B-segment vehicle weighing 1.4 t in combination with a powerful 2 – l turbo gasoline engine with 213 kW power and maximum torque of 400 Nm. The powertrain is to be designed as a front-transverse architecture with a four-wheel drive option.

The aim is to determine a DHT concept in P2 configuration allowing for vehicle-specific packages. A target vehicle should offer very sporty performance with acceleration to 100 km/h in less than 4 s. On the other hand, fuel consumption rates are to be dramatically reduced compared to commercially available non-hybrid vehicles with comparable performance levels. Other boundary conditions include acceleration in electric mode to 100 km/h in less than 10 s to gather with electric and hybrid maximum speeds of at least 160 km/h and 270 km/h respectively. The electric cruising range is stipulated as 60 km with a battery of 12 kWh energy content and an effective State of Charge (SoC) range of 75 %.

The following results of the powertrain synthesis feature transmissions with 3 to 7 gears, spreads of 3.0 to 9.0, starting ratios from 8 to 16 and transmission ratio series with differing progressions. There are 6,508 transmission variants in this search space. Another 790 electric motor configurations result from incrementing maximum output and maximum torque between 60 and 120 kW respectively 200 Nm and 350 Nm for different variations in efficiency maps. The combination of all parameter variants and maps generates altogether 5.1 million powertrain configurations. Fig. 2 shows example sensitivities for these studies in the context of cycle consumption and driving performance.

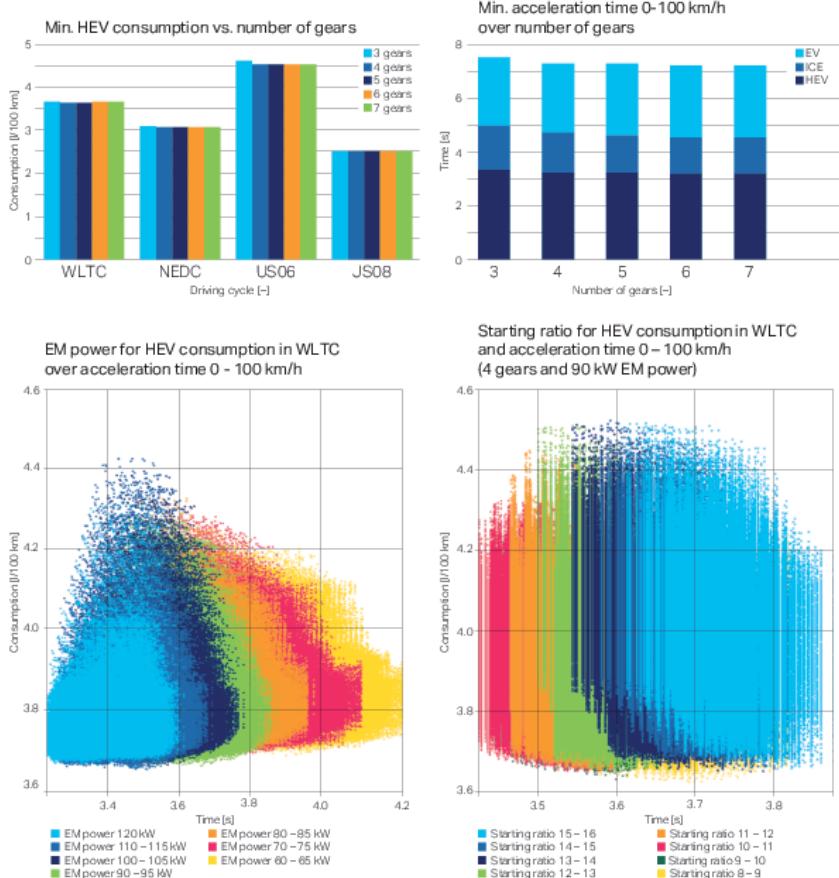


Fig. 2: Results of the powertrain synthesis – sensitivities in the context of cycle consumptions and driving performances

For the four computed driving cycles WLTC, NEDC, US06 and JC08, minimum consumption in hybrid mode (HEV mode), Fig. 2 (top left), and acceleration times to 100 km/h in various operating modes, Fig. 2 (top right), are practically independent of the number of gears. The only slight improvements to be seen are when changing from 3 to 4 gears. The variation in EM output, Fig. 2 (bottom left), shows that there are scarcely any further consumption advantages in the WLTC and improvements in acceleration at least to 100 km/h once electric output exceeds 90 kW.

This defines the initial boundary conditions for the new hybrid transmission. Four gears and electric output of 90 kW are necessary to fulfil the requirements. Suitable starting ratios are between 10 and 12, Fig. 2 (bottom right). The benefit analysis results also provide preferred spreads in the gear set of between 4 and 5 with minimum progression impact on the transmission ratio series. Furthermore, electric motors with maximum torques of 250 Nm to 300 Nm and efficiency maps of permanent magnet synchronous machines are shown to be altogether beneficial.

NEXT STEPS: TRANSMISSION SYNTHESIS AND ELECTRIC MOTOR SYNTHESIS

In the next computation step – the transmission synthesis – the ascertained requirements for the transmission form the input values for systematic, computer-based generation and assessment of new transmission structures for various technologies. The following investigations are limited to planetary automatic transmissions (AT). Concepts with two planetary gear sets and four or five shift elements are appropriate to implement the required functionality, resulting in about 475,000 possible solutions.

The preferred variant shown in Fig. 3 with two planetary gear sets and four shift elements A to D, two of which are expediently designed as brakes, offers high torque density at comparatively low engine speeds and high gearing efficiency. Stationary gear ratio of -2.1 in each case offer the potential for a radial, compact design and supply a progressive ratio series with starting ratio in the gear set of 3.1 and a spread of 4.6. The additional drive-side clutch K0 permits decoupling of the ICE in electric mode. Thus obviates the need for a conventional reverse gear.

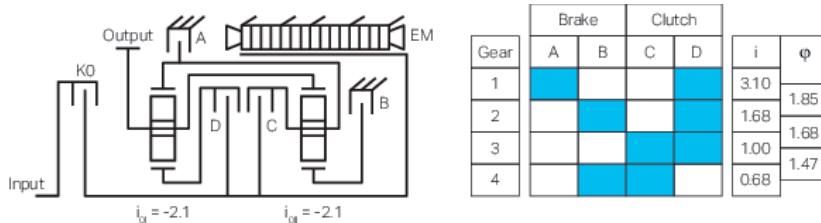


Fig. 3: Four-gear automatic transmission of the IAV PowerHybrid with two planetary gear sets – transmission structure (left) and shift logic

Similarly, the results of powertrain synthesis can be used in combination with EM synthesis to generate a preferred variant for the permanent magnetized synchronous motors. Comprehensive computation is necessary to maximize torque density without impairing efficiency,

torque ripple, power factor or other characteristics. The stipulated package reduces the search space to a few ten thousand geometry variants. The 4,372 benefit analysis solutions shown in Fig. 4 all fulfil the required general geometrical and technical conditions using typical materials. The preferred variant for design implementation consists of a suitable compromise between total losses, material costs and other characteristics.

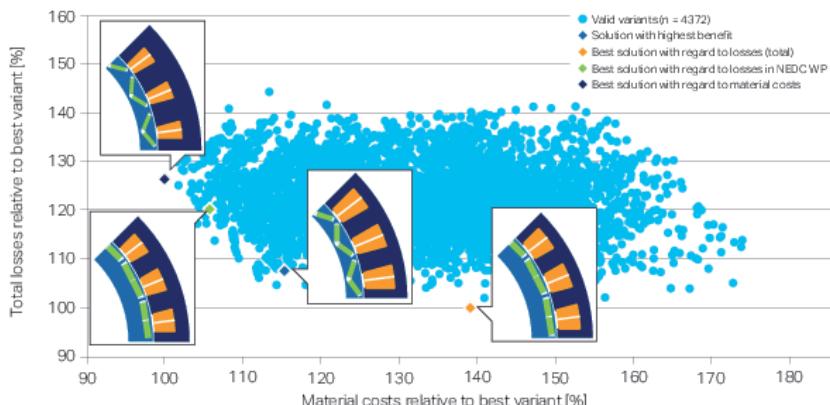


Fig. 4: Results of the EM synthesis – comparison based on material costs and total losses relative to best variant

These results act as the basis for 3-D design implementation of the IAV PowerHybrid, Fig. 5, for input torques up to 700 Nm (ICE and EM) and input speeds of up to 7000 rpm . An axle ratio of 3.5 results in a maximum total ratio of approximately 11. The transmission structure allows high integration of the gear set elements within the EMs rotor with many carry-over parts for reducing costs. The permanent magnet synchronous machine has an active length of 100 mm and a total length of 130 mm. A transmission length of only 360 mm is possible despite the high input torque, and a weight of just about 110 kg including electric motor without operating fluids.

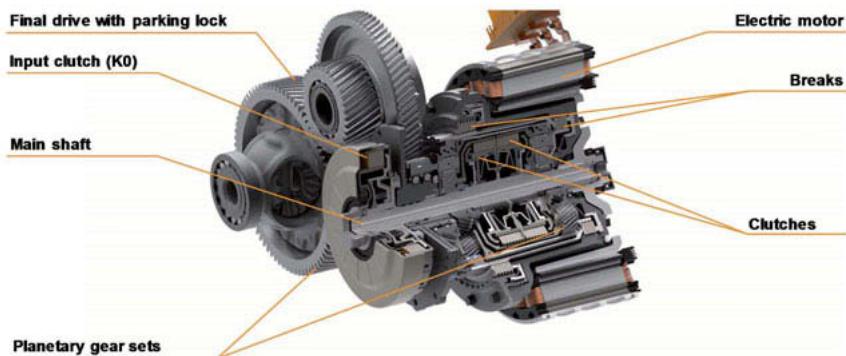


Fig. 5: 3-D design of the IAV PowerHybrid – despite the high input torque, a drive length of only

CONCLUSION AND OUTLOOK

The development of future powertrains will have to take account of interaction between the powertrain components as a prerequisite for competitive solutions. IAV's method of powertrain synthesis fulfils the demands made of the individual components for new powertrains like DHTs. Subsequent synthesis programs take these results as the basis for detailed technical implementation of the components for the ICE, transmission and EM. The development process is demonstrated by a new powerful plug-in hybrid with P2 architecture that offers very sporty performance and low fuel consumption rates.

Further potential for future DHTs consists of connecting the EM to a gear set internal shaft. Such P2.5 hybrid solutions offer additional advantages such as larger transmission ratios between EM, ICE and transmission output. As a result, it is quicker and easier to restart the ICE with the vehicle both stationary and moving, while enhancing traction power in electric mode as well as the boost and recuperation capability with somewhat lower maximum torques at the EM. Rating the electric motor therefore focuses more on its efficiency at cycle-relevant operating points with high time shares instead of maximum torque. This also reduces the package demand of the EM.

For the first time a DHT can be used in P2.5 arrangement with continuously variable transmission ratio between ICE and transmission output with just one electric motor by adding the speeds of both drives with planetary gear sets. This new hybrid function helps, for example, to improve efficiency when tapping into the primary energy. It is also suitable for flexible drive strategies and new driving modes, including wear free, highly efficient start with

the ICE – without a separate start-up element also with minimum SoC of the traction battery – or comfort-focused continuously variable driving as demonstrated by current eCVTs.

- [1] Danzer, C.; Vallon, M.; Wukisiewitsch, W.; Kratzsch, M.: Powertrain Synthesis for the Design of Complex System Configurations. In: MTZworldwide 77 (2016), No. 9, pp. 42-46
- [2] Chachra, D.; Parab, A.; Seth, B.: A parallel hybrid transmission technology. 13th CTI Symposium Automotive Transmissions, Berlin, Germany, December 2014
- [3] Rihn, M.: A single hybrid powertrain for HEVs, PHEVs and E-REVs. 13th CTI Symposium Automotive Transmissions, Berlin, Germany, December 2014
- [4] Resch, R.; Müller, J.: Development of highly functional power-split transmissions for future commercial vehicles. In: ATZoffhighway, October 2016, pp. 6-13
- [5] Müller, J.; Liebold, J.; Schuhmann, T.; Mayer, M.: Optimisation of Electric Motors for Traction Drives. In: ATZworldwide 117 (2015), No. 10, pp. 10-14

Schaeffler E-Mobilität – Systeme und Komponenten für hybridisierte und elektrische Antriebe

Dipl.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. **Andreas Englisch**, Schaeffler, Bühl

Kurzfassung

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten Antriebsstränge zu hybridisieren oder zu elektrifizieren. Im Rahmen dieses Beitrags werden die Systeme und Komponenten von Schaeffler (P2-P5, BEV und DHT) vorgestellt und bewertet. Dabei spielen neben der Architektur die zu realisierenden Funktionen eine große Rolle. Eine große Herausforderung stellt für die OEMs und die Zulieferer, unter anderen, die Begrenzung der technisch und wirtschaftlich möglichen sowie sinnvollen Varianten dar.

Neben der Betrachtung der Spannungslage, wird auf den Grad der Integration der Komponenten eingegangen und die zukünftige Entwicklung bis hin zum DHT aufgezeigt. Dabei wird auch versucht die zukünftige Entwicklung der unterschiedlichen Märkte so weit als möglich zu berücksichtigen.

There are a variety of ways to hybridize or electrify drive trains. The article presents and evaluates the systems and components of Schaeffler (P2-P4, BEV and DHT). In addition to the architecture, the functions to be implemented play an important role. An essential question for the OEM's and suppliers is, among other things, the limitation of the technically and economically possible and meaningful variants.

In addition to the consideration of the voltage situation, the degree of integration of the components is discussed and the future development up to the DHT is shown. It also tries to take the future development of the different markets as far as possible into account.

1. Markt

Schaeffler geht bei der weiteren Entwicklung des PKW Marktes davon aus, dass im Jahr 2030 30% der Fahrzeuge mit einem rein elektrischen Antrieb ausgestattet sein werden. 40% werden eine Hybridisierung aufweisen und weitere 30% werden mit einem klassischen Verbrennungs-

motor ausgestattet sein. Diese Zahlen würden langfristig eine Erreichung der angestrebten Ziele zum Schutz des Klimas ermöglichen. Innerhalb der elektrifizierten Antriebsstränge wird sich ein breites Spektrum an unterschiedlichen technischen Lösungen ausbilden.

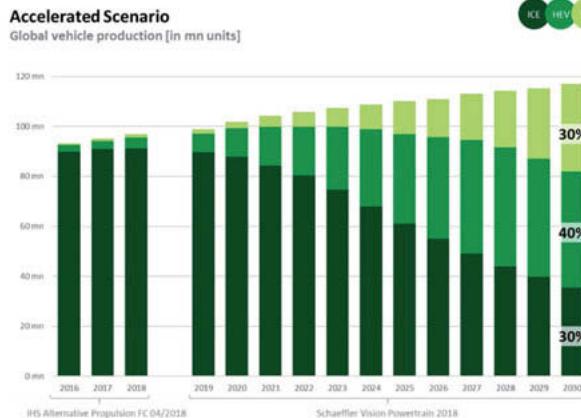


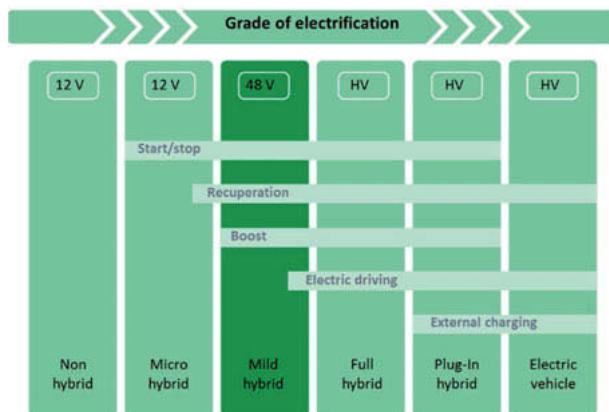
Bild 1: Stückzahlentwicklung Hybridisierung und Elektrifizierung

Die größte Herausforderung stellt dabei in den kommenden Jahren die Entwicklung wirtschaftlicher Lösungen bei gleichzeitig limitierten Stückzahlen dar. Sich ändernde gesetzliche Rahmenbedingungen erschweren die Auswahl der technischen Lösungen weiter. Gleichzeitig müssen für die Endkunden attraktive Rahmenbedingungen geschaffen werden, hinsichtlich Preis, Performance der Produkte und der Infrastruktur.

2. Funktionen

Die Auswahl eines geeigneten Systems hängt ganz wesentlich von den angestrebten Funktionen ab. Wesentliche Hybridfunktionen lassen sich bereits mit 48 V Systemen realisieren. Bei diesen Systemen stellt sich eher die Frage, ob den Erwartungen des Endkunden hinsichtlich der Performance entsprochen werden kann. Einen weiteren kritischen Betriebspunkt stellt bei den 48 V Systemen das Wiederstartverhalten des Motors aus dem elektrischen Betrieb des Fahrzeuges dar. Diese Betriebszustände sind mit Hochvoltsystemen ohne Zusatzaufwand darstellbar. Bei 48 V Systemen ist im Einzelfall zu prüfen, ob ein Zusatzstartsystem erforderlich ist. Es können aber bereits mit 48 V Systemen Verbrauchseinsparungen von bis zu 16% erzielt werden.

Tabelle 1: Funktionen



3. Topologie

Neben den im Markt in großer Zahl vorhandenen leistungsverzweigten Hybridgetrieben (Toyota Prius), haben sich parallele Architekturen etabliert [2]. Darüber hinaus gibt es Strukturen, die einen parallelen oder seriellen Betrieb (Mitsubishi Outlander) ermöglichen. Parallele Strukturen sind vorteilhaft, wenn

- der Antriebsstrang vornehmlich auf die Rückgewinnung der kinetischen Energie ausgelegt wird (Mild-Hybrid).
- nur ein E-Antrieb eingesetzt werden soll.
- das Basisgetriebe unverändert übernommen werden soll.
- das Fahrprofil hohe Anteile hoher Geschwindigkeiten aufweist.
- man eine hohe funktionale Redundanz benötigt (volle Funktion bei leerer Batterie).

Bei ausreichender elektrischer Leistung und eingeschränkter Redundanz kann die Getriebesstruktur entfeinert und dadurch kostengünstiger dargestellt werden. Ein weiterer Vorteil ist zu erzielen, wenn der Betriebsbereich des Verbrennungsmotors eingeschränkt werden kann. Das kann durch die folgenden Betriebsarten erreicht werden:

- stufenloser Betrieb (eCVT, leistungsverzweigt)
- serieller Betrieb
- begrenzter verbrennungsmotorischer Fahrbereich (mechanischer Durchtrieb des Verbrennungsmotors ab einer Grenzgeschwindigkeit bis zur Höchstgeschwindigkeit)
- rein elektrischer Betrieb im unteren Geschwindigkeitsbereich.

Die besten Ergebnisse lassen sich in der Kombination der Betriebsarten erzielen, wofür neben speziellen Getriebestrukturen auch die dedizierte Auslegung des Verbrennungsmotors und der E-Antriebe notwendig ist. Zur Abstimmung von Performance, Verbrauch, Fahrbarkeit und akustischem Verhalten kommt der Betriebsstrategie in diesen speziell zugeschnittenen Antriebssträngen besondere Bedeutung zu.

Vornehmlich bei parallelen Strukturen kommen unterschiedliche Topologien bezüglich der Position zum Tragen, an der die Leistung des E-Antriebes in den Antriebstrang eingekoppelt wird (P0 bis P4).

Kombiniert man den Grad der Hybridisierung und die Topologie, so ergeben sich insgesamt schon 16 sinnvolle Möglichkeiten [1], **Bild 2**.

Die Komplexität auf der Systemebene steigt erheblich, wenn zusätzlich die in einem Antriebsbaukasten vorgesehenen Getriebevarianten (einschließlich seriell und leistungsverzweigt) betrachtet werden. Hier entstehen bereits mehr als 40 technisch sinnvolle Varianten, **Bild 3**.

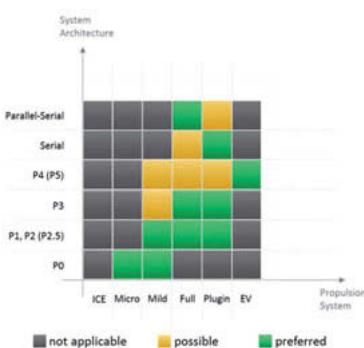


Bild 2: Topologie

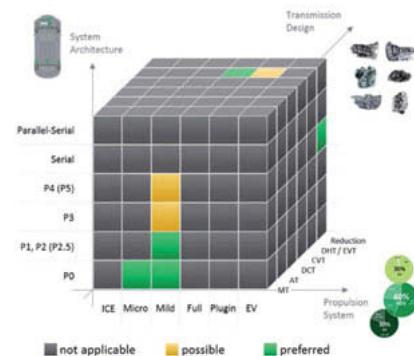


Bild 3: Architektur

Betrachtet man in diesem Zusammenhang noch die erforderlichen Varianten hinsichtlich der gewünschten Leistungen in einem Bereich von 20 – 200 kW wird ersichtlich vor welcher Aufgabe die gesamte Automobilindustrie steht.

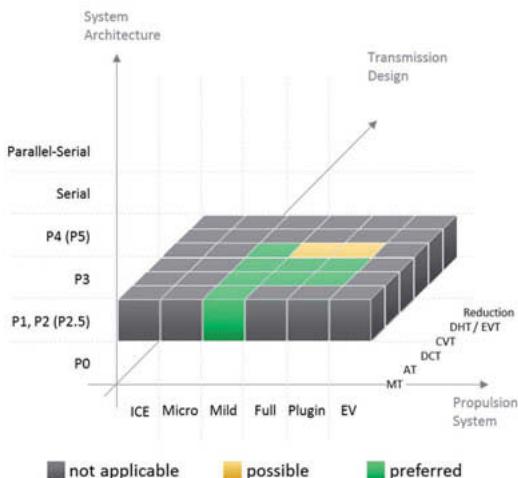


Bild 4: P2 Architektur [3]

4. P2 48V und HV Architekturen

Bild 4 zeigt, dass bereits mit den P1 und P2 (P2,5) Varianten 10 Möglichkeiten bestehen Hybridantriebe zu generieren.

4.1. P2 48V Mild Hybrid Architekturen

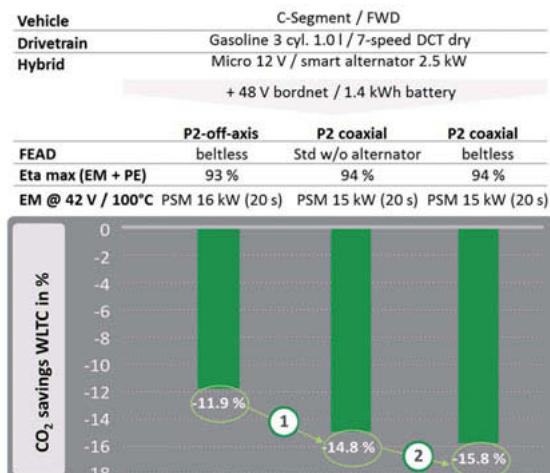
Die ersten heute in Serie umgesetzten 48V Hybridsysteme entsprechen der P0 Topologie [4]. Für den Einsatz dieser Systeme spricht die einfache Integrationsfähigkeit in bestehende Riementriebe von Verbrennungsmotoren. Mit P0 Systemen sind nennenswerte CO2-Reduzierungen erreichbar, gleichzeitig ermöglichen diese Systeme ein verbessertes Motorstartverhalten. Allerdings ist das Rekuperationspotential bei einer P0 Topologie durch die Verluste im mitgeschleppten Verbrennungsmotor limitiert. Auch sind elektrische Fahrfunktionen aus energetischer Sicht mit einer P0 Topologie nicht sinnvoll umsetzbar. Ein P0 System stellt den Einstieg in 48V Technologien und die Grundlage für ein 48V Bordnetz dar, erschließt aber noch nicht den vollen Umfang an CO2-Reduktionspotential und an kundenerlebbaren Mehrwerten.



Bild 5: 48 V P2 System

Diese Potentiale können mit einem 48V Systemen in P2, P3 oder P4 Topologie erschlossen werden. Insbesondere bei einem P2 System lassen sich durch die Möglichkeit zur Abkopplung des Verbrennungsmotors über das zusätzliche Trennelement (K0) zwischen der elektrischen Maschine und dem Verbrennungsmotor sowie durch die Nutzung der Getriebespreizung beim Rekuperieren zusätzliche CO₂-Einsparungen im Vergleich zu P0 oder P1 Systemen erreichen. Weiterhin sind P2 Systeme hinsichtlich Einbaurage und Funktion auch nicht auf eine Leistung von ca. 10 KW limitiert. So stellt sich die für die Systemauslegung wesentliche Frage nach der

Tabelle 2: Verbrauchseinsparung bei 48 V P2 Systemen



im Optimum zu installierenden elektrischen Leistung eines 48V Systems, um ein maximales Reduktionspotential bzgl. Verbrauch und CO₂-Emissionen bei vertretbaren Kosten zu erreichen.

In diese Fragestellung gehen natürlich auch die zur Darstellung von kundenerlebbaren Fahr- und Boostfunktionen erforderliche elektrische Leistungsanforderungen mit ein. Um kundenerlebbare Fahrfunktionen darzustellen ist

aus Sicht Schaeffler eine Anhebung der Leistung auf ca. 20 KW zielführend. Simulationsuntersuchungen zeigen, dass mit dieser Leistung neben den bekannten „48V-Hybrid-Funktionen“ Kriechen, elektrisch angetriebenes Parkieren, Stauschieben und Boosten vor allem ein rein elektrisches Fahren im typischen innerstädtischen Verkehr mit bis zu 30 km/h komfortabel und in einer kundentauglichen Form realisiert werden kann [5].

Mit 48 V P2 Systemen lassen sich bereits nennenswerte Verbrauchseinsparungen erzielen.

4.2. P2 4 HV Full und Plugin-Hybrid Architekturen

Mit P2 Hochvoltsystemen lassen sich deutlich mehr Funktionen realisieren als mit den 48 V Lösungen. Dies kann in vergleichbaren Bauräumen erfolgen, wenn die Anfahrelemente z.B. eine nasse Doppelkupplung in das P2 Modul integriert werden. Dies lässt sich bei insgesamt vergleichbaren möglichen Verbrauchseinsparungen (Charge Sustaining Mode) erreichen.

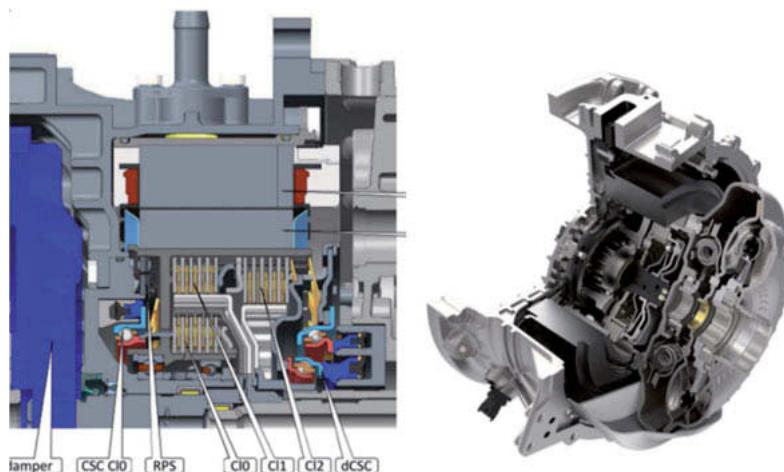


Bild 6: P2 Modul mit integrierter Doppelkupplung nass oder Drehmomentwandler

In Verbindung mit Wandlerautomaten kann der Wandler integraler Bestandteil des Hybridmoduls werden und direkt mit dem Rotor der E-Maschine verbunden werden.

5. P4 48V und HV Architekturen

Elektrische Achsen bieten die Möglichkeit sowohl zur Hybridisierung bestehender Antriebsstränge, können aber auch für rein elektrische Fahrzeuge eingesetzt werden. In Verbindung mit bestehenden Allradantriebssträngen ergibt sich die Möglichkeit die mechanischen Komponenten zu substituieren und der Umfang der technischen Änderungen am Fahrzeug kann begrenzt werden. Darüber hinaus bieten sie den Vorteil, dass die mechanischen Verluste der

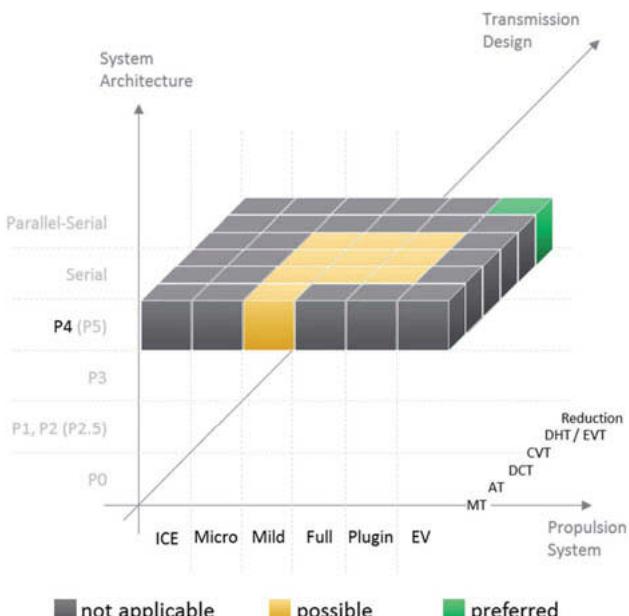


Bild 7: P4 Architektur

Allradkomponenten weitgehend eliminiert werden können. Bereits 48 V Lösungen mit 2 Gängen (Bild 8) bieten die Möglichkeit ausreichend Anfahrzugkraft zu entwickeln um in entsprechenden Fahrsituationen mehr Traktion anbieten zu können. Darüber hinaus sind die P4 Systeme in der Kombination mit unterschiedlichsten Getrieben flexibel einsetzbar.

- ▶ No. of gears: 2 + N
- ▶ Ratio: 15 – N – 5 (w/ differential)
- ▶ Integrated gear shift actuator
- ▶ Max. input speed: 15.000 rpm
- ▶ Max. input torque: 200 Nm
- ▶ Axis offset: 130 mm
- ▶ PSM or ASM
- ▶ Modularity of various electric drive systems



Bild 8: P4 48 V 2 Gang Achse

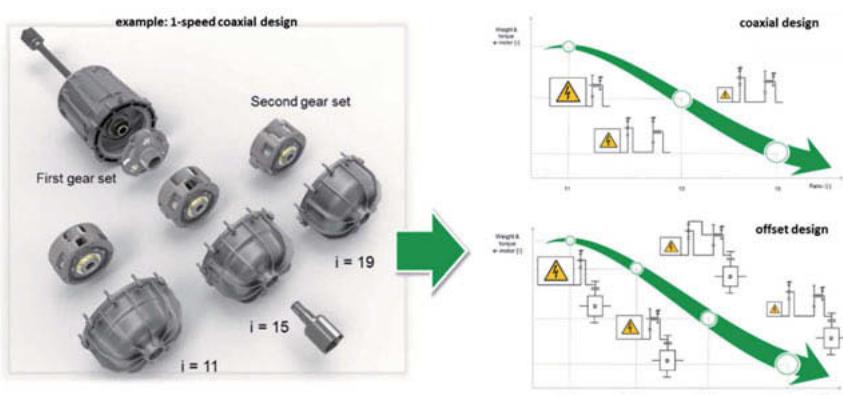


Bild 9: E-Achs Baukasten

Aufgrund der zahlreichen möglichen Applikationen wurde ein E-Achsen Baukasten (Bild 9) entwickelt. Dieser Baukasten erlaubt die flexible Anpassung der Übersetzungen im Bereich zwischen 10 und 20. Dabei können sowohl koaxiale, als auch achsparallele Varianten dargestellt werden. In Verbindung mit dem Einsatz des sogenannten Leichtbaudifferenzials lassen sich Package und Gewicht optimieren.

Dieser Baukasten kann durch entsprechende Derivate (mit oder ohne Entkopplung/ mehrgängige Varianten/ lastschaltbare Versionen) erweitert und ergänzt werden.

6. Entwicklungsplattform

Um die vielfältigen Marktanforderungen zu akzeptablen Kosten bedienen zu können, hat Schaeffler eine Entwicklungsplattform für elektrische Antriebe aufgebaut [6]. Die Plattform lässt sich für elektrische Achsantriebe genauso nutzen wie für Hybridmodule, Radnabenantriebe und dedizierte Hybridgetriebe. Der modulare Ansatz umfasst allerdings nicht nur die elektrischen Komponenten des Elektroantriebs. Vielmehr wurden auch Modulkonzepte für Kupplungen (zum Beispiel K0 oder Dreifach-Kupplung im P2-Hybridmodul), Aktoren und mechanische Getriebe ausgearbeitet und entwickelt. (Bild 10) visualisiert die Anwendung dieser modularen Baukästen auf einen elektrischen Achsantrieb.

In den vier gezeigten Bereichen wurden wesentliche Verbesserungen erzielt:

- die konsequente Optimierung der elektrischen Maschine hinsichtlich Leistungsdichte und thermischer Stabilität.
- eine integrierte Leistungselektronik auf Basis gesinterter IGBTs und einer ausgereiften, AUTOSAR-kompatiblen Regelungstechnik.
- einem bauraumsparenden Getriebekonzept, das eine einfache Anpassung der Übersetzung an die jeweilige Anwendung ermöglicht.
- einem Entwicklungsansatz, in dem wesentliche Systemeigenschaften wie elektromagnetische Verträglichkeit, Akustik und Kühlung gesamthaft betrachtet werden.

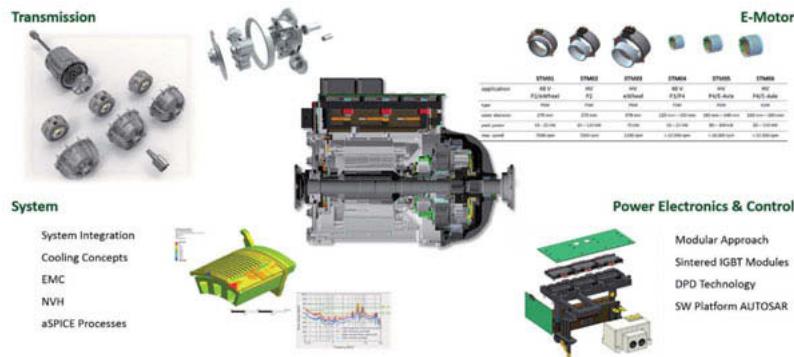


Bild 10: Einflussfaktoren auf die Steigerung der Leistungsdichte bei einem elektrischen Achsantrieb

Die Nutzung neuester Technologien, optimale Abstimmung der Teilsysteme und weiterentwickelte mechatronische Integration führen in der aktuellen Entwicklungsstufe der E-Achse dazu, dass bei um 15 % geringerem Gewicht Drehmoment und Leistung verdoppelt werden konnten. Die Entwicklungskompetenz konnte auf dem Gebiet der Elektroantriebe, mit der im Dezember 2017 vollendeten Übernahme von Compact Dynamics, weiter ausgebaut werden. Compact Dynamics hat sich als erfolgreicher Entwicklungspartner etabliert, beispielsweise für die Antriebe, mit denen die Fahrzeuge des Formula E-Teams Audi Sport ABT Schaeffler ausgestattet sind.

Neben den technischen Herausforderungen müssen die kommerziellen und terminlichen gemeistert werden. Der individuelle Zuschnitt der Lösungen auf verschiedene Nutzungsprofile bei gleichzeitiger Verkürzung der Entwicklungszeiten kann nur auf Basis flexibler Baukastenansätze gelingen. Schaeffler hat sich deshalb einen Technologiebaukasten für die wichtigen Teilsysteme definiert. Die zugrundeliegende Modularisierung ermöglicht trotz Standardisierung ein hohes Maß an Lösungsflexibilität.

7. DHT

Hybridgetriebe bieten die Möglichkeit einer vollständigen Integration der Hybridfunktionen in das Getriebe. Dadurch können im Vergleich zu den klassischen Getrieben bauraumneutrale Lösungen geschaffen werden. Voraussetzung ist allerdings, dass es gelingt die dafür erforderlichen Volumen zu finden, um diese Systeme wettbewerbsfähig zu den P2 Lösungen darstellen zu können.

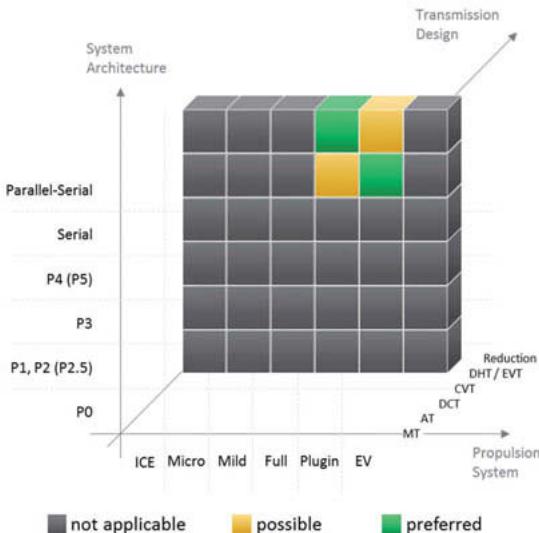


Bild 11: DHT

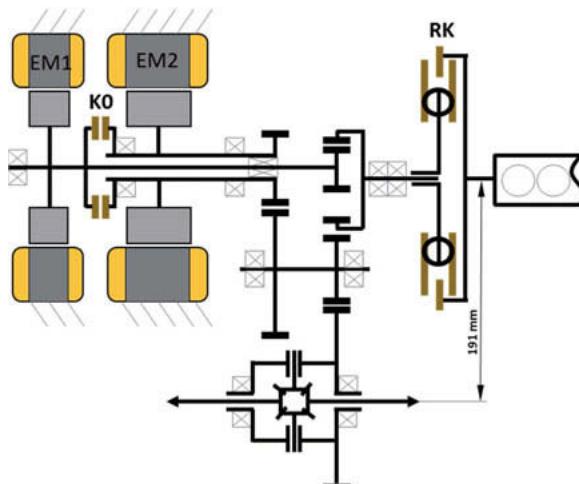


Bild 12: DHT Konzept

Das Konzept bietet die folgenden Vorteile:

direkte Positionierung der Kupplung K0 zwischen den E-Maschinen

- geringe Anzahl an Lagern und Zahnradstufen
- gute Akustik durch direkten Durchtrieb von Verbrennungsmotor zum Rad (Verspannung des Triebstrangs ohne Nebenpfade)
- Integration der Leistungselektronik
- geringe Anzahl von externen Schnittstellen (Wasser, DC, CAN)

Der wesentliche Vorteil der DHTs liegt darin, dass bei entsprechenden Volumen ein Kostenvorteil gegenüber den klassischen P2 Lösungen realisiert werden kann. In Verbindung mit der Optimierung des Verbrennungsmotors lassen sich bei diesem DHT- Konzept Verbrauchsvorteile im Vergleich zu Powersplit und P2 Lösungen erzielen.

Im Rahmen verschiedener Studien wurden Systeme auf der Basis von CVT und automatisierten Schaltgetrieben untersucht. Eine weitere Variante stellt das dargestellte Konzept (Bild 12) dar. Bei diesem Konzept handelt es sich vereinfacht beschrieben um ein stufenloses elektrisches Getriebe.

8. Zusammenfassung

Schaeffler kann ein breites Spektrum an Lösungen für die Hybridisierung und die Elektrifizierung des Antriebsstranges anbieten. Die Vielfalt der möglichen Lösungen erfordert eine Fo-

kussierung auf wenige Varianten. Dies sind im Wesentlichen die P2 und P4 Varianten. Langfristig werden wir uns mit den DHTs auseinandersetzen müssen, um Hybridlösungen technisch und wirtschaftlich attraktiver anbieten zu können.

9. Literatur

- [1] Englisch A., Pfund T.: Schaeffler E-Mobilität: Mit Kreativität und Systemkompetenz auf dem Feld der unbegrenzten Möglichkeiten 11th Schaeffler Symposium, Baden-Baden, 2018
- [2] Eckenfels, Th.: 48-Volt-Hybridisierung: Eine sinnvolle Ergänzung für den Antriebstrang. 11th Schaeffler Symposium, Baden-Baden, 2018
- [3] Jung, C. Schaeffler Group-Technologies and Systems for Tomorrow's Powertrain 08.05.2018
- [4] Maiwald, O.; Breitsameter, C.: „The next Braking Action is certain to come...“ - Efficient Usage thanks to 48 Volt Technology. 18. VDA Technischer Kongress, 17.-18.03.2016, Ludwigsburg
- [5] Firsching, P.; Rauch, M.; Eckl, T.; Kohlhoff, J.: 48-V-Hybridisierung im Antriebstrang. In MTZ 78 (2017), Nr. 2, S. 28-35
- [6] Gutzmer, P.: Die Zukunft des Motors kommt über das Getriebe. 36. Internationales Wiener Motoren symposium 2015

Concept studies of SI engines 2030+

Challenging tasks in 0D/1D engine simulation

Dr.-Ing. **Michael Grill**, FKFS, Stuttgart

M.Eng. **Sebastian Hann**, M.Sc. **Sven Fasse**,

Dr.-Ing. **Mahir Tim Keskin**, Prof. Dr.-Ing. **Michael Bargende**

Abstract

Nowadays 0D/1D simulations are being widely used in the engine development process. Thanks to the high prediction quality of the models and the low computational times, this is a powerful tool to investigate engine and powertrain concepts for the years 2030+.

Nearly all SI-powertrains will have at least a 48 V hybridization in 2030+. This trend of vehicle hybridization means that fuel consumption has to be reduced significantly over the entire engine map and especially in the area of 40 to 80% load, as the electric drivetrain is active in the low-load range and for fast demands of the maximum torque. Hence, new concepts are needed to guarantee the efficient SI-engine operation in a very wide range of engine operating conditions. In this context, technologies such as lean engine operation or gHCCI in 6 and 8 stroke engines emerge as new, challenging tasks in the 0D/1D simulation.

In order to achieve high model prediction accuracy, 0D/1D models used for the simulation of future SI engine concepts do not only have to consider thermodynamic effects, but also need to account for the in-cylinder chemical processes in detail. Kinetic reaction mechanisms for different fuel types that have been intensively developed in the recent years can be used to perform simulations at in-cylinder conditions that provide better understanding of the chemical processes during the combustion. More importantly, they enable the development and validation of simplified approaches for the 0D/1D simulation that reproduce the real chemistry behavior very accurately.

While for new passenger cars in the European Union (EU) the CO₂ fleet target of 95 g/km is fixed for the year 2021, currently the target for 2030 is debated in the EU. A further CO₂ reduction of 30 or more percent is under discussion. These rather challenging fleet consumption targets will certainly have a considerable influence on the focus of engine development. Assuming that a certain degree of hybridization will be mandatory to meet the targets, the engine will hardly be operated at very low loads anymore. This will switch the development focus from dethrottling to optimization measures that help to improve the

efficiency in a higher load region, which requires new concepts and technologies. In fact, considering that engines are hardly operated at high engine speeds above approx. 3500 rpm during usual vehicle operation, there only remains a relatively small operating window where efficiency has to be improved, see Fig. 1.

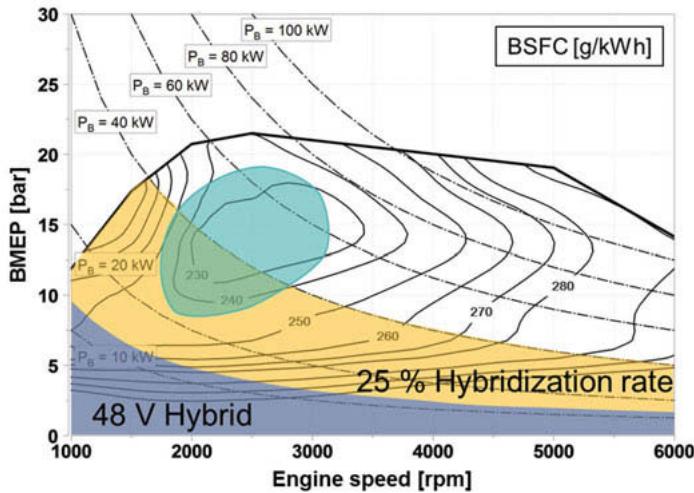


Fig. 1: Influence of the hybridization rate on the engine map area relevant for future efficiency improvements (green are)

It is thus obvious that the new technologies that will be necessary for efficient gaso-line engines represent a major challenge for 0D/1D simulation: virtually all the relevant submodels need to be refined or improved to describe the influence of new technologies correctly. An overview is given in Fig. 2. This represents a challenge, but is vital to make sure that 0D/1D simulation will remain a powerful tool in the development of future, high-efficient engines. This paper will provide examples of how the FKFS makes its models "fit for the future".

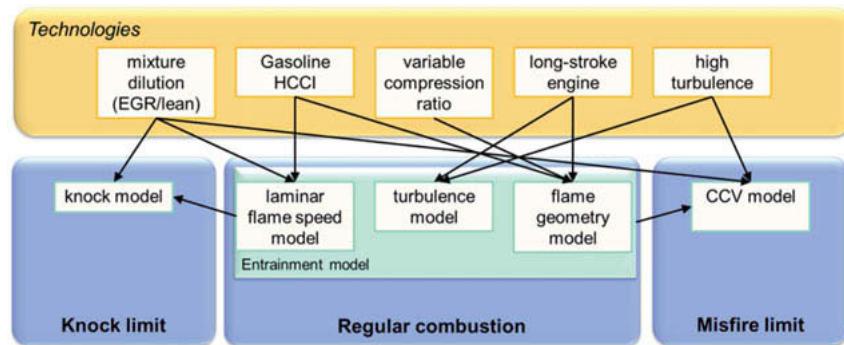


Fig. 2: Future technologies and their influence on models in 0D/1D simulation

Furthermore, For SI-lean or gHCCI engines one important challenge will be the management of the exhaust gas temperature during RDE to avoid light-out of exhaust aftertreatment components. The expected increase in the engine's thermal efficiency and the lean mixture will lower the exhaust gas temperatures, making the aftertreatment components even more prone to light-out. It is thus crucial for future SI engine concepts to simulate this behavior in RDE situations correctly, which is a challenging task for a 1D simulation. The combination of a 1D flow path model and a quasi-dimensional burn rate model leads either to unacceptable simulation times or to very inaccurate results. A new approach introduced by FKFS and Bosch in June 2018 with a combination of a physics-based modelling of the gas exchange and a data-based model of the high-pressure part, aiming to resolve this dilemma, is discussed in this context.

1. Mixture Dilution

In order to meet future CO₂ emitting requirements, engine concepts like lean burn or high EGR, as well as alternative fuels like ethanol from renewable sources might represent a promising option. For the estimation of their individual potential to increase engine efficiency, 0D/1D simulations are a very efficient tool. However, based on the necessary simplification of the reality with models, 0D/1D-simulations heavily depend on the quality of their sub-models. For internal combustion engines, it is of a high importance to model the combustion processes in great detail. Quasi-dimensional approaches, which are used to describe burn rates of spark-ignition engines, are based on the modelling of the laminar flame speeds (s_L). However, direct measurements of laminar flame speeds are usually performed at boundary conditions not relevant for engine operation. This restriction results from technical limits as well as

hydrodynamic and thermo-diffusive instabilities. Especially at very lean mixtures or high EGR rates, these instabilities are strong. However, reliable values of laminar flame speeds are needed under these conditions to be able to evaluate lean burn or high EGR engine concepts. This necessity becomes apparent when investigating the behaviour of the widely used laminar flame speed models described by [1] and [2]. Both are based on Equation 1.

$$s_L(\Phi, T, p, X_{\text{EGR}}) = s_{L,0}(\Phi) \cdot \left(\frac{T_u}{T_0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^\beta \cdot (1 - F \cdot X_{\text{EGR}}^n) \quad (1)$$

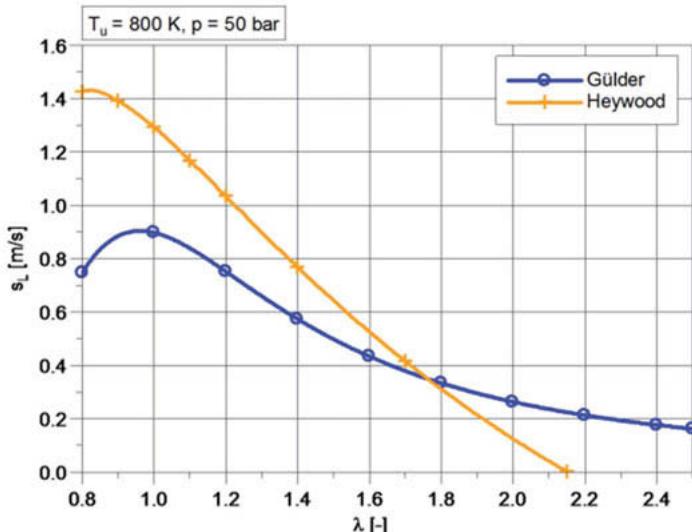


Fig. 3: Comparison of the laminar flame speed s_L calculated with Gülder and Heywood

As Fig. 3 shows, Heywood calculates negative flame speeds for $\lambda > 2.15$ independent on temperature or pressure, while Gülder overestimates the flame speed for high λ -values. Concerning EGR, Heywood and Gülder calculate negative flame speed values for 40 % to 50 % EGR and above. Due to the (almost) linear decrease of flame speed with EGR mole fraction, this also results in a too strong decrease of flame speed for EGR rates below 40 % to 50 %. Both neglect a temperature influence on the effect EGR has on the laminar flame speed. These deficits result from the sparse measurement database that was used for the development of those flame speed models. As already mentioned, no measurements of laminar flame speeds are available at engine-related boundary conditions. A solution of this issue is provided by reaction kinetics calculations of laminar flame speeds, where reaction mechanisms are employed. Such mechanisms are developed for specific fuels and contain the equations of all

(known) elementary reactions taking place during the combustion. These reactions are studied in detail for a wide range of boundary conditions to investigate on their temperature and pressure dependency as well as on their material properties such as mass transfer coefficients of all molecules that are listed in the reaction equations. The resulting reaction mechanisms are validated using measured laminar flame speeds and ignition delay times. Due to the extensive investigation of the elementary reactions, calculations can be performed outside of this measurement-based validation range.

In a first step, reaction kinetics calculations are used to investigate on the flame speed change due to lean mixtures and EGR, as shown in Fig. 4 for a pressure of 1 bar. The findings are similar at higher pressures of e.g. 100 bar. The x-axes are scaled in such a way that an increase in λ or EGR result in the same increase in mass. On the one hand, the general difference between the λ - and EGR-influence results from different heat capacities of the air and the residual gas (diatomic versus triatomic molecules), which influence the heating of the unburnt gas as well as the flame temperature. On the other hand, the different chemical behaviour of the reactive excessive air at $\lambda > 1$ changes the reactions that take place during the combustion, compared to the nearly inert residual gas. Furthermore, in accordance with *Le Chatelier's* principle and the reason for off-stoichiometric s_L -peaking described in [3], the additional O_2 at lean mixtures inhibits the dissociation of CO_2 and H_2O . EGR, however, increases the concentration of CO_2 and H_2O , which supports the dissociation. Due to the endothermic character of dissociation, EGR decreases the temperature and, with that, the laminar flame speed stronger than lean mixtures. Concerning the modelling of laminar flame speeds for engine simulation, the general difference between the λ - and the EGR-influence as well as their different temperature dependencies shown in Fig. 4 need to be taken into consideration, thereby accounting for thermodynamical as well as reaction kinetics influences.

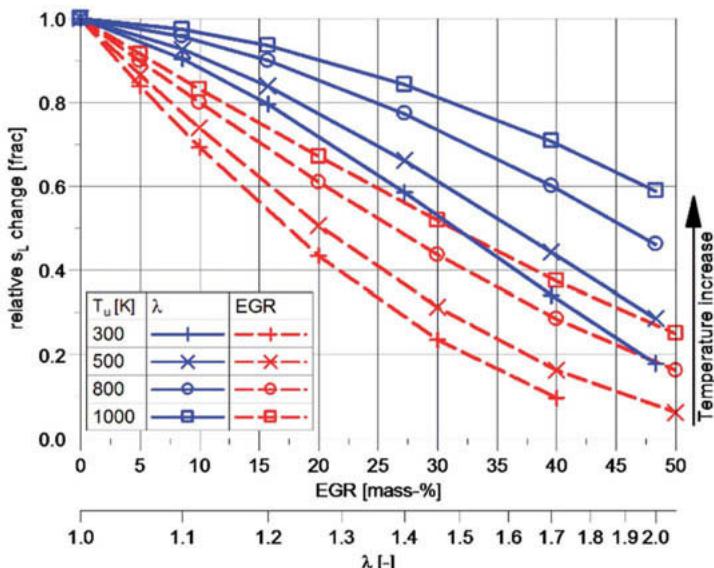


Fig. 4: Comparison of λ and EGR influence on s_L for gasoline at $p = 1$ bar

In general, Fig. 4 clearly shows that the flame speed models of Heywood and Gülder contradict reaction kinetics calculation results. Therefore, a new flame speed model is needed to investigate different engine concepts in 0D/1D simulation. For this purpose, a new approach for methane and gasoline was developed in [4] by calibrating and expanding the flame speed model described by [5] to match the results of reaction kinetics calculations which were performed for a wide range of boundary conditions. For the reaction kinetics calculations, a toluene reference fuel was chosen to represent typical fuel properties of a gasoline fuel with RON = 98, MON = 89 and an H/C-ratio of 1.85. Furthermore, the influence of admixing up to 100 % ethanol to gasoline is implemented. The resulting approach matches reaction kinetics calculation results with an error of 12 % and below at relevant boundary conditions. Fig. 5 shows a comparison of the new approach with Heywood. As already stated, the implausible behaviour of Heywood at increasingly lean mixtures becomes apparent. Furthermore, Heywood shows a wrong weighting of the temperature and pressure influence on s_L .

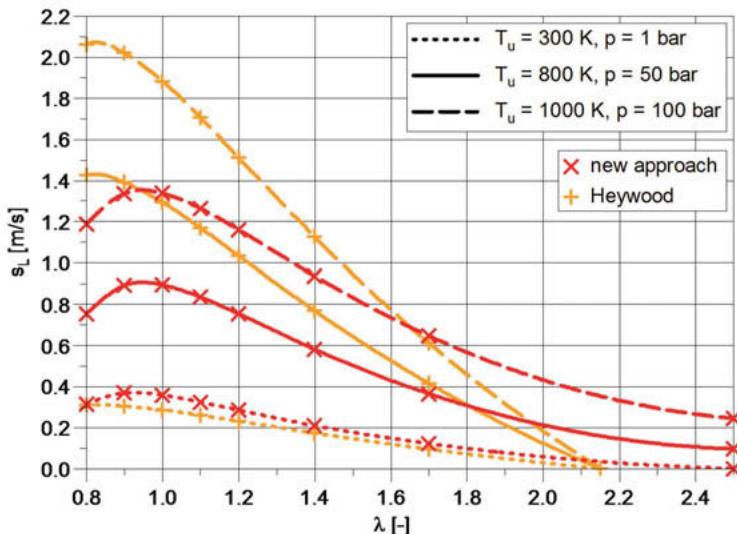


Fig. 5: Heywood vs. new approach

A validation of the new flame speed model is shown in Fig. 6, where Engine A is fuelled by Methane and Engine B by gasoline. The simulation model was calibrated for $\lambda = 1$ and 0 % EGR, respectively. It can be seen that the simulation using the new model, implemented in the engine process calculation code described in [6] in combination with the turbulence model described in [7], matches the pressure trace analysis results very well and, therefore, is able to predict burn rate changes due to an increase in λ as well as EGR.

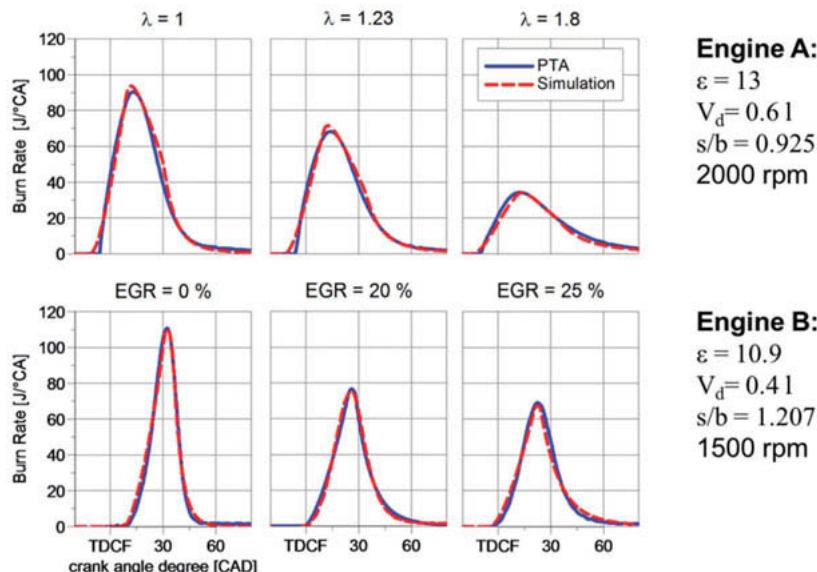


Fig. 6: Validation of new flame speed model. Top: [8]

2. Cycle-to-cycle Variations

Compared to compression-ignition engines, the modelling of spark-ignition engine burn rates is much easier due to relatively homogeneous mixture distribution. Using entrainment-approaches, good prediction qualities can be achieved, which enable a high quality reproduction of influences like residual gas, charge dilution, charge motion and turbulence [9], [6].

With models accounting for these influences, e.g. fuel consumption-optimal EGR rates can be simulated. To evaluate the benefit of applying the determined EGR rates to real engine operation, it is important to account for cycle-to-cycle variations (ccv). This can be done by using the ccv model developed in [10]. It is based upon the entrainment-approach to model SI-combustion, applying stochastic noise of constant bandwidth to laminar flame speed and combustion position in order to cover the effects of inhomogeneity in charge dilution and spark deflections. This noise causes fluctuations in the combustion model, which eventually result in more or less severe fluctuations of the indicated mean effective pressure (IMEP). This allows the prediction of statistical IMEP fluctuations, represented by the coefficient of variation (COV IMEP). If the COV IMEP exceeds a certain limit, the ccv are considered too high for stable

engine operation. Fig. 7 shows a comparison of measured and simulated COV for a single-cylinder research engine ($V_d = 0.4$ l, $\epsilon = 10.9$, $s/b = 1.207$), that has not been used during the development of the ccv model. The trend of increasing burn duration with higher EGR rates as well as the indicated efficiency can be reproduced reasonably well by the combustion model, providing a solid basis for the ccv model. The good match between measured and simulated COV IMEP proves the quality of the ccv model. In general, Fig. 7 shows the possibility to significantly increase engine efficiency with increasing EGR rates. However, increasing cycle-to-cycle variations limit the maximum EGR rate applicable to real engine operation.

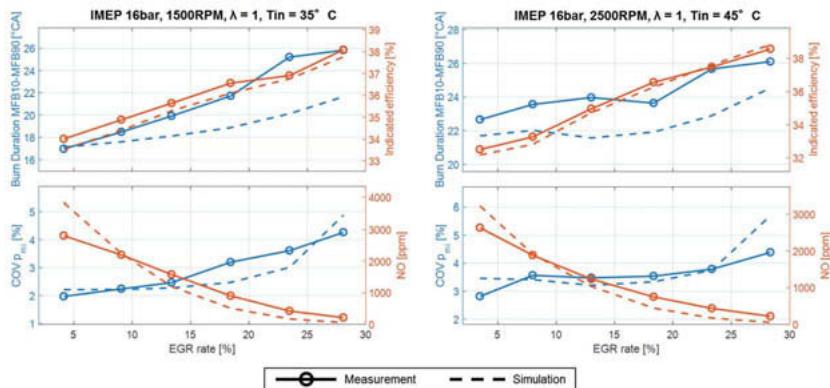


Fig. 7: Validation of Cycle-to-cycle variation model

Another example that shows how important it is to take cycle-to-cycle variations in account, is depicted in Fig. 8: Cycle-to cycle variations and their impact on BSFC for mixture dilution with EGR and excess air. As can be seen, mixture dilution leads to a progressive increase in the cyclic variations – it is moderate only for low dilution rates, but becomes significant when reaching higher dilution rates, with EGR dilution leading to a higher increase than dilution via excess air. In particular, it should be noted that the higher the cyclic variations get, the bigger is the difference between the BSFC of an average cycle (dashed line) and the averaged BSFC over the single working cycles (solid line), i.e. the “true” BSFC. It is important to consider this difference when investigating the optimal EGR rate or λ , and sets a clear limit for the highest possible dilution rate regardless of possible limitations of the ignition system.

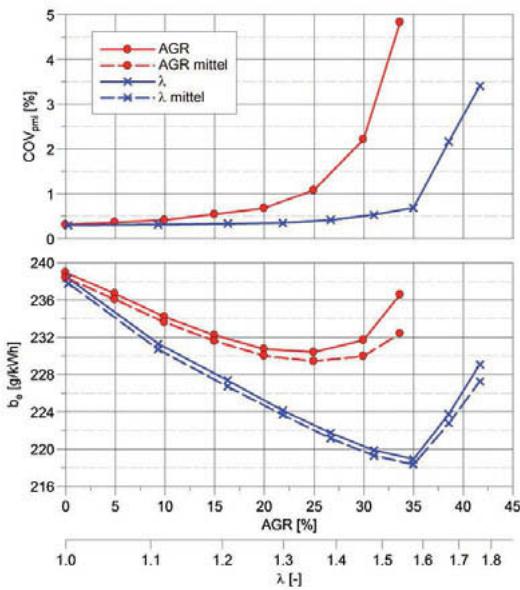


Fig. 8: Cycle-to cycle variations and their impact on BSFC for mixture dilution with EGR and excess air

3. Full-Load Exhaust Gas Recirculation

Knocking combustion limits the efficiency of turbocharged SI engines at high loads. The occurrence of knocking combustion can be inhibited by deploying recirculation of cooled exhaust gas (EGR). However, the development support for full load EGR combustion systems with 0D/1D simulations is not yet expedient, as no fully predictive knock model exists that accounts for the influence of EGR, especially in combination with different fuels and other technologies such as water injection and lean combustion.

Detailed kinetic reaction mechanisms cannot be integrated in 0D/1D simulations, as this would have a significant negative impact on the typically short computational times. Hence, a simplified approach reproducing the behavior of the chemical processes as accurately as possible is needed for modeling knock. In order to better understand how the chemical processes behave at in-cylinder conditions and to investigate in detail the auto-ignition prediction performance of the commonly used simplified chemistry approach – the Livengood-

Wu (knock) integral [11] – a simulation model representing the unburnt zone of the Entrainment model [12] was developed and implemented in Matlab / Cantera.

3.1 In-Cylinder Reaction Kinetic Simulations

Because of the complexity of detailed combustion kinetics of fuels, surrogate mixtures consisting of several hydrocarbon fuels are used in gasoline reaction kinetics simulations. A gasoline fuel with a research octane number (RON) of 96.5 and an ethanol content of 9.6 volume percent was chosen as base fuel for the simulations in this section. The corresponding surrogate is composed of iso-octane, n-heptane, toluene, and ethanol. Thus, it accounts for the presence of ethanol in common gasoline fuels in Europe (up to 10 vol. %). The blending rules are founded on investigation findings that demonstrated the need for non-linear blending of iso-octane, n-heptane, and toluene. Ethanol was blended linearly on molar basis. This resulted in a surrogate composition of 45.7% iso-octane, 13.6% n-heptane, 30.5% toluene and 10.3% ethanol (mass %) for the chosen base fuel. The reaction kinetics mechanism used in this work is a includes approximately 500 chemical species [11].

Adiabatic homogeneous isochoric reactor
(Engine cylinder)

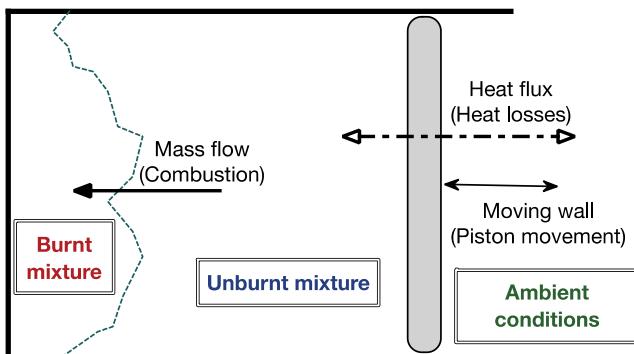


Fig. 9: Model for reaction kinetic simulations at in-cylinder conditions. [11]

The developed simulation model is based on an adiabatic reactor containing the surrogate-air-exhaust gas mass, Fig. 9. In addition, a moving wall was installed to compress and expand the mixture and hence reproduce the piston movement. Furthermore, the wall has heat transport properties that were used to recreate the wall heat losses calculated in the course of a combustion analysis. As a mass flow from the unburnt into the burnt zone is used in the Entrainment model to represent the combustion [12], the same technique was chosen for the

simulation model in this work. Blow-by losses were also considered by evaluating the mass flow rate through an orifice resulting from a pressure gradient [12]. The exhaust gas composition can be calculated from the surrogate component fractions and the air-fuel equivalence ratio (AFR) by assuming post-catalyst extraction. Thus, the initial conditions needed at simulation start are the mixture composition (surrogate component fractions, AFR, and EGR rate) as well as the initial volume (piston position), pressure and temperature. The simulations yield if the mixture auto-ignites and when as well as the production and consumption of species causing changes in temperature and pressure. The model was validated by comparing simulated temperature profiles with PTA results in the compression stroke, where no heat release takes place. The curves showed very good agreement.

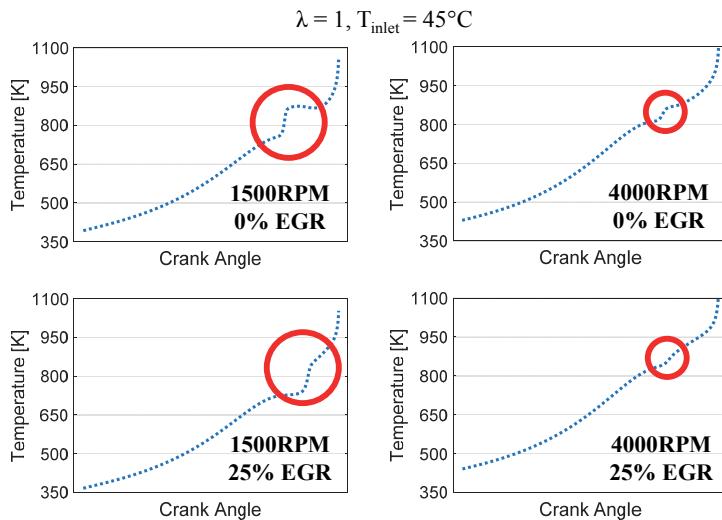


Fig. 10: Simulated temperature profiles of different working cycles with auto-ignition in two stages depending on the boundary conditions. [11]

By simulating thousands knocking single working cycles measured at a test bench [13], it was found out that the local auto-ignition in the unburnt mixture preceding the occurrence of knock can occur in two stages. This phenomenon has already been observed in various studies in the context of gasoline Homogeneous Charge Compression Ignition (gHCCI), but has not been extensively investigated in the context of engine knock. The temperature profiles shown in Fig. 10 illustrate the two-stage ignition behavior. As the first ignition stage occurs in the unburnt mixture while the combustion is taking place, the low-temperature heat release is not visible in

the heat release rate. The phenomenon is related to the negative temperature coefficient zone of the base fuel clearly visible in Fig. 11, where the rate and extent of the hydrocarbon oxidation reactions, which at first increase rapidly with temperature, begin to fall with further rise in the temperature, causing an increase in the ignition delay times in this temperature region.

Obviously, the amount of heat released during the low-temperature (or the first stage of) ignition depends on the boundary conditions, e.g. engine speed and EGR rate as shown in Fig. 10. Increasing engine speeds and high EGR rates cause the temperature rise resulting from the low-temperature ignition to decline. Generally, two-stage ignition behavior characterizes iso-octane and n-heptane. As these two hydrocarbons, together with toluene and ethanol, compose the surrogate fuel, they also cause the observed low-temperature heat release. The resulting temperature increase influences the following chemical reactions and thus the ignition delay of the mixture significantly [11].

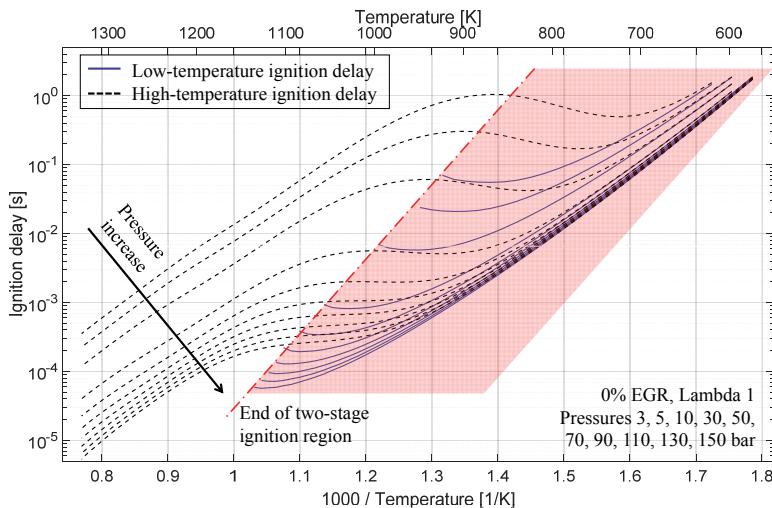


Fig. 11: Two-stage ignition region and ignition delay times of the low- and high-temperature ignition regimes (base gasoline surrogate). [11]

The boundary condition region where two-stage ignition of the base fuel-air mixture investigated in this study occurs is illustrated in Fig. 11. The existence of an ignition delay time of the low-temperature ignition primarily depends on temperature and pressure and defines the two-stage ignition region of a given surrogate composition. Hence, the influence of EGR and the AFR on the region's size can be neglected. Furthermore, Fig. 11 clearly shows that, at high temperatures, the two-stage ignition phenomenon does not occur at all. This

observation is relevant for both knock and gHCCI operation with high internal EGR rates, as these lead to high temperatures of the unburnt mixture.

3.2 A Two-Stage Knock Model for the Simulation of Future Engine Concept

3.2.1 Two-Stage Auto-Ignition Prediction Approach

The occurrence of two-stage ignition results in partially huge errors and hence poor performance of the auto-ignition prediction performed with the commonly used knock integral. An approach for modeling knock that accounts for a low-temperature heat release possibly taking place requires the development of suitable models for the three main parameters characterizing the two-stage ignition phenomenon. These are the ignition delay times of both ignition stages, Fig. 11, as well as the temperature increase resulting from the low-temperature ignition. The authors of this paper have already presented suitable models for these parameters in a previous publication [11]. These consider influences of all relevant boundary conditions, such as pressure, temperature, AFR, EGR, injected water and fuel composition.

$$1 = \int_0^{t_1} \frac{dt}{\tau_{low}(BC)} \xrightarrow{\substack{\text{Temperature increase } T_{incr} \\ \text{Pressure increase } p_{incr} \\ \text{Progress of aggregate reaction}}} 1 = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{\tau_{high}(BC, T_{incr}(BC), p_{incr}(T_{incr}))} \quad (1)$$

t_1 predicted time of low-temperature ignition [s]
 t_2 predicted time of auto-ignition [s]
 τ_{low} low-temperature ignition delay [s]
 τ_{high} high-temperature (auto-) ignition delay [s]
 T_{incr} temperature increase resulting from low-temperature ignition [K]
 p_{incr} pressure increase resulting from low-temperature ignition [bar]
 BC boundary conditions, e.g. EGR [%], AFR [-], pressure [bar], etc.

Subsequently, the three submodels can be coupled in a new auto-ignition prediction approach that considers the possible occurrence of low-temperature ignition and its influence on the auto-ignition delay of the unburnt mixture, equation (1) [11]. As the purpose of the knock integral is to predict if and when a pre-defined pre-reaction state of the mixture will be exceeded, resulting in an auto-ignition, the occurrence of each of the ignition events can be predicted by a single knock integral. The inputs of the two coupled integrals in equation (1) are the values of the ignition delay for the corresponding ignition stage as a function of the current boundary conditions, which are calculated by the corresponding models presented in [11].

The temperature increase T_{incr} resulting from the first ignition stage, as well as the corresponding pressure increase p_{incr} , are added to the respective unburnt mixture values at each integration step of the second integral. Thus, the influence of the low-temperature ignition on the ignition delay of the mixture is considered. Mixture auto-ignition is defined as the point where the high-temperature ignition integral reaches one – a value that is independent of the operating conditions. Furthermore, the progress of the chemical reactions (causing an auto-ignition) after the first ignition stage is taken into consideration by setting the starting value of the high-temperature ignition integral to 0.3 [11].

The new two-stage auto-ignition prediction approach has been extensively validated at various boundary conditions. Validation results comparing the times of auto-ignition (in °CA) of knocking single cycles simulated with the detailed reaction mechanism at in-cylinder conditions with those estimated with the newly developed two-stage approach can be seen in Fig. 12. The prediction accuracy was validated for 20 different fuels with RONs between 91 and 102 as well as ethanol contents between 0 and 20 volume percent at various operating conditions. The accuracy of the modeled influence of injected water on the auto-ignition behavior of air-fuel mixtures has been assessed too. It is important to remark that neither the critical pre-reaction state representing auto-ignition (equaling 1), nor the pre-reaction state after the low-temperature ignition (equaling 0.3) have been changed in the course of the performed variations of boundary conditions. These values are auto-ignition model constants that do not have to be recalibrated. Hence, unburnt temperature curves from combustion analyses or combustion simulations can be directly used as auto-ignition model inputs.

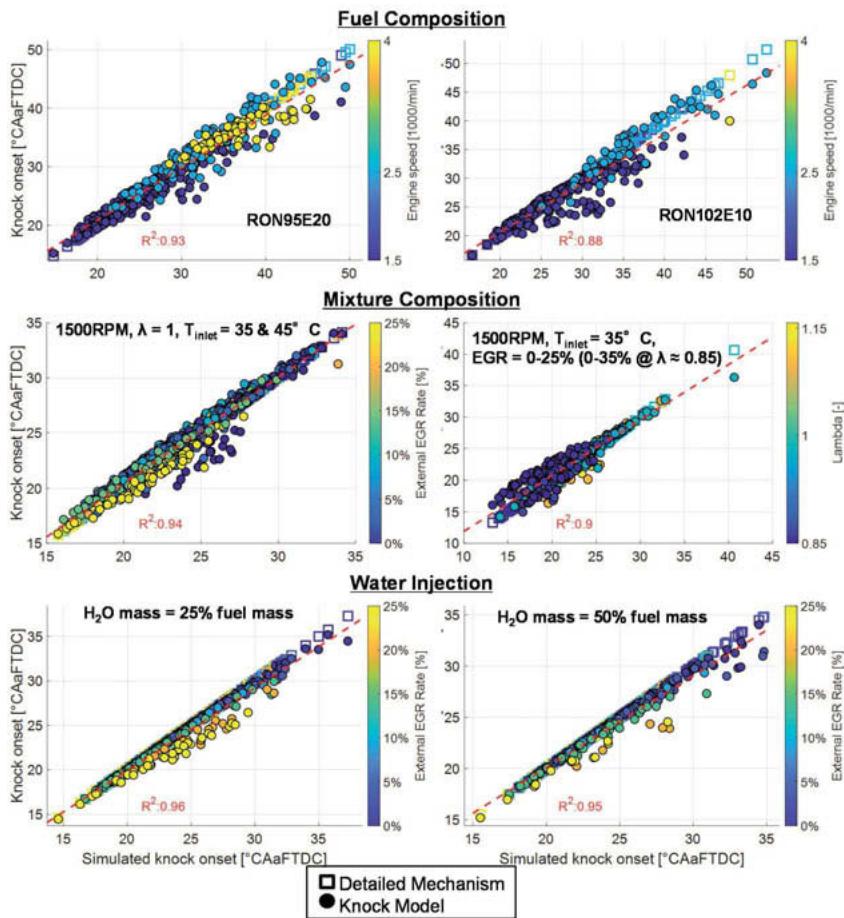


Fig. 12: Times of auto-ignition simulated with the detailed mechanism and predicted by the newly developed two-stage approach: Variations of operating conditions, mixture composition, fuel type, and injected water content. [14]

3.2.2 Knock Occurrence Criterion

Except for not considering low-temperature ignition, commonly used knock models assume that no knock can occur after a pre-defined, constant mass fraction burnt (MFB) point [15]. The evaluation of measured knocking single cycles however has shown that the latest possible MFB-point where knock can occur changes significantly with parameters such as engine

speed, EGR rate and the AFR. Hence, a cycle-individual criterion for occurrence of knock considering the current operating conditions is needed. To this end, an approach based on the unburnt mass fraction in the thermal boundary layer at the time of auto-ignition was developed [15]. The boundary layer volume is estimated with a phenomenological model and, because of the cool cylinder walls, it has a temperature that is much lower than the mean unburned mass temperature. Hence, it is assumed that if the unburnt mass fraction in the boundary layer at the predicted time of auto-ignition is higher than a pre-defined threshold calibrated at the measured knock boundary, no knock can occur. This threshold is the only tuning parameter of the new knock model and has to be calibrated at one operating point at the experimental knock limit. Besides for the operating conditions, the developed knock occurrence criterion also accounts for the flame propagation and the cylinder geometry.

3.2.3 Knock Model Validation

Altogether, the new knock model does not contain any empirical measurement data fits and has just one engine-specific calibration parameter that is independent of the operating conditions. The prediction performance of the model has been extensively evaluated at various operating conditions on three different engines. The validation process involved the comparison of the measured MFB50-points at the knock boundary with the ones predicted by the knock model in the course of fully predictive 0D/1D engine simulations. The single model calibration parameter was estimated at one operating point for each of the investigated engines respectively and subsequently kept constant during the validation process.

The performance of the knock boundary prediction with the newly developed phenomenological model is demonstrated in Fig. 13. The operating points shown include variations of engine speed and load, EGR rate, inlet temperature and AFR. Clearly, the high heat capacity of the cooled exhaust gas allows for earlier MFB50-points at the knock boundary with EGR and hence higher indicated efficiency, although the burn duration increases with EGR because of the lower laminar flame speed. Moreover, the bottom left plot in Fig. 13 demonstrates that EGR can be used to replace the mixture enrichment typically employed at full load, resulting in a significant indicated efficiency gain. Additionally, the model is capable of reliably predicting the effect of different engine loads (and thus compression ratios, as this parameter affects the knock model inputs in a similar way) on the knock behavior.

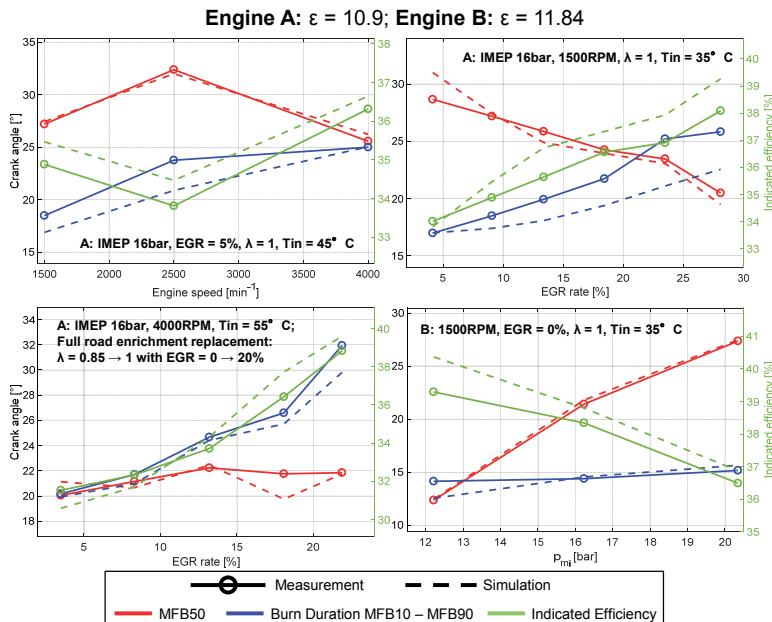


Fig. 13: Validation of the two-stage knock model. [14]

Overall, the prediction performance of the new knock model is very good and the effects of all boundary conditions on the knock limited spark advance are predicted correctly. The errors in the calculated MFB50-points at the knock boundary are within 2°CA. The high prediction quality achieved with the development of a novel two-stage auto-ignition prediction approach and a cycle-individual, phenomenological knock occurrence criterion enables the fully predictive simulation of different combustion systems, engine configurations and operating conditions as well as their influence on knock occurrence, burn duration and hence the indicated efficiency. The new knock model can be applied to different engines without any limitations, after a simple recalibration of its single tuning parameter.

4. gHCCI

Gasoline-HCCI is a promising means of reducing both NOx emissions and BSFC, but it is restricted to low loads that are hardly relevant, particularly when considering hy-bridization. One possible solution to improve efficiency in the HEV-relevant operating range is lean combustion; however, this may be associated with increased costs and complexity regarding

exhaust aftertreatment. A possible alternative for the relevant load range is to enhance HCCI operation to higher loads by means of so-called multi-stroke processes.

Multi-stroke combustion processes aim at enhancing the HCCI operating range by increasing the frequency of “fired” TDCs or combining it with other combustion processes. There are several conceivable strategies, including:

- 2-stroke: every TDC is fired, gas-exchange similar to a conventional 2-stroke engine
 - 6-stroke: a spark-ignited combustion (i.e. homogeneous-lean or stratified-lean) is followed by a lean HCCI combustion and two gas-exchange strokes, maintaining stoichiometric conditions overall
 - 8-stroke: a conventional stoichiometric SI working cycle is followed by a “normal” HCCI working cycle (intermittently)

For the 8-stroke process, hot exhaust gas from the conventional stoichiometric combustion is used to control the HCCI combustion, using either valve timings (EGR rate) or ignition timings (exhaust temperature) as control parameter. The mixture is preferably kept stoichiometric for both conventional SI and HCCI combustion to enable simple exhaust aftertreatment via three-way-catalyst. Fig. 14 shows an example for such an operation, where an IMEP of 7.5 bar is reached ($\text{IMEPHCCI} \approx 5 \text{ bar}$, $\text{IMEPSI} \approx 10 \text{ bar}$). The torque fluctuations at the crank shaft resulting from the intermittent strategy seem to be manageable for a 4-cylinder engine when firing two cylinders anti-cyclically.

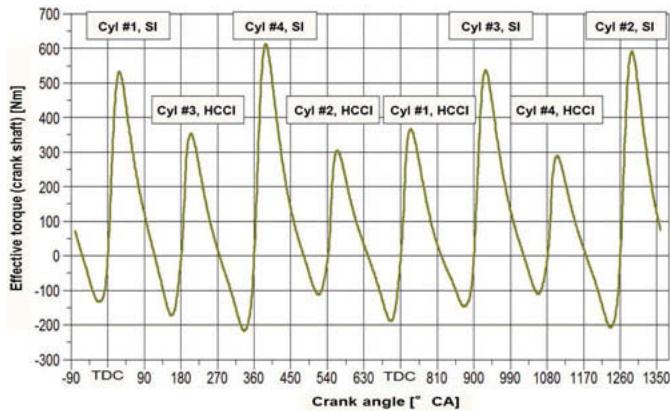


Fig. 14: Resulting torque at the crankshaft for a 4 cylinder 8-stroke engine

The 6-stroke process, in which the exhaust from a lean SI combustion (containing a sufficient amount of oxygen) is recompressed and used for a lean HCCI combustion, seems even more

promising than the 8-stroke variant: it should be able to keep a three-way catalyst as well (overall stoichiometric operation) and provides additional means for combustion control via the conventional, homogeneous combustion as well (i. e. both should thus be easier to control than pure HCCI, at least in theory), but it should enable higher loads than 8-stroke, as 2/3 of the TDCs are fired and it should enable higher efficiencies and lower NOx emissions due to lean operation during both conventional and HCCI combustion. The fact that it requires a lean SI combustion might lead to higher costs and complexity, however (higher demands for ignition system). The combination with a boosting system would be beneficial to reach higher loads. A prerequisite for investigating such multi-stroke processes is a predictive burn rate model for Gasoline-HCCI. Such a model is available at the FKFS, which is presented in [16]. It uses a combined approach that enables both a volume reaction and an adapted description flame-propagation as mechanisms of combustion progress and shows excellent agreement with measurement data over a wide range of operating conditions while requiring very low computational times and few tuning parameters, see also Fig. 15. Furthermore, it is able to predict operating mode changes (i.e. SI \Rightarrow HCCI) correctly.

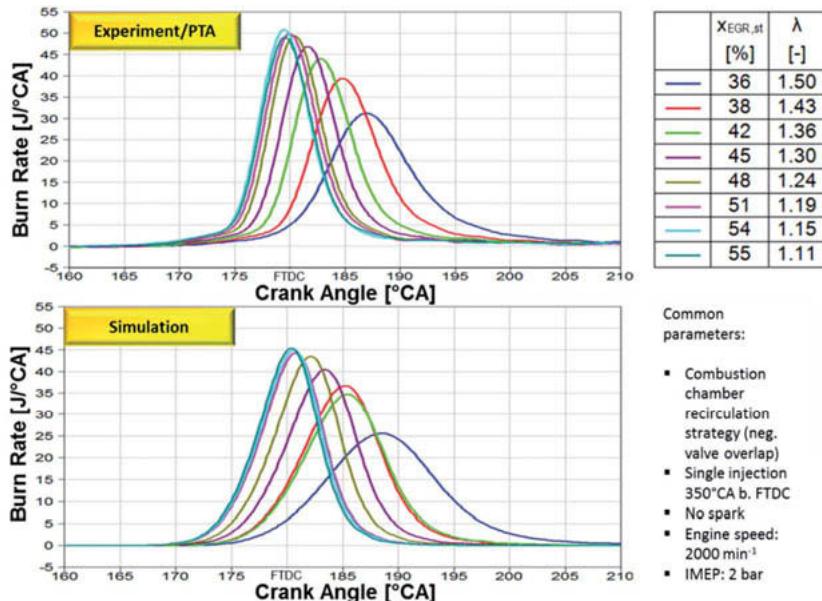


Fig. 15: Comparison between Simulation and measurement for a EVC variation in Gasoline-HCCI mode

5. RDE Challenge

From 2017 on new passenger cars in the EU have to fulfil exhaust gas emission limits also under RDE conditions. While the emission limits will tighten from current Euro 6d-TEMP to Euro 6d in 2020 and Euro 7 beyond [17] the RDE regulation [18] [19] includes many drive requests that go beyond the current pre-defined driving cycles. E.g. on the one hand vehicle speeds up to 160 km/h and severe accelerations on inclining roads can cause high raw emissions that have to be converted reliably by exhaust gas aftertreatment (EAT). On the other hand low ambient temperatures (down to -7°C), long single stop durations (up to 5 minutes) and downhill drives can lead to an underrun of the lower operational temperature limits of the EAT components. In the near future the latter issue might be even strengthened by two striven efficiency-enhancing measures – hybridization with longer ICE standstill periods and reduction of fuel demanding cold start heating strategies.

A series of the RDE requests as well as the emission calculation itself are related to extensive drive sections or even the full RDE drive. As a consequence the substitution of RDE drives by a small number of representative powertrain operation sequences is only possible to a very limited extent [20]. The consideration of RDE performance within powertrain and EAT concept evaluation causes thereby a high testing effort which might even be complicated by missing hardware during early concept phase. 0D/1D powertrain simulation including the prediction of the thermal behaviour of ICE and EAT as well as EAT conversion rates could help to virtualize RDE tests in order to save time and costs of powertrain development.

Additionally simulation can be used for synthetic RDE driving profile generation to create "worst-case" drives, either by combining a variety of cut up measured real driving sequences or by utilizing stochastic driving parameter distributions derived from them [21]. Fundamental condition for harnessing the potentials of virtual RDE tests is a simulation tool that constitutes an optimal compromise between predictability, flexibility and simulation time.

5.1 Comparison of Existing Engine Simulation Approaches

Assessing existing simulation approaches shows that all of them have severe drawbacks regarding this demand profile (see also Fig. 16):

1. Detailed 1D flow simulation model coupled with quasi-dimensional models:

Physical modeling has proven itself to be a valuable tool in the development of engine technologies: especially 1D-CFD allows the modeling of the whole combustion engine with great flexibility and moderate effort. Air system dynamics, EGR-mixing and the gas exchange can be simulated accurately. Combustion models are available in a broad variety - from

measured burn rates over simple Vibe approximations up to phenomenological approaches that allow the prediction of the rate of heat release. The application ranges from very early stages in the development where the engine hardware is not necessarily defined or available until the support of function development and software calibration in the final development stages. Virtual hardware components like turbochargers can be matched to the respective requirements or EGR control strategies can be evaluated. All in all it represents a very powerful tool, albeit with a crucial drawback with regard to RDE boundary conditions: computational times, although rather low compared to 3D-CFD simulations, are still quite high – too high for the high amount of different operating conditions that has to be tested for RDE development. To a limited degree, this can be mitigated by using smart features like master/slave modes for the cylinder objects in full engine models, allowing to reduce the computational effort for the high pressure part distinctly (e. g. almost 75% in a four-cylinder engine). However, as the main part of the computational time is consumed by the flow simulation, the overall reduction is insufficient for RDE demands.

2. Fast-running 1D flow simulation model coupled with quasi-dimensional models

This approach addresses exactly the already mentioned, high computational effort for 1D CFD flow simulation. The basic idea is to lump various flow volumes together, reducing thus the number of required calculations per time step while enabling a larger time step size at the same time. A considerable reduction in simulation time can be reached in this way, coming close to real time capability depending on the level of simplification (a factor of two compared to real time can be considered as a typical value), which is definitively enough to qualify for the "fast" tag. However, this approach inevitably changes the model's ability to predict pressure waves in the flow part – actually one of the most important benefits of 1D simulation compared to a pure 0D approach – leading to significant changes in the boundary conditions at IVC for the high pressure part. By nature quasidimensional models are very sensitive to these starting conditions (not unlike the real engine), so they should only be used with flow models that can deliver accurate boundary conditions for the combustion.

3. Data-based models/mean value models

Data-based approaches are the tools of choice when it is required to quantify characterize existing systems accurately. Here, former map-based interpolations are increasingly replaced by statistical models that are able to describe the desired result value in dependence of more than just one to three input parameters, which are typical for maps. This can either be necessary to describe results depending on the degrees of freedom of operation that modern

engines provide or to represent the deviations from stationary operation an engine faces while operated under highly transient conditions. Besides the proven fulfillment of accuracy demands, trained data models can be evaluated with nearly no computational effort. Here the limitation is the extrapolation capability – data based models can only provide trustful information where training data was available. In particular this means that changes in the intake or exhaust system compared to the original configuration cannot be taken into account in the simulation model, making it highly inflexible and unsuitable for tasks like function development and calibration.

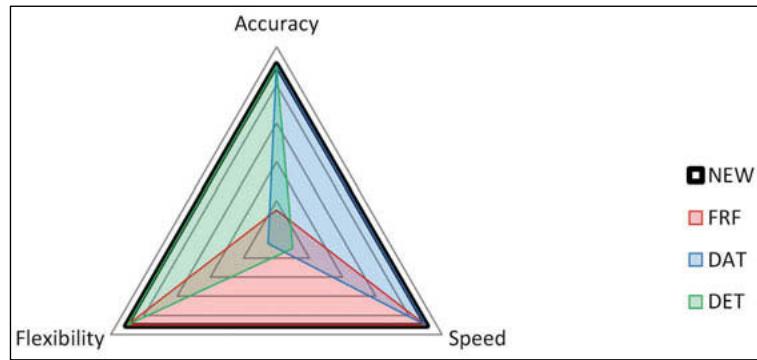


Fig. 16: Positioning of different simulation set-ups along the three basic requirements for RDE simulations (DET: detailed 1D flow simulation model coupled with quasidimensional models; FRF: Fast-running 1D flow simulation model coupled with quasi-dimensional models, DAT: data-based models/mean value models)

5.2 Basic Idea for New Simulation Tool

To get a fast, accurate and flexible simulation tool, the following combination was chosen:

- Data-based representation of combustion characteristics and emissions to increase computational speed and to reduce the sensitivity of the high pressure part to inaccuracies from fast-running gas exchange calculations
- Physics-based representation of gas exchange, air system dynamics and EGR-mixing to maintain full flexibility

To link both parts, the pressure at EVO is the most important quantity that has to be modelled. A dedicated interface was developed (dubbed “RapidCylinder®”) that calculates the pressure trace based on characteristic combustion values (such as the pressure at EVO) and sets the engine-out emissions to the desired values. This basic idea is depicted in Fig. 17.

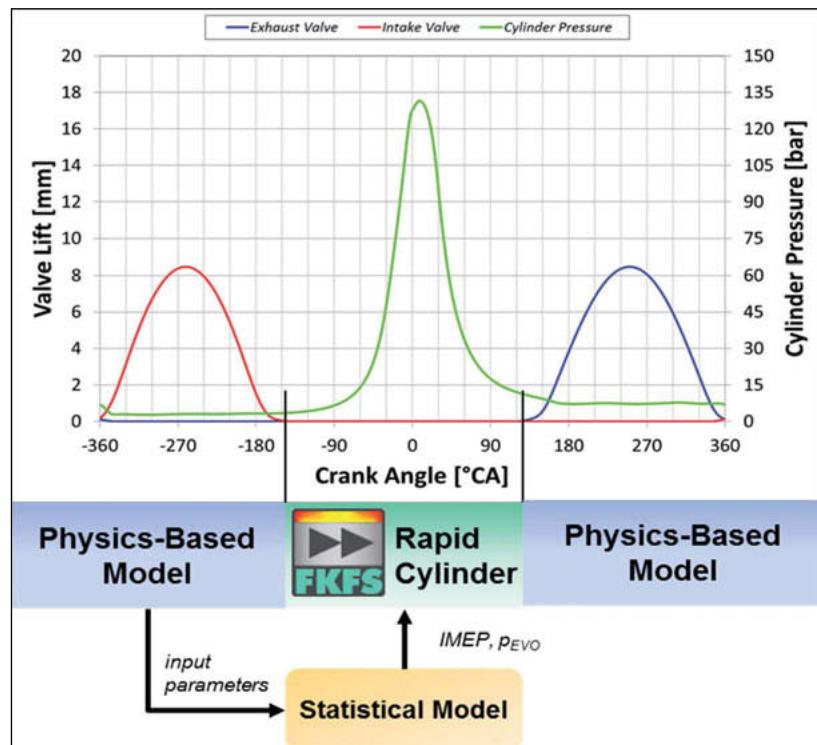


Fig. 17: Basic approach of new simulation tool

The user finally has to take three steps for such an approach:

- “Data sampling”: Generating input data for the data-based model (engine measurement campaigns or detailed 0D/1D simulations)
- “Training”: Generating of statistical models that derive the desired characteristic values from input parameters of the intake path
- “Calculating”: The characteristic combustion values as well as emission values are fed to the “RapidCylinder®” that links the physics-based flow model to the data-based in-cylinder model.

5.3 Pressure Trace Algorithm

The most important task of the RapidCylinder® is thus the construction of a pressure trace that meets the target value of the following quantities (with the correct values for each cycle derived from the "training" phase):

- Pressure (and Crank Angle) at EVO
- IMEP (Shelby Definition)

Optionally, other values such as the peak pressure (and corresponding crank angle) can be added. The RapidCylinder® then automatically calculates a pressure trace that meets all the input data (see Fig. 18), and estimates the temperature and heat transfer rate for every time step. Additionally, the emission values can be set and will be present in the exhaust path of the physics-based model in the desired quantity.

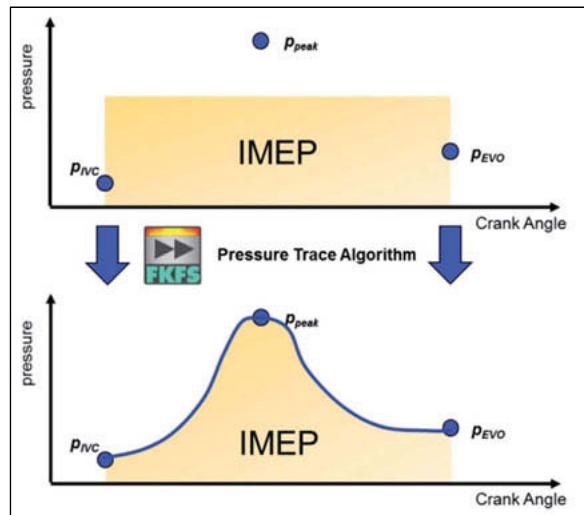


Fig. 18: Generation of pressure trace

5.4 Application and Exemplary Results

In Fig. 19, a section of a RDE drive cycle calculated with the RapidCylinder®-approach is compared with the results using the UserCylinder®, both running in the same fast running 1D flow model. For the comparison, a RDE-ready 4-cylinder Diesel engine with 2l of displacement volume and a start-stop system was used. For a gasoline engine, the same quality of results can be expected. The RDE section includes the longest allowed single stop duration of five minutes. It can be seen that both calculation methods can follow the target vehicle speed

reasonably well, thus proving the quality of the transient controllers. In this example, the computation time when using the RapidCylinder® is reduced by a factor of 0.5 to 200 min compared to the UserCylinder ® calculation.

At the first part of the cycle, including the standstill phase, the SCR catalyst wall temperatures of both approaches are almost identical. After the fast acceleration following the standstill phase of the cycle, the maximum difference of only 14 K is reached. For the rest of the drive cycle, the temperature difference is close to zero.

These results clearly illustrate the benefit of the RapidCylinder ® in drive cycle calculations: While producing almost the same results as the detailed calculation of combustion processes, only half of the computational time is needed. Still, transient effects like the boost pressure built-up are accounted for in simulation. Especially when comparing different set-ups of engine periphery (like turbochargers) or different car configurations, the RapidCylinder ® allows an investigation of more variants in a shorter time, while simultaneously maintaining the high level of reliability of simulation results.

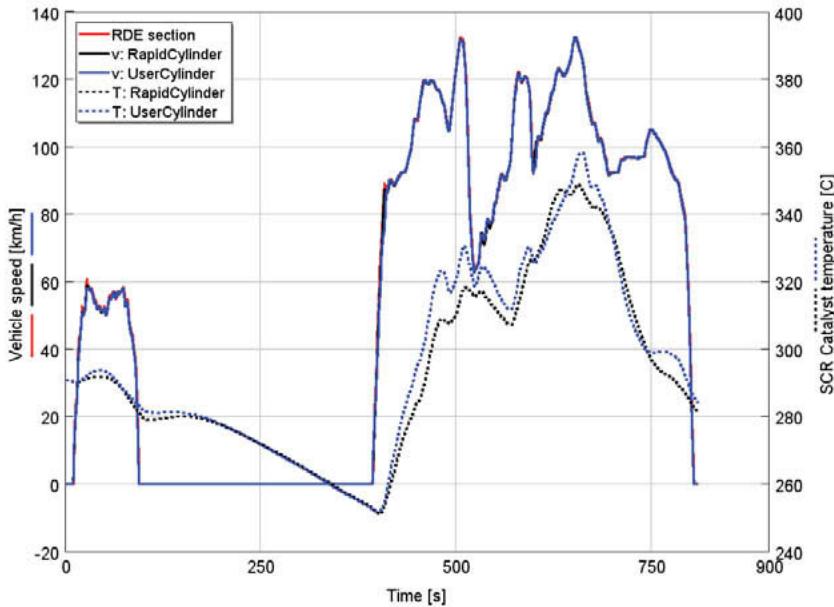


Fig. 19: RDE-application of RapidCylinder ® vs. UserCylinder ®: comparison of catalyst temperature

Conclusion

Based on the examples of laminar flame speeds and ignition delay times, this paper underlines the possibility to significantly improve 0D/1D engine simulation models when considering reaction kinetics effects. For laminar flame speeds, this translates to improved predictive abilities especially for high degrees of mixture dilution as well as changed fuel compositions in terms of ethanol admixture to gasoline or binary CNG Substitutes. Concerning engine knock, reaction kinetics calculations allow to obtain ignition delay times for various fuels such as gasoline (TRF) + ethanol and arbitrary mixtures of all relevant CNG components at a wide range of boundary conditions. Furthermore, they enable the investigation of the two-stage auto-ignition characteristics of gasoline fuels due to low temperature heat release. These improvements in specific sub-models influence and improve other sub-models such as cycle-to-cycle variation or gHCCI. In turn, reliable calculations of thermodynamic effects are needed to provide exact boundary conditions.

With this interaction of thermodynamics and reaction kinetics, the presented models allow to investigate and evaluate future engine concepts to further increase engine efficiency. Such concepts might use, for example, high degrees of mixture dilution via EGR or lean mixtures or gasoline-HCCI, possibly in multi-stroke engine concepts. For all these concepts, it is important to account for the influence cycle-to-cycle variations take on the fuel consumption.

With the development of the RapidCylinder®, a fast and accurate method to calculate in-cylinder processes is available for drive cycle simulations. With this, the critical light-out of SI and especially DI engine exhaust gas aftertreatment systems during RDE can be investigated with significantly reduced calculation times.

Acknowledgments

The knock model presented in the chapter "Full-Load Exhaust Gas Recirculation" has been developed at the Institute of Internal Combustion Engines and Automotive Engineering (IVK) of the University of Stuttgart, Germany as part of the research tasks within the project "Knock with EGR at full load" defined and financed by the Research Association for Combustion Engines (FVV) e.V. (FVV Project 6301). The authors would like to thank the working group that accompanied the research work and all the companies involved for their support, the colleagues from the Institute for Combustion Engines of the RWTH Aachen University for the collaboration and especially the Institute for Combustion Technology of the RWTH Aachen University for providing the detailed reaction kinetics mechanism, as well as the FVV for granting the financing.

The results shown in Fig. 15 originate from a research task defined by the Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV, Frankfurt) and conducted at the Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) of the University of Stuttgart. It was financed within the framework of a program to promote cooperative industrial research (Industrielle Gemeinschaftsforschung und -entwicklung, IGF) by the Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) of the Federal Republic of Germany by means of the Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF), IGF-Nr. 16835 N, based on a decision of the German Federal Parliament. A working group under the direction of Dr. André Kulzer, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, accompanied the research work. The authors would like to thank this working group and the companies involved for their support and the BMWi and AiF for providing financing. The authors are grateful for the possibility to perform this project.

Literature

- [1] J. B. Heywood, Internal combustion Engine Fundamentals, New York: McGraw-Hill, 1988.
- [2] Ö. Gülder, „Correlations of Laminar COmbustion data for Alternative S.I. Engine Fuels,“ *SAE Technical Paper Series*, Nr. 841000, 1984.
- [3] C. K. Law, A. Makino und T. Lu, „On the Off-Stoichiometric Peaking of Adiabatic Flame Temperature,“ *Combustion and Flame*, Nr. 145, pp. 808-819, 2006.
- [4] S. Hann, L. Urban, M. Grill und M. Bargende, „Influence of Binary CNG Substitute Composition on the Prediction of Burn Rate, Engine Knock and Cycle-to-Cycle Variations,“ *SAE Int. J. Engines*, Bd. 10, Nr. 2, pp. 501-11, 2017.
- [5] J. Ewald, A Level Set Based Flamelet Model for the Prediction of Combustion in Homogeneous Charge and Direct Injection Spark Ignition Engines, Aachen: Ph.D. thesis, Rheinisch-westfälische Technische Hochschule, 2006.
- [6] M. Grill und M. Bargende, „The Development of an Highly Modular Designed Zero-Dimensional Engine Process Calculation Code,“ *SAE Paper*, Bde. %1 von %22010-01-0149, 2010.
- [7] C. Bossung, M. Bargende, O. Dingel und M. Grill, „A quasi-dimensional charge motion and turbulence model for engine process calculations,“ *15. Internationales Stuttgarter Symposium*, 17./18 März 2015.
- [8] S. Hann, L. Urban, M. Grill und M. Bargende, „Prediction of burn rate, knocking and cycle-to-cycle variations of binary compressed natural gas substitutes in consideration of reaction kinetics influences,“ *IJER*, 2017.
- [9] M. Bargende und M. Grill, „Zukunft der Motorprozessrechnung und 1D-Simulation,“ *Motortechnische Zeitschrift*, Nr. Jubiläumsausgabe, 2014.
- [10] M. Wenig, M. Grill und M. Bargende, „A New Approach for Modeling Cycle-to-Cycle Variations Within the Framework of a Real Working-Process Simulation,“ *SAE International Journal of Engines*, Bde. %1 von %22013-01-1315, Nr. 6, pp. 1099-1115, 2013.
- [11] A. Fandakov, M. Grill, M. Bargende und A. C. Kulzer, „Two-Stage Ignition Occurrence in the End Gas and Modeling Its Influence on Engine Knock,“ *SAE International Journal of Engines*, Nr. 2017-24-0001, 2017.

- [12] M. e. a. Grill, „Quasi-Dimensional Modeling of Spark Ignition Engine Combustion with Variable Valve Train,“ *SAE Technical Paper*, Nr. 2006-01-1107, 2006.
- [13] A. Fandakov, M. Grill, M. Bargende, M. Mally und A. C. Kulzer, „A new model for predicting the knock boundary with EGR at full load,“ *10. MTZ Conference on the Charge Cycle in Combustion Engines*, 2017.
- [14] A. Fandakov, M. Grill, M. Bargende und A. C. Kulzer, „A Two-Stage Knock Model for the Development of Future SI Engine Concepts,“ *SAE Technical Paper*, Nr. 2018-01-0855, 2018.
- [15] A. Fandakov, M. Mally, L. Cai und A. C. Kulzer, „Development of a Model for Predicting the Knock Boundary in Consideration of Cooled Exhaust Gas Recirculation at Full Load,“ *5. IAV International Conference on Knocking in Gasoline Engines*, 2017.
- [16] M.-T. Keskin, M. Grill und M. Bargende, „Development of a Fast, Predictive Burn Rate Model for Gasoline-HCCI,“ *SAE Paper*, 2016.
- [17] Focus Online, „Abgasnorm Euro 7: Was geplant ist,“ 18th May 2018. [Online]. Available: https://www.focus.de/auto/news/abgas-skandal/abgasnorm-euro-7-schon-in-vorbereitung-milliarden-bussgelder-und-neue-grenzwerte-eu-will-elektroautos-erzwingen_id_8948048.html.
- [18] European Commission, „Regulation (EU) 2017/1151,“ *Official Journal of the European Union*, 7th July 2017.
- [19] European Commission, „Regulation (EU) 2017/1154,“ *Official Journal of the European Union*, 7th May 2017.
- [20] G. Fraidl und M. Westerhoff, „Addressing the statistically relevant operation modes,“ *MTZ worldwide*, pp. 24-26, June 2017.
- [21] H. Baumgarten, J. Scharf, A. Balazs und al., „Simulation-Based Development Methodology for Future Emission Legislation,“ *37th International Vienna Motor Symposium*, 2016.
- [22] L. Urban, M. Grill, S. Hann und M. Bargende, „Simulation of Autoignition, Knock and Combustion for Methane-Based Fuels,“ *SAE Technical Paper*, Nr. 2017-01-2186, 2017.
- [23] A. Schmid, M. Grill, H.-J. Berner und M. Bargende, „Transient simulation with scavenging in the turbo spark-ignition engine,“ *MTZ worldwide*, Bd. 7, Nr. 71.11, pp. 10-15, 2010.

Energieeffiziente Fahrstrategien für hochautomatisierte Fahrzeuge

Energy Efficient Driving Strategies for Highly Automated Vehicles

M. Eng. Jonas Gutsche, Dr.-Ing. Rico Baumgart,
Dipl.-Ing. Jörg Aurich, Dipl.-Ing. Wieland Gelke,
Dr.-Ing. Frank Schrödel, IAV GmbH, Chemnitz

Kurzfassung

Derzeit wird die Entwicklung von energieeffizienten Elektrofahrzeugen sehr stark vorangetrieben. Das Ziel hierbei ist, die Reichweite dieser Fahrzeuge möglichst ohne Komforteinbußen zu maximieren. Dies wird zum Teil mit technisch sehr aufwendigen und kostenintensiven Lösungen erreicht.

Ein sehr hohes Potential zur Energieeinsparung bietet die Fahrstrategie. Diese wird bei gewöhnlichen Pkw vom individuellen Fahrstil des Fahrers bestimmt und ist somit hinsichtlich der Energieeffizienz nicht optimal. Hingegen besteht bei hochautomatisierten Pkw die Möglichkeit, auf den Steuergeräten entsprechende Algorithmen zu implementieren, welche mittels Sensordaten, Informationen aus dem Internet sowie aus Car2x-Kommunikationen eine energetisch effiziente Fahrstrategie realisieren.

Derartige Strategien und Algorithmen werden derzeit bei der IAV GmbH entwickelt. In einer ersten Untersuchung wurde analysiert, welche energetischen Einsparpotentiale durch intelligente Fahrstrategien in einem hochautomatisierten Pkw gegenüber einem heutigen, nicht-automatisierten Fahrzeug möglich sind. Hierfür wurde ein umfassendes Fahrzeugmodell erstellt, welches neben dem Antriebsstrang und der Leistungselektronik auch die wesentlichen Nebenverbraucher, wie beispielsweise die Klimaanlage, berücksichtigt.

Dieses Modell wird im vorliegenden Beitrag näher beschrieben. Des Weiteren wird die Wirkungsweise der Algorithmen anhand beispielhafter Fahrtrouten und Verkehrssituationen dargestellt. Dabei werden auch die Energieeinsparpotentiale sowie die Zeitbedarfe für die einzelnen Fahrtrouten für ein exemplarisches Elektrofahrzeug aufgezeigt.

Die Untersuchungen machen deutlich, dass mit intelligenten Fahrstrategien in hochautomatisierten Pkw erhebliche Reichweitensteigerungen gegenüber nichtautomatisierten Fahrzeugen möglich sind. In weiterführenden Untersuchungen sollen die Algorithmen um zusätzliche Funktionalitäten erweitert werden, wie z.B. die Berücksichtigung von Wetterdaten. Damit lassen sich dann u.a. auch die Energiebedarfe für die Nebenaggregate, wie die Klimaanlage, besser prognostizieren. Ebenso besteht damit auch die Möglichkeit, bereits vor Fahrtbeginn Thermomanagementstrategien zu planen und diese in die Routenplanung mit einzubeziehen.

1. Einleitung und Motivation

Bestärkt durch den Klimawandel wird seitens der Politik und der Automobilindustrie derzeit die Entwicklung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen sehr stark vorangetrieben. Eines der stärksten Argumente, welches heutzutage noch gegen den Kauf eines Elektrofahrzeugs spricht, ist neben dem hohen Kaufpreis die geringe Reichweite. Aus diesem Grund wird zum Teil ein sehr hoher technischer und finanzieller Aufwand betrieben, um den Energiebedarf des Antriebsstranges sowie der Nebenverbraucher zu senken und damit die Reichweite zu erhöhen.

Ein wesentliches Potential zur Senkung des Energieverbrauches bietet jedoch auch die aktuelle Entwicklung von hochautomatisierten Fahrzeugen. In heutigen Pkw wird die Fahrstrategie durch den individuellen Fahrstil des Fahrers bestimmt, welcher in den meisten Fällen nicht der effizientesten Fahrweise entspricht. Im Vergleich zu einem menschlichen Fahrer können hingegen in einem hochautomatisierten Fahrzeug mit Hilfe von Sensoren, Kamera-systemen, Internetinformationen und Car2x-Funktionalitäten wesentlich mehr Parameter vorausschauend erfasst und schneller verarbeitet werden. Aus diesen Daten lässt sich unter Berücksichtigung der technischen Gegebenheiten des Fahrzeugs, wie z.B. dem Wirkungsgradkennfeld des Antriebsstranges und des Batterieladezustandes, eine energieeffiziente Fahrstrategie ableiten.

Im Rahmen eines Projektes bei der IAV GmbH wurde analysiert, welche energetischen Einsparungen und Reichweitensteigerungen durch energieeffiziente Fahrstrategien in einem hochautomatisierten Pkw möglich sind. Für diesen Zweck wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches im Folgenden näher vorgestellt werden soll. Mit Hilfe dieses Modells wurden für ein beispielhaftes Elektrofahrzeug unterschiedliche Fahrstrategien anhand mehrerer Fahrt-routen und Verkehrssituationen untersucht und die Energie- sowie Zeitbedarfe bestimmt.

2. Simulationsmodell

Das im Folgenden vorgestellte Simulationsmodell lässt sich prinzipiell in die vier Teilmodelle Routenplanung, Makroebene, Mikroebene und Fahrzeugsimulation untergliedern (Abb. 1). Während das Preprocessing sowohl die Routenplanung als auch die Makroebene vor der Fahrt umfasst, findet die Planung der Mikroebene während der Fahrt statt. Die Makroebene und die Mikroebene sind mit einem Fahrzeugsimulationsmodell gekoppelt, mit dem z.B. der Energie- und Zeitbedarf für eine bestimmte Fahrtstrecke ermittelt werden kann.



Bild 1: Programmstruktur der Gesamtfahrzeugsimulation

In der Routenplanung werden mit Hilfe entsprechender Kartendaten und eines A*-Algorithmus [1] mehrere infrage kommende Wegstrecken vom Start- zum Zielort ermittelt. Für diese Routen werden dann in der Makroebene auf Basis der Kartendaten und den darin enthaltenen Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie Kurvenradien und Topologiedaten die Geschwindigkeitstrajektorien abgeleitet. Damit lassen sich die Fahrzeit sowie der Energiebedarf des Fahrzeugs prognostizieren, was schließlich die Auswahl einer energieeffizienten Fahrtroute ermöglicht. Des Weiteren können im Bedarfsfall auch Zwischenstopps zum Laden der Batterie in die Fahrtroute eingeplant werden. Die Ermittlung der Geschwindigkeitstrajektorie sowie die Berechnung der Energiebedarfe erfolgen mittels eines Fahrzeugmodells, welches neben sämtlichen mechanischen und elektrischen Komponenten des Antriebsstrangs auch alle wesentliche Nebenaggregate berücksichtigt, wie z.B. die Klimaanlage, die Sitz- und Scheibenheizung sowie die Lenkhilfepumpe.

Die Planung der Mikroebene findet während der Fahrt statt. Dabei wird anhand von Sensor- und Kameradaten sowie aus Car2x-Kommunikationen die Geschwindigkeitstrajektorie an die jeweilige Verkehrssituation angepasst. Hierbei werden z.B. auch andere Verkehrsteilnehmer, Baustellen und Ampeln berücksichtigt. Die erforderlichen Bremsvorgänge werden unter

Berücksichtigung der Motorparameter und des momentanen Ladezustandes der Batterie derart geregelt, dass möglichst viel Bremsenergie rekuperiert werden kann. Ebenso werden auch die Beschleunigungsvorgänge mit Hilfe der „vorausschauenden“ Systeme energieeffizient gestaltet.

Für die Brems- und Beschleunigungsvorgänge wurde der im Folgenden beschriebene Ansatz entwickelt, welcher neben der energetischen Effizienz auch den Fahrkomfort berücksichtigt. Die Geschwindigkeitstrajektorie wird mit Hilfe eines Polynoms fünften Grades (Gl. 1 und Abb. 2) gebildet. Die Differentiation dieses Polynoms liefert die Gleichungen für die Beschleunigung (Gl. 2) und den Ruck (Gl. 3).

$$v(s) = \alpha + \beta \cdot s + \gamma \cdot s^2 + \delta \cdot s^3 + \varepsilon \cdot s^4 + \zeta \cdot s^5 \quad (1)$$

$$v'(s) = a(s) = \beta + 2 \cdot \gamma \cdot s + 3 \cdot \gamma \cdot s^2 + 4 \cdot \varepsilon \cdot s^3 + 5 \cdot \zeta \cdot s^4 \quad (2)$$

$$v''(s) = r(s) = 2 \cdot \gamma + 6 \cdot \delta \cdot s + 12 \cdot \varepsilon \cdot s^2 + 20 \cdot \zeta \cdot s^3 \quad (3)$$

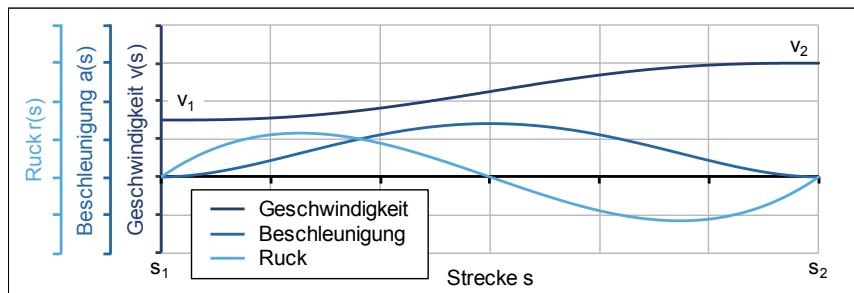


Bild 2: Polynomfunktion für die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und den Ruck für eine beispielhafte Geschwindigkeitsänderung von v_1 auf v_2 zwischen den Positionen s_1 und s_2

Dieser Ansatz kann sowohl für Beschleunigungs- als auch für Bremsvorgänge angewendet werden und ermöglicht einen guten Fahrkomfort sowie eine Anpassung der Charakteristik zugunsten einer hohen Energieeffizienz oder einer sportlich orientierten Fahrdynamik. Zur Bestimmung der noch unbekannten Koeffizienten α bis ζ können folgende Randbedingungen aufgestellt werden (vgl. Abb. 2):

Geschwindigkeit an den Positionen s_1 und s_2

1. $v(s = s_1) = v_1$

$$2. \quad v(s = s_2) = v_2$$

Beschleunigungsfreiheit an den Positionen s_1 und s_2

$$3. \quad v' = a(s = s_1) = 0$$

$$4. \quad v' = a(s = s_2) = 0$$

Ruckfreiheit an den Positionen s_1 und s_2

$$5. \quad v'' = r(s = s_1) = 0$$

$$6. \quad v'' = r(s = s_2) = 0$$

Damit lässt sich schließlich ein Gleichungssystem mit sechs Gleichungen und sechs Unbekannten formulieren, dessen Lösung die Koeffizienten α bis ζ liefert. Zur Lösung dieses Gleichungssystems müssen jedoch die Positionen s_1 und s_2 bekannt sein.

Bei einem Bremsvorgang ist zumeist die Position s_2 bekannt, ab der eine bestimmte Zielgeschwindigkeit v_2 erreicht sein muss. Der Startpunkt s_1 für die Verzögerung wird im einfachsten Fall dahingehend festgelegt, dass unter Beachtung der technischen Möglichkeiten des Fahrzeugs die gesamte Bremsenergie rekuperiert werden kann. Nur wenn eine stärkere Verzögerung erforderlich ist, wird mit Hilfe der mechanischen Bremsanlage ein zusätzliches Bremsmoment erzeugt.

Bei einer Geschwindigkeitserhöhung von v_1 auf v_2 - beispielsweise am Ortsausgang - wird im Modell die Wegstrecke s_2 derart bestimmt, dass sich für den Beschleunigungsvorgang ein möglichst geringer Energiebedarf ergibt. Dies erfolgt unter Berücksichtigung des Wirkungsgradkennfeldes des Antriebsstranges und der zur Verfügung stehenden Beschleunigungsstrecke (z.B. aus Kartendaten).

Die Abb. 3 zeigt drei verschiedene Beschleunigungsvorgänge von der Anfangsgeschwindigkeit $v_1 = 50$ km/h auf die Endgeschwindigkeit $v_2 = 100$ km/h. Darüber hinaus ist auch das Wirkungsgradkennfeld des Antriebsstranges eines exemplarischen Elektrofahrzeugs dargestellt. Darin sind für die beiden Geschwindigkeiten v_1 und v_2 die entsprechenden Betriebspunkte gekennzeichnet. Diese Punkte sind durch eine Kurve (gestrichelte Linie) mit den bestmöglichen Wirkungsgraden verbunden. Die Umsetzung des Beschleunigungsvorgangs entlang dieser Kurve ist zwar theoretisch möglich, jedoch würde der Geschwindigkeitsverlauf dann nicht mehr der ruckfreien Polynomfunktion entsprechen, was zu Komforteinbußen führt.

Der Fall a stellt einen idealisierten Fall dar, bei dem das Fahrzeug mit dem maximal möglichen Drehmoment beschleunigt wird. Dieser Beschleunigungsvorgang führt zwar zur kürzesten Beschleunigungsstrecke (s_1 bis s_{2a}), jedoch wird der Antriebsstrang dabei, wie aus dem Kennfeld ersichtlich ist, mit geringeren Wirkungsgraden betrieben. Des Weiteren folgt in diesem Fall der Geschwindigkeitsverlauf nicht der Polynomfunktion, wodurch der Beginn und das Ende des Beschleunigungsvorganges nicht ruckfrei erfolgen und somit der Fahrkomfort beeinträchtigt wird. Ein weiterer Nachteil einer solchen Vollastbeschleunigung besteht in den hohen Batteriestromen und der damit einhergehenden erhöhten Batterieerwärmung.

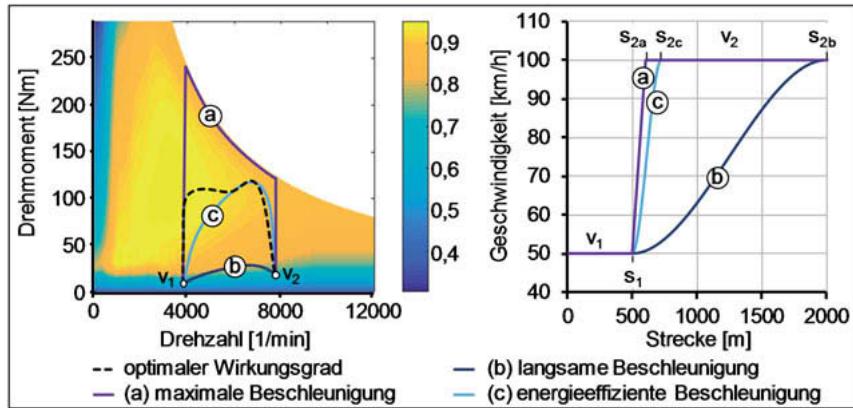


Bild 3: Beschleunigungsfälle und Antriebsstrangwirkungsgrad für ein Elektrofahrzeug

Der Fall b beschreibt einen sehr langsamen Beschleunigungsvorgang, welcher entsprechend der obigen ruckfreien Polynomfunktion ausgeführt wurde. Auch hierbei arbeitet der Antrieb mit geringen Wirkungsgraden.

Im Fall c wurde der Endpunkt für die Polynomfunktion (s_{2c}) im Modell derart bestimmt, dass der Antriebsstrang mit möglichst hohen Wirkungsgraden betrieben wird. Wie aus dem Bild ersichtlich ist, liegen in diesem Beschleunigungsfall die Betriebspunkte in der Nähe der Kurve mit den besten Wirkungsgraden.

In Abb. 4 ist für eine beispielhafte Stadtfahrt die Geschwindigkeitstrajektorie (hellblaue Kurve) abgebildet, welche mit dem obigen Ansatz hinsichtlich einer hohen Energieeffizienz und eines guten Fahrkomforts ermittelt wurde. Im realen Fahrzeug würde dieser Schritt in der Makroebene vor Fahrtbeginn (vgl. Abb. 1) durchgeführt werden. Des Weiteren sind in Abb. 4 die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Wegstrecke dargestellt (dunkelblaue

Kurve). Diese wurden mittels des entwickelten Algorithmus anhand von hochgenauen Karten-daten bestimmt. Für die Kurven wurden im Modell auf Basis einer definierten maximalen Fahr-zeugquerbeschleunigung und der aus den Kartendaten ermittelten Kurvenradien die gesetz-lichen Höchstgeschwindigkeiten auf praktikable Werte reduziert. Mit Hilfe der Geschwindig-keitstrajektorie können z.B. vor der Fahrt der Energie- und Zeitbedarf für die Strecke abge-schätzt und je nach Batterieladezustand eventuelle Zwischenstopps zum Laden eingeplant werden. Dies ermöglicht wiederum die Festlegung einer energieeffizienten Fahrtroute.

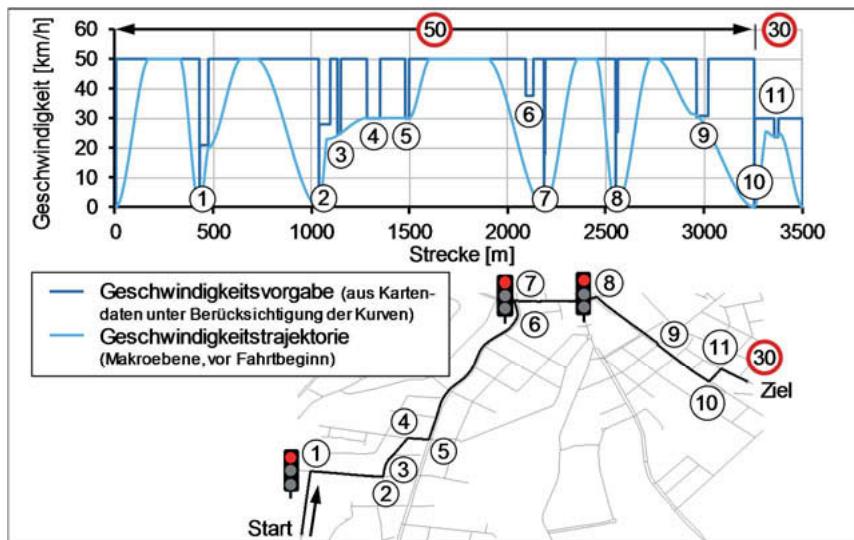


Bild 4: Geschwindigkeitstrajektorie aus der Makroebene (vor Fahrtbeginn) für eine beispielhafte Stadtfahrt

Nach dem Start wird die Geschwindigkeit innerhalb von 172 m auf die zulässige Höchstge-schwindigkeit von 50 km/h gesteigert. Der Beschleunigungsverlauf wurde dabei, wie bereits oben beschrieben, mittels des Polynomansatzes hinsichtlich einer hohen Energieeffizienz und eines guten Fahrkomforts ermittelt. Am Ende der Straße befindet sich eine Ampelkreuzung (Position 1). Da bei der Bildung der Geschwindigkeitstrajektorie vor Fahrtbeginn sowohl die Ampelschaltung, als auch die Verkehrssituation noch unbekannt sind, wird davon ausge-gangen, dass sämtliche Ampeln auf der Route rot zeigen und somit das Fahrzeug bei Er-reichen einer Ampelkreuzung halten muss. Der Bremsvorgang wird etwa 100 m vor der Kreuzung (Position 1) eingeleitet und erfolgt wiederum gemäß der Polynomfunktion. Der

Bremspunkt wird im Modell derart bestimmt, dass die gesamte Bremsenergie rekuperiert werden kann. Nach dem Stopp an der Ampel wird die Geschwindigkeit zunächst auf 21 km/h erhöht, was der errechneten Maximalgeschwindigkeit für diese Rechtskurve (1) entspricht. Anschließend wird das Fahrzeug weiter bis auf 50 km/h beschleunigt.

An der Position 2 ist eine weitere Stopphase zu erkennen, da es sich hierbei um eine Linksabbiegung handelt und im Modell auf der Makroebene vor der Fahrt davon ausgegangen werden muss, dass Gegenverkehr herrscht.

An den Positionen 3, 4 und 5 wurden vom Modell keine Haltepunkte detektiert, sondern die jeweiligen errechneten Kurvengeschwindigkeiten angesetzt. Zwischen diesen Positionen dürfte das Fahrzeug theoretisch mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h fahren. Allerdings ist die zur Verfügung stehende Wegstrecke für eine energieeffiziente Beschleunigung mit anschließender Verzögerung zu kurz. In einem solchen Fall wird im Modell entweder die Zielgeschwindigkeit auf einen technisch realisierbaren Wert reduziert oder, wie im vorliegenden Fall, keine Beschleunigung zwischen den Punkten vorgenommen.

3. Ergebnisse

In Bild 5 sind für ein beispielhaftes Elektrofahrzeug die simulierten Energie- und Zeitbedarfe in der Makroebene dargestellt, die auf Basis der Geschwindigkeitstrajektorien für verschiedene Fälle ermittelt wurden.

Bild 5a zeigt die Ergebnisse für die bereits im Bild 4 dargestellte Stadtfahrt. Hierbei wurde ein hochautomatisiertes Fahrzeug einem nichtautomatisierten Fahrzeug gegenübergestellt, wobei für letzteres jeweils ein sehr sportlicher Fahrertyp (A) und ein gemäßigter Fahrertyp (B) betrachtet wurden. Für den sportlichen Fahrertyp wurde angenommen, dass dieser - sofern möglich - mit maximalem Motordrehmoment beschleunigt, nicht vorrausschauend fährt und sehr stark verzögert, so dass keine Bremsenergie zurückgewonnen werden kann. Für den gemäßigten Fahrer wurden die Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge derart modelliert, dass diese gut mit Messwerten aus einer Testfahrt für diese Route übereinstimmen. Für das hochautomatisierte Fahrzeug (HAF) wurde die im Kapitel 2 beschriebene energieeffiziente Fahrstrategie gemäß der Polynomfunktion zugrunde gelegt.

Der höchste Energiebedarf wird erwartungsgemäß durch den sportlichen Fahrertyp (A) verursacht. Die gemäßigte Fahrweise des Fahrers B führt einerseits zu einem geringeren Beschleunigungsenergiebedarf (hellblau) und andererseits besteht die Möglichkeit, Energie aus den Bremsvorgängen zu rekuperieren (schwarz umrahmt), was letztendlich eine Reduzierung des

Gesamtenergiebedarfes bewirkt. Mit Hilfe der im Kapitel 2 beschriebenen energieeffizienten Fahrstrategie kann für ein hochautomatisiertes Fahrzeug (HAF) der Energiebedarf nochmals deutlich gesenkt werden. Neben dem geringeren Energiebedarf für die Beschleunigung ist dies vor allem darauf zurückzuführen, dass die Bremsvorgänge hinsichtlich einer größtmöglichen Rekuperation definiert werden. Gegenüber dem sportlichen Fahrer (A) lässt sich der Energiebedarf damit um 48,9 % reduzieren und im Vergleich zum gemäßigten Fahrer (B) ergibt sich eine Energieeinsparung von 29,2 %. Der Zeitbedarf für die 3,5 km lange Strecke steigt gegenüber dem Fahrer A um 101 s bzw. um 35,6 % an und im Vergleich zu Fahrer B beträgt der zusätzliche Zeitbedarf 68 s (21,5 %).

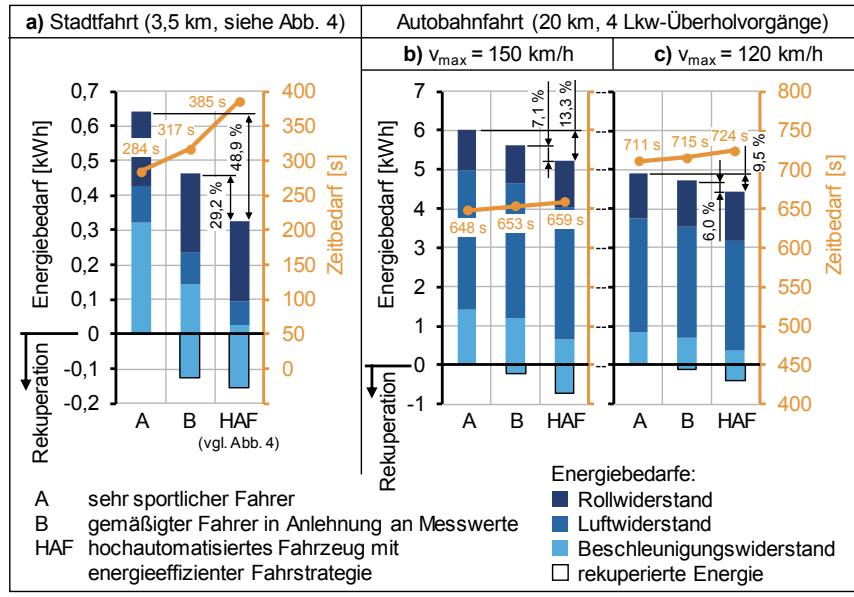


Bild 5: Energie- und Zeitbedarfe für verschiedene Fahrstrecken

(Fahrt in der Ebene, Nebenverbraucher vernachlässigt)

Neben der Stadtfahrt wurde zusätzlich noch eine Autobahnfahrt über eine Strecke von 20 km betrachtet. Hierbei wurde angenommen, dass sich das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 150 km/h (Bild 5a) bzw. 120 km/h (Bild 5b) bewegt und insgesamt viermal aufgrund von LKW-Überholvorgängen auf eine Geschwindigkeit von 80 km/h verzögern muss und anschließend wieder beschleunigt. Auch hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie bereits bei der

Stadt fahrt. Durch die energieeffiziente Fahrstrategie in einem hochautomatisierten Fahrzeug (HAF) lassen sich der Beschleunigungsenergiebedarf senken und die rekuperierte Energie steigern, so dass sich auch diesem Fall deutliche Energieeinsparungen zwischen 6 % und 13,3 % gegenüber den nichtautomatisierten Fahrzeugen A und B ergeben. Im Gegensatz zur Stadt fahrt sind jedoch wesentlich geringere zusätzliche Zeitbedarfe zu verzeichnen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die derzeitige Entwicklung von hochautomatisierten Fahrzeugen bietet die Möglichkeit, mit Hilfe von Sensor- und Kamerasystemen sowie Car2x-Kommunikationen energieeffiziente Fahrstrategien umzusetzen, mit denen die Reichweite von Elektrofahrzeugen erhöht werden kann.

Bei der IAV GmbH wurde eine Fahrstrategie für hochautomatisierte Elektrofahrzeuge entworfen, womit u.a. die Planung einer energieeffizienten Route möglich ist. Dabei wird in einem ersten Schritt auf Basis von Kartendaten eine Geschwindigkeitstrajektorie für die Fahrtroute erstellt. Die Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge werden im Modell unter Berücksichtigung des Antriebsstrangwirkungsgradkennfeldes hinsichtlich einer hohen Energieeffizienz bzw. einer hohen Rekuperationsfähigkeit und eines guten Fahrkomforts definiert.

Für diese Fahrstrategie wurden für verschiedene Szenarien die Energie- und Zeitbedarfe simuliert und denen eines nichtautomatisierten Fahrzeuges gegenübergestellt. Im Falle einer Stadt fahrt konnten im Vergleich zu einem nichtautomatisierten Fahrzeug je nach Fahrertyp Energieeinsparungen zwischen 29,2 % und 48,9 % aufgezeigt werden. Im Falle der untersuchten Autobahnfahrt ergaben sich Energieeinsparungen zwischen 6 % und 13,3 %.

Diese Ergebnisse machen deutlich, dass eine Weiterführung der Untersuchungen als sehr lohnenswert anzusehen ist. In einem nachfolgenden Projekt sollen im Modell u.a. Verkehrs- und Wetterdaten für ein prädiktives Thermomanagement berücksichtigt und hinsichtlich der Energieeinsparpotentiale bewertet werden. Darüber hinaus ist das Modell derart weiterzuentwickeln, dass es auch in einem realen Fahrzeug während der Fahrt eingesetzt werden kann. Hierfür sollen die Sensor- und Kameradaten sowie die Car2x-Informationen entsprechend verarbeitet und zur Anpassung der vorab erstellten Geschwindigkeitstrajektorie sowie zur Optimierung der Fahrstrategie herangezogen werden. Als Beispiel hierfür ist z.B. die vorausschauende Erfassung von Ampelsignalen und deren Berücksichtigung in der Fahrstrategie zu nennen. Letztendlich sollen diese Algorithmen auf dem IAV-eigenen hochautomatisierten Fahrzeug erprobt werden.

Literatur

- [1] HART, Peter; NILSSON Nils J.; RAPHAEL, Bertram „A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths“, 1968, Manlo Park, Kalifornien USA

Cloud-basierte Fahrzeugfunktionen

Cloud als neue Umgebung für die Fahrzeugregelung

Cloud-based vehicle functions

Cloud as a new environment for vehicle control

Dipl.-Ing. **Farzaneh Milani**, Robert Bosch GmbH, Renningen;
Prof. Dr. **Christian Beidl**, Technische Universität Darmstadt

Kurzfassung

Die zunehmenden Anforderungen an die Rechenleistung und den Speicherplatz im Fahrzeug und begrenzte on-board Ressourcen stellen wichtige Herausforderungen für die Realisierung der neuen und innovativen Fahrzeugregelung dar. Cloud Computing ist eine Schlüsseltechnologie zur Realisierung von zunehmend komplexeren Fahrzeugfunktionen. Die sogenannten cloud-basierten Fahrzeugfunktionen laufen in der Cloud und reduzieren dadurch die Ressourcen-Anforderungen im Fahrzeug. Während einige Anwendungen, wie z.B. Routenberechnung, unbedenklich in die Cloud verlagert werden können, steht diese Methode bei kritischeren Fahrzeugfunktionen, wie z.B. Antriebsregelung, vor diversen Herausforderungen. Vor allem die funktionale Sicherheit und hohe Latenzzeiten im Mobilfunknetz stellen wichtige Herausforderungen bei dieser Methode dar. Daher muss die Eignung jeder Fahrzeugfunktion für die Auslagerung in die Cloud in einer früheren Entwicklungsphase überprüft werden. In diesem Paper präsentieren wir eine neue Methodik zur Eignungsanalyse von Fahrzeugfunktionen für die Auslagerung in die Cloud.

Abstract

Using cloud computing for vehicle applications is a key technology to overcome the computational limitation in vehicles. Cloud-based vehicle functions use cloud capabilities and reduce the on-board computing and storage requirements. While some vehicle applications, such as route calculation, can be outsourced without serious safety implications, other applications, like powertrain strategy, are facing various challenges. In particular functional safety and varying latency time over cellular network represent major challenges. Therefore, a reliable method to verify the suitability of functions for outsourcing in the cloud is required. In this paper we present a novel approach to evaluate the suitability of vehicle functions for cloud application.

1. Introduction

Electrification, autonomous driving and connectivity are major trends in future mobility. Connectivity is considered as prerequisite for autonomous driving and is indispensable for extending the range of electric vehicles. Furthermore, using information from other vehicles, intelligent infrastructure and cloud improves safety, efficiency and driving comfort in the vehicle. Obtaining and utilizing external information require changes in actual vehicle software, which causes more software complexity. This leads in turn to increasing on-board resource requirements. In addition, the amount of exchanged data between connected vehicles and their surrounding infrastructure is growing continuously.

Restricted numbers of on-board electronic control units (ECUs) and limited communication bandwidth are major challenges for future connected mobility. Hence, it is inevitable to find new methods which reduce in-vehicle computing requirements and amount of exchanged data between vehicle and its external entities. Utilizing cloud capability is one conceivable way to achieve this target. In the next section we present the concept of cloud-based vehicle functions and its motivation and technical challenges.

2. Cloud-based vehicle functions

In order to overcome the limitation of vehicle on-board resources, cloud computing can be deployed. According to the definition of National Institute of Standards and Technology (NIST), cloud computing is a model which enables sharing computing resources such as servers, storage, applications and services [1].

The increasing number of connected vehicles with internet access facilitates the access and usage of cloud computing for vehicular applications. By outsourcing suitable functions, the so-called cloud-based vehicle functions (CB-VF) run temporary or permanently in the cloud and use cloud capability instead of vehicle on-board resources. Fig. 1 shows the concept of cloud-based vehicle functions.

The communication between vehicle functions in the cloud and on-board ECUs is realized over cellular network. For this, each vehicle should be equipped with a connectivity unit with cellular communication capability.

CB-VFs have direct access to cloud information, thus the communication effort between cloud and vehicles can be reduced. Furthermore, predictive information in the cloud data center, such as actual weather condition and road situation, can be used for predictive control strategies.

Function update in the cloud is a further advantage of CB-VFs. Thereby the drivers have always access to the latest function version. Otherwise, CB-VFs facilitate the access to the real-time vehicle information, which can be stored in a cloud data center and used for customized services.

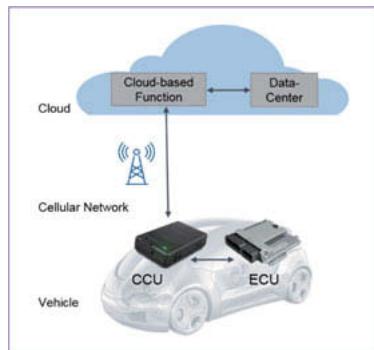


Fig. 1: Concept of cloud-based vehicle functions

Despite the mentioned advantages, the concept of CB-VFs is facing various challenges. In particular, functional safety and communication over cellular network represent major challenges.

In contrast to in-vehicle communication busses, the latency time of cellular network is varying depending on different factors, such as day time or number of network participants. The network availability and interruptions in dead spot zones are other disadvantages, which can lead to serious consequences for the vehicle control system. Furthermore, the security aspects in the cellular network should be addressed.

In consideration of mentioned challenges, the suitability of vehicle functions for cloud application should be ensured in an early stage of development. Otherwise, outsourcing inappropriate functions can lead to serious consequence for functional safety and waste development time. In the next section, a new methodology for suitability evaluation for CB-VFs is proposed.

3. Suitability analysis method for cloud-based vehicle functions

The suitability analysis methodology (SAM) has to determine whether the requirements of candidate functions can be fulfilled in the cloud. Furthermore, the methodology should compare both alternatives, local ECU and cloud and ascertains which environment is more appropriate for the candidate function.

3.1 Method approach

Function requirements, e.g. memory usage and execution time, are required for SAM and should be provided by the function developer. The method determines evaluation degrees for both environments, ECU and cloud. The evaluation degree is a number between 0 and 1 and represents the suitability of candidate function in each environment. Fig. 2 illustrates the approach of suitability analysis method (SAM) for CB-VFs.

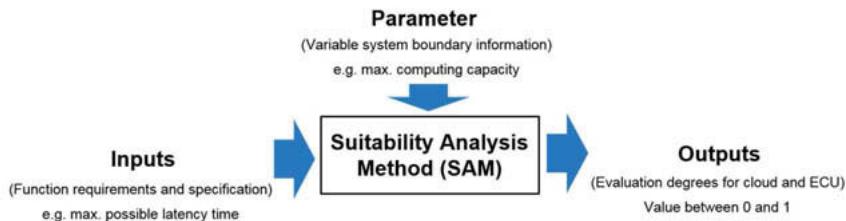


Fig. 2: Concept of suitability analysis method (SAM) for cloud-based vehicle functions

Some system boundary information, such as available computing resources in vehicle and performance of cellular network, are variable. Therefore, SAM has to be adaptable to the actual system boundaries. In addition, SAM should be universal and applicable for various vehicle functions from different domains, such as powertrain, chassis and multimedia. In order to ensure that the evaluation results are reliable, all relevant function requirements and system boundaries must be considered.

By suitability analysis for CB-VFs we face on one hand various criteria, like response time, and on the other hand dependency between the criteria. The multi criteria decision analysis (MCDA) is a decision making technique to choose, rank or sort alternatives in situations of multiple and conflicting criteria [2] and is a proper method to deal with mentioned approaches.

3.2 Multi criteria decision analysis methods

The MCDA is a collection of various methods to select the most appropriate alternative, based on a decision matrix [3]. In order to use MCDA technique for SAM, the following questions should be answered:

- 1) Which criteria for suitability analysis of vehicle functions for cloud application must be considered?
- 2) Which of MCDA methods are appropriate for suitability analysis method?

3.3 Relevant criteria for suitability analysis

In order to identify the relevant criteria for suitability analysis, the system boundaries of the concept of CB-VFs should be analyzed and compared to the in-vehicle scenario. *Fig. 3* shows the defined primary criteria for suitability analysis.

Primary criteria for suitability analysis			
Capacity Demand	Data Dependency	Response Time	Safety & Security
<p>Cloud: Functions with very high computing/ storage requirements</p> <p>ECU: Functions with low computing/ storage requirements</p>	<p>Cloud: Functions with high input data from cloud</p> <p>ECU: Functions with high input data from on-board sensors or other vehicle functions</p>	<p>Function Response time should be within the defined deadline time</p> $t_{\text{Resp}} = t_{\text{Exe}} + t_{\text{Trans}}$	<p>Cloud: Functions which provide an added-value and optimise existing functions</p> <p>ECU: Safety critical functions and functions which are needed for driving</p>

Fig. 3: Primary criteria for suitability analysis method (SAM)

Capacity demand

We consider the capacity demand as storage and computing requirements of a vehicle application. First, SAM must trade-off between available on-board resources and function requirements.

Increasing computing resources in vehicle causes more monetary costs. Cloud computing costs are varying based on platform, computation time, stored data etc. [4]. Therefore capacity demand is defined as a cost criteria and SAM should evaluate the viability of both scenarios.

Data dependency

The data dependency is considered as the relation between a vehicle application and its input resources and output destinations. Conventional vehicle functions use only information from on-board sensors and other vehicle functions and their outputs are destined for actuators or other in-vehicle control functions.

CB-VFs have access to the information from cloud data center and vehicle. Their output can be destined for other CB-VFs or in-vehicle functions. For example predictive CB-VFs, which use large amount of cloud data, have high data dependency to the cloud. In contrast, vehicle functions with large inputs from on-board sensors have high data dependency to the vehicle. *Fig. 4* illustrates the data dependency for CB-VFs.

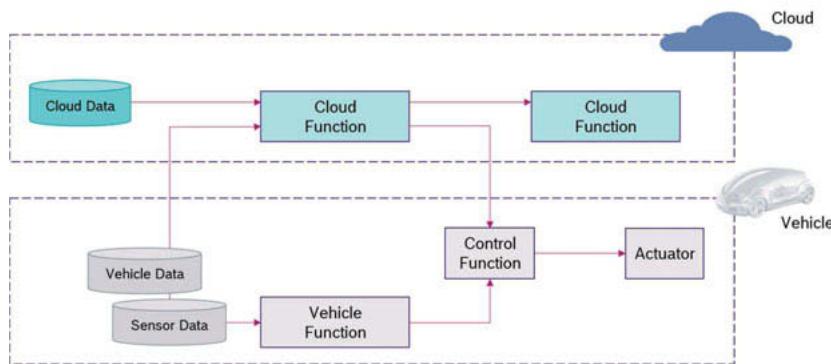


Fig. 4: Data dependency for CB-VFs

The most of mobile network providers offer “pay-as-use” data transfer models. Therefore, high amount of exchanged data between vehicle and cloud causes high communication cost and effort. In order to minimize the communication effort, it's preferable that the functions run in an environment with higher data dependency. The ratio of data dependency is defined as relation of volume of input/ output data from each environment to total volume of input/ output data. For example the consistency ratio for input data from cloud can be calculated as follow:

$$D_{Input\ Cloud} = \frac{Volume\ of\ input\ data\ from\ cloud}{Volume\ of\ total\ input\ data}$$

Response time

The response time is defined as the interval between the activation date and the termination date of a function. The deadline time is the maximum time at which the execution of an application must be completed [5]. The quality of the vehicle control functions depends on their average response time and the response time should be always within the deadline time. SAM must verify if this condition is fulfilled and ascertain which scenario, cloud-based or local, has lower response time. To calculate the response time for CB-VFs, the transmission time between cloud and vehicle and the variable latency time of cellular network should be considered.

Safety and Security

As mentioned, functional safety and security are two important challenges by outsourcing of vehicle functions. Attacks on CB-VFs can lead to loss of valuable information and know-how. Otherwise, hackers can manipulate the vehicle function in the cloud. Therefore, by suitability analysis the security requirements of vehicle application should be considered.

The functional safety can be affected by long delay time or inaccurate data. Vehicle functions with high automotive safety integrity levels (ASIL), should remain in the vehicle. Thus SAM must check if the functional safety requirements are met. Furthermore, it should be verified that the distributed functionality between cloud and ECU does not impair the functional safety of in-vehicle functions.

3.4 Hierarchical structure of suitability analysis method

To find the adequate environment for the candidate functions, sub criteria also have to be considered. For that reason the suitability analysis problem should be organized in a hierarchical structure. The simplest form of this structure consist of three layers: 1) goal of decision analysis, 2) relevant criteria for decision making and 3) possible alternatives [6]. *Fig. 5* shows the hierarchical structure of SAM for cloud-based functions.

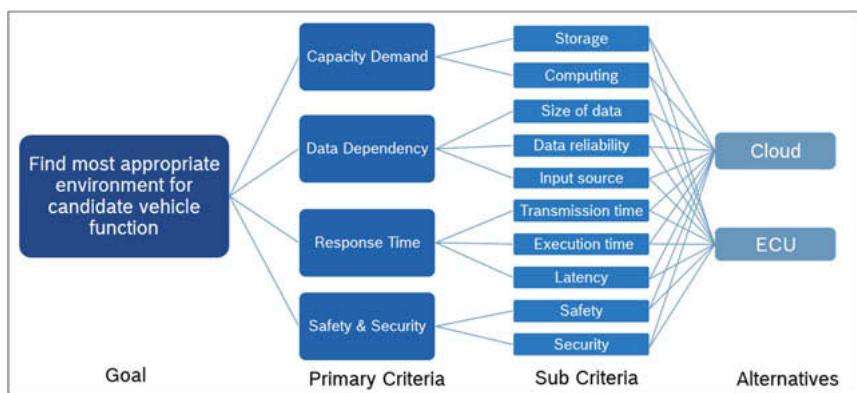


Fig. 5: Hierarchical structure of suitability analysis method

3.3 Decision matrix

After identifying the relevant criteria for SAM, the decision matrix can be created. The decision matrix comprises alternatives, relevant criteria, weights of criteria and evaluation grades [2].

Fig. 6 shows the decision matrix for suitability analysis of vehicle functions for on-board ECU and cloud. The evaluation grades of criteria indicate how well their requirements can be fulfilled in the cloud and ECU. These normalized values ($f_{i,j}$) are related to the respective criterion in each column [7]. For example, ($f_{1,1}$) and ($f_{2,1}$) represent the relative performance of cloud and ECU in terms of capacity demand. For vehicle functions with very high computing requirements, e.g. image processing, the capacity requirements can be met better in the cloud and accordingly, the evaluation grade for the cloud is higher than for the ECU. In the case that the computing requirements cannot be fulfilled in ECU, for instance for data mining functions for preventive diagnostics, the evaluation grade for ECU is 0.

Primary criteria for suitability analysis					
	Capacity Demand	Response Time	Data Dependency	Safety & Security	
Alternatives	w_1	w_2	w_3	w_4	Weight
Cloud (a_1)	$f_{1,1}$	$f_{1,2}$	$f_{1,3}$	$f_{1,4}$	Evaluation Grade
ECU (a_2)	$f_{2,1}$	$f_{2,2}$	$f_{2,3}$	$f_{2,4}$	

Fig. 6: Decision matrix for suitability analysis method (SAM)

The weight of a criterion describes its importance for the candidate function. It also indicates the severity of consequences, if the criterion requirements cannot be fulfilled. The weight of criteria can be determined by pairwise comparison [6]. For example, the consequences of exceeding the deadline time for time critical functions is very high and the criterion response time has to be weighted higher. For vehicle functions which can affect the vehicle's normal operation mode, e.g. parts of a control strategy, the weight of functional safety must be selected accordingly very high.

There are various aims for outsourcing of a function, such as saving monetary cost, minimizing communication effort and improving execution time. The importance of each criterion can also vary depending on the aim of outsourcing. As an example, consider that the candidate function is responsible for optimizing the driving strategy based on stored data in the cloud. If the main aim by outsourcing is to reduce the communication effort, the criterion data dependency has to be weighted high. In contrast, if the main motivation is to improve the execution time, the weight of the criterion computing demand must be selected high.

Based on weights and evaluation grades of whole criteria, the suitability analysis method calculates the overall evaluation degrees for cloud and vehicle. This final result supports the function developer to select the appropriate environment for the candidate function.

4. Conclusion

The growing complexity in automotive embedded software and the increasing utilization of information from external entities underline the need to find new concepts to overcome the limitation of vehicle on-board resources. One feasible method is to use cloud computing and run vehicle functions in the cloud. Because of the safety critical characteristic of vehicle applications, the suitability of functions for running in the cloud must be verified. In this paper we propose a new methodology to evaluate the suitability of vehicle functions for the cloud application. The proposed method determines how well the functions requirements can be fulfilled in the cloud compared to the on-board ECUs and ascertains which environment is more appropriate for candidate functions.

Bibliography

- [1] P. Mell and T. Grance, The NIST definition of cloud computing, U.S. National Institute of Standards and Technology Special Publication, 2011.
- [2] S. Greco, M. Ehrgott and J. R. Figueira, Multiple Criteria Decision Analysis, New York: Springer, 2016.
- [3] M. Whaiduzzaman, A. Gani and N. Badrul Anuar, "Cloud Service Selection Using Multicriteria Decision Analysis," *The Scientific World Journal*, 2014.
- [4] B. Furht and A. Escalante, Handbook of Cloud Computing, Boston: Springer, 2010.
- [5] J. Schäuffele and T. Zurawka, Automotive Software Engineering, Wiesbaden: Springer, 2016.
- [6] T. L. Saaty and L. G. Vargas, Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process, Boston: Springer, 2012.
- [7] Z. u. Rehman, O. K. Hussain and F. K. Hussain, "Iaas Cloud Selection using MCDM Methods," in *IEEE Ninth International Conference on e-Business Engineering*, Hangzhou, China , 2012.