



# Informationen

... über Forschung, Entwicklung und Anwendung der Antriebstechnologien  
... über Analyse und Beurteilung von Motoren- und Antriebskonzepten  
... über die Aspekte der Energie  
... über Auswirkungen auf Mensch und Umwelt

---

## Von den Motorbetriebsstoffen zu den mobilen Antrieben

Dr. Christian Lämmle, Vizepräsident SSM

*Gehe nicht dahin, wo der Puck ist.  
Gehe dahin, wo der Puck sein wird (Wayne Gretzky)*

Veränderungen erleben wir im täglichen Leben, in unseren Unternehmungen und insbesondere auch in der Mobilität. Diesem Umstand sollte sich auch ein führender Verein wie das SSM (Studienforum Schweiz für mobile Antriebstechnik) nicht verschliessen. Während sich die vormalige SSM (Schweizerische Studiengesellschaft für Motorbetriebsstoffe) zu Beginn mit der Verknappung von flüssigen Kraftstoffen und dadurch Ersatzkraftstoffen beschäftigte, erfolgten in der Nachkriegszeit Diskussionen zu Themen wie Lagerstabilität, Dampfblasenbildung, Klopfestigkeit und Kälteverhalten. Seit den 1980-er Jahren stand zunehmend die Optimierung der Motorentechnik im Hinblick auf Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch im Fokus. Die zunehmende Vielfalt der Mobilitätssysteme und -bedürfnisse sehen wir als Chance, uns als kompetentes Gremium und Anlaufstelle für viele Fragen der Mobilität zu präsentieren und

gleichzeitig breiter aufzustellen. Dabei gilt es, die Balance zwischen Bewährtem – und nach wie vor Nützlichem – und Neuerungen zu finden. Zentral bleibt deshalb die jährliche SSM-Tagung, die den Austausch, die Diskussionen, persönliche Kontakte und die Weiterbildung fördert. Die Tagung betrachten wir nach wie vor als äusserst wertvoll für unser Netzwerk. Auf der anderen Seite sollen die SSM-Mitglieder im Forum Technik – in der Regel jährlich zwei Veranstaltungen – viel stärker als bisher eingebunden werden, damit das bestehende Wissen ausgetauscht werden kann und der Nutzen einer SSM-Mitgliedschaft erhöht wird. Neue Mitglieder, die unsere Wissensbasis mit wertvollen Inputs erweitern können, sind sehr willkommen, um dem möglichen zukünftigen Antriebssystem im Studienforum Schweiz für mobile Antriebstechnik gerecht zu werden. In diesem Sinne wünsche ich allen Mitgliedern eine erfolgreiche sanfte Evolution.

Weitere Informationen:

- Statuten des neuen SSM: [www.ssm-studies.ch/fileadmin/pdf/SSM/Statuten\\_SSM\\_2019.pdf](http://www.ssm-studies.ch/fileadmin/pdf/SSM/Statuten_SSM_2019.pdf)

## Elektroauto-Bewertung in Holland

*Erich Schwizer, TCS Emmen*

Die niederländische Zeitung „De Volkskrant“ hat einen „Kilowattknaller“-Index zum Vergleichen von Elektrofahrzeugen publiziert.

Weil das Angebot an Elektroautos breiter werde, sei es für Konsumenten schwieriger die richtige Wahl zu treffen. Einen Nachmittag im Internet, und Sie werden eines finden, das zu Budget, Steuervorteilen oder Klimaambitionen passt – oder auch nicht, denn E-Autos sind immer noch teuer, schreibt de Volkskrant.

Verglichen werden 13 Elektroautos mit mindestens 200 km Reichweite nach WLTP-Standard, Platz für vier Personen und weniger als 12 Monaten Lieferzeit (Stand April 2019). Zwei Überlegungen im Vergleich sind meines Erachtens vorzüglich.

Grundlage für den Kilowattknaller-Index ist der Neuwagenpreis dividiert durch die maximale Anzahl Kilometer Reichweite. Damit kostet ein Hyundai Kona 91 Euro pro Kilometer Reichweite und erhält den günstigsten Index. Das Tesla Modell X kostet mit 206 Euro pro

Kilometer Aktionsradius am meisten. Aber dafür bekommt der Käufer echte Flügeltüren. Beim Modell mit dem günstigsten Kaufpreis, dem Hyundai Ioniq für rund 34'000 Euro kommt der Kilometer Reichweite auf 155 Euro zu stehen.

Mit der Zunahme von Schnellladestationen wird auch die Ladegeschwindigkeit zu einem wichtigen Argument. Um viele Kilometer Reichweite in kurzer Zeit „tanken“ zu können, ist eine grosse Batterie erforderlich. Hohe Ladegeschwindigkeiten werden nämlich nur erreicht, wenn die Batterie weder vollständig leer noch fast voll ist. Eine grosse Batterie hat einen grösseren mittleren Bereich als eine kleine.

Das „schnellste“ Tesla Modell S erreicht an der Ladestation eine Geschwindigkeit von 530 Kilometer Reichweite pro Lade-Stunde, dicht gefolgt vom Audi e-tron mit 510 Kilometern Reichweite pro Lade-Stunde. Vor wenigen Jahren war dies noch undenkbar.

Weitere Informationen:

Artikel in der niederländischen Zeitung: <https://www.volkskrant.nl/kijkverder/t/de-beste-elektrische-autos>

## Antriebsbatterien für e-Fahrzeuge (Teil 1)

*Markus Peter, AGVS*

Das Herzstück von reinen Elektrofahrzeugen und zugleich auch die teuerste Komponente bildet die Antriebsbatterie. Während in den Anfangszeiten der Elektromobilität (das war vor rund 120 Jahren!) noch auf Bleibatterien gesetzt wurde, kamen später Nickel-Cadmium- und schliesslich Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz. Bei Hybridfahrzeugen ohne externe Lademöglichkeit bewähren sich die Nickel-Metallhydrid-Batterien, welche verhältnismässig günstig sind und deren Nachteil der stärkeren Selbstentladung insofern nicht gravierend ist, als die Batterie durch den Verbrennungsmotor oder Rekuperation wieder aufgeladen wird. Plug-In-Hybridfahrzeuge bedienen sich demgegenüber analog zu den reinen Elektrofahrzeugen in aller Regel der Lithium-Ionen-Technologie.

Typische Werte für eine in einem Elektroauto eingesetzte Lithium-Ionen-Batterie sind eine Spannung von 400 Volt und ein Energieinhalt

von 50 kWh. Dies reicht bei einem für Mittelklasseautos üblichen Verbrauch von 15 bis 20 kWh/100 km für eine Reichweite von rund 300 Kilometer. Fertig konfektioniert und inklusive der Kühl- und Sicherheitselemente beträgt die charakteristische Energiedichte 150 Wh pro kg. Für eine 50 kWh-Lithium-Ionen-Batterie bedeutet dies folglich ein Gewicht von 333 Kilogramm. Die in den meisten Hybrid-Autos anzutreffenden Nickel-Metallhydrid-Batterien weisen Spannungen im Bereich von 200 Volt und Energieinhalte im einstelligen kWh-Bereich auf. Dem Vorteil dieser kompakten Batterien steht der Nachteil einer eingeschränkten rein elektrischen Reichweite von einigen wenigen Kilometern gegenüber.

Für automobiler Anwendungen wurde noch vor einigen Jahren auf herkömmliche Zellen aus der Unterhaltungselektronik zurückgegriffen. Inzwischen kommen spezifisch für den Fahrzeugbereich entwickelte Zellen zum Einsatz.

Dementsprechend hat sich auch der elektrische Aufbau innerhalb einer Batterie verändert. Wurden beispielsweise beim Tesla Roadster noch tausende Rundzellen parallel und seriell miteinander verbunden, genügen bei neueren Elektroautos rund 100 in Serie geschaltete Zellen, da eine einzelne Zelle schon eine sehr hohe Kapazität aufweist. Mit Hilfe der Serienschaltung wird die Zellspannung von 3,7 Volt (gilt für Lithium-Ionen; Nickel-Metallhydrid-Zellen haben eine Spannung von 1,2 Volt) entsprechend der Anzahl Zellen auf Werte von mehreren hundert Volt für die ganze Batterie multipliziert. Dank des hohen Spannungsniveaus kann die für den Elektromotor benötigte Stromstärke über verhältnismässig geringe Leiterquerschnitte geführt werden.

Wer sich über die technischen Daten bzgl. des Energieinhalts der Batterie informieren möch-

(Teil 2 des Artikels folgt im nächsten SSM-Newsletter im Januar 2020)

te, stösst zuweilen auf unterschiedliche Angaben zu deren Höhe. Das liegt zum einen daran, dass bei immer mehr Herstellern verschieden grosse Batterien zur Auswahl stehen. Darüber hinaus wird zwischen Brutto- und Nettoenergieinhalt unterschieden. Während für den Autofahrer vor allem der Nettoenergieinhalt, also die für ihn nutzbare Energiemenge, relevant ist, so ist für Werkstätten und Hersteller auch der Bruttoenergieinhalt interessant, da dieser eine Aussage über die aufgrund der Zellchemie zur Verfügung stehende maximal mögliche Energiemenge erlaubt. Während letztere aufgrund der Alterungs- und Lade-Entladeprozesse kontinuierlich abnimmt, wird der Nettoenergieinhalt über einen möglichst langen Zeitraum aufrechterhalten. Dies bedeutet gleichzeitig, dass die Differenz zwischen Netto- und Bruttoenergieinhalt stetig kleiner wird.

## Entwicklungen bei Lithium-Ionen-Batterien

*Christian Bach, Empa*

Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge machten in den letzten Jahren eine schnelle Entwicklung durch. Ein wesentlicher Grund dafür sind verbesserte Kathodenmaterialien, wie beispielsweise der Ersatz des NMC-1:1:1 (d.h. gleiche Anteile an Nickel (N), Mangan (M) und Kobalt (C)) durch NMC 5:3:2 oder 6:2:2<sup>1</sup>. Andere Hersteller verwenden Batterien mit Nickel, Kobalt und Aluminium (NCA) mit einem Nickelanteil von >80%. Ein Vorteil dieser Batterien ist, dass das problematische Kobalt reduziert wird. Man kann auch in den nächsten Jahren kontinuierliche Fortschritte in diesem Bereich erwarten.

Als nächster grösserer Entwicklungsschritt ist der Ersatz des heute noch flüssigen und brennbaren Elektrolyts durch nicht-brennbare, anorganische Festkörper Elektrolyte absehbar. Solche Batterien weisen eine verbesserte Betriebssicherheit auf und sie versprechen durch den Einsatz von metallischem Lithium als Anodenmaterial – anstatt heutigen Graphit-Anoden – sowohl eine höhere Energiedichte als auch kürzere Ladezeiten; wobei die Verhinderung der Dendritenbildung, die zu Kurzschlüssen führen könnte, eine Herausforderung darstellt. Festkörperbatterien mit

metallischem Lithium werden ab 2030 in E-Fahrzeugen erwartet.

NMC 6:2:2-Batterien enthalten pro kWh Speicherkapazität rund 1.1 kg an Lithium, Nickel, Kobalt und Mangan, was ungefähr 15% der Batteriemasse ausmacht<sup>2</sup>. Der Rest ist Kupfer, Aluminium, Stahl und sonstige Materialien. Die Rohstoffe dazu müssen aufbereitet und zu Batteriezellen bzw. Batterien verarbeitet werden, was zu entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Bei bisherigen Batterien stammten 60% der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verwendung von Elektrizität und 40% aus Hochtemperaturwärme für die Aufbereitung der Rohstoffe<sup>2</sup>. Aufgrund von energetischen Optimierungen bei der Batterieherstellung konnte der Stromverbrauch in den letzten Jahren halbiert werden.

Entscheidend für die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Batterien ist aber auch der Strommix bei der Herstellung. Nimmt man den aktuellen Strommix in China mit 1'100 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> an<sup>3</sup>, resultieren rund 175 kg CO<sub>2</sub>/kWh Batteriekapazität. Bei 800 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> (mittlerer Strommix der Batterie-Herstellere Länder China, Korea, Japan, USA)<sup>4</sup> resultiert eine Emission von 145 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Bis 2030 geht man von einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Belastung bei der

Strombereitstellung in China auf 620 bzw. in den Batterie-Herstellungsländern auf 335 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> aus, was – in Verbindung mit den o.g. Effizienzmassnahmen – bedeutet, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Batterieherstellung auf 70 bzw. 55 kg CO<sub>2</sub>/kWh Batteriekapazität sinken könnte. Bei erneuerbarer Elektrizität

können Werte um 40 kg CO<sub>2</sub>/kWh Batteriekapazität erreicht werden.

Diese Zahlen, wie auch Verbrauchsannahmen, werden teilweise „unreflektiert“ verwendet, was dann zu divergierenden Einschätzungen zur CO<sub>2</sub>-Minderung von Elektrofahrzeugen führt.

Weitere Informationen:

- <sup>1</sup> Zimmer, W. et al; Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors – Endbericht. Öko-Institut, DLR, Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), INFRAS, Berlin (2016)
- <sup>2</sup> Bernhard W.; Recycling von Li-Ionen-Batterien im Kontext von Technologie- und Preisentwicklungen; ATZ-elektronik (2019)
- <sup>3</sup> Sternberg A. et al; Treibhausgasemissionen für Batterie und BZ-Fahrzeuge mit Reichweiten >300km; Fraunhofer ISE (2019)
- <sup>4</sup> Agora Verkehrswende; Klimabilanz von Elektroautos (2019)

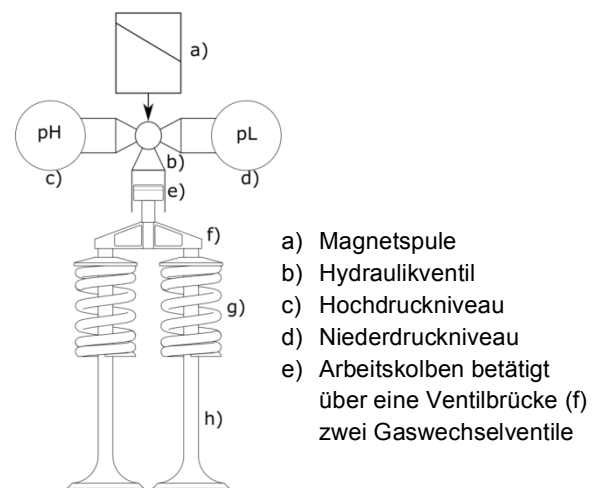
## FlexWork – ein neuer elektrohydraulischer Ventiltrieb

Norbert Zsiga, Empa

Die Flexibilität bezüglich Ventilöffnungszeiten beim Gaswechsel in Verbrennungsmotoren ist zur Erhöhung der Effizienz oder des Drehmoments wichtig. Dazu wurden für Benzinmotoren variable Nockenwellen entwickelt. Diese reduzieren die Drosselverluste und ermöglichen Zylinderabschaltungen, was den Wirkungsgrad im Teillastbereich erhöht. Die Systeme basieren in der Regel auf mechanischen Verstellmöglichkeiten, was die Masse des Motors wie auch die Reibung des Ventiltriebs erhöht.

In Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Wolfgang Schneider in Thun wurde an der Empa ein neuartiger, vollvariabler elektrohydraulischer Ventiltrieb entwickelt, der einen geringeren Eigenenergiebedarf aufweist als ein Nockenwellenantrieb und sich mit Motor-kühlmittel betreiben lässt. Dieser Ventiltrieb mit dem Namen „FlexWork“ weist keine Nockenwelle und auch keine Verbindung zur Kurbelwelle auf, sondern für die Einlass- und Auslassseite pro Zylinder je ein elektrohydraulisches Modul, das von einem zentralen Hydrauliksystem versorgt wird.

Pro Öffnungsvorgang wird jedes Ventil beschleunigt und abgebremst. Für die Beschleunigung muss Energie eingesetzt werden. Bei mechanischen Ventiltrieben wird diese über die Nockenwellen direkt eingebracht. Beim FlexWork-Ventiltrieb geschieht das via Hydraulikdruck, der über eine elektrische Pumpe erzeugt wird; der Strom dazu wird indirekt über das elektrische System von der Kurbelwelle abgezweigt.



### FlexWork - Schematischer Aufbau

Die Ventile werden gegen Ventildedern geöffnet, die die Ventile anschliessend wieder schliessen. Kurz bevor die Ventile den vorgesehenen Hub erreicht haben, müssen sie abgebremst werden. Bei Nockenwellen wird dies durch die Form der Nocken gemacht, beim FlexWork-Ventiltrieb durch eine hydraulische Verschaltung, die die kinetische Energie des Ventils in einen zweiten Drucktank ableitet und es so abbremst. Diese abgeleitete kinetische Energie stellt eine Rekuperation dar, die dazu führt, dass der Eigenverbrauch des FlexWork-Ventiltriebs geringer ist als derjenige konventioneller Systeme.

Der FlexWork-Ventiltrieb wurde aus gewöhnlichen, korrosionsbeständigen Werkstoffen mit konventionellen Methoden gefertigt. Als Arbeitsmedium wird eine 1:1-Wasser-Ethylenglykol-Mischung verwendet (Kühlflüssigkeit). Dies bringt die Vorteile einer ge-

genüber Ölen höheren Steifigkeit und eines komplett ölfreien Zylinderkopfs. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, das Motorenöl weniger stark mit Additiven zu versetzen, da die grossen Flächenpressungen an den Nocken ausbleiben. Somit gelangen weniger Katalysatorgifte oder filterblockierende Asche über die Verbrennung in das Abgas, was die Lebensdauer der Abgasnachbehandlung verlängert.

Der Ventiltrieb kommt mit einer sehr einfachen Sensorik und Aktuatorik aus, ist vergleichs-

weise einfach in der Herstellung und ermöglicht dennoch eine enorm hohe Flexibilität zur Optimierung des Motorbetriebs. Erste Versuche an einem 4-Zylinder-Gasmotor zeigen deutliche Wirkungsgradsteigerungen. Im Betriebspunkt 2'000 U/min und 2 bar Mitteldruck (typischer Teillast-Betriebspunkt) wurde eine Wirkungsgradsteigerung von 13% erreicht. Mit Zylinderabschaltung steigt der Wirkungsgrad in diesem Betriebspunkt sogar auf 26% an, was einer Verbesserung um 21% entspricht.

Weitere Informationen:

- Zsiga N., Omanovic A., Soltic P., Schneider W.; Funktionsweise und Potenziale eines neuartigen, elektrohydraulischen Ventiltriebs; MTZ 09/2019

## Veranstaltungen und Termine

17. Sept. 2019      SSM/SAE Switzerland Vortragstagung, Campus Sursee  
„Wasserstoffmobilität – Hype oder Realität?“  
<http://www.ssm-studies.ch/vortragstagungen/vortragstagung-ssm-2019>
16. - 19. Sept.2019      Schweizer Mobilitätsarena, Bern  
Veranstaltung der Mobilitätsakademie des TCS  
<https://www.mobilitaetsarena.ch/de/programm.php>
28. Okt. 2019      1. SSM-Forum, 15 – 17 h, EMPA Dübendorf (offen für alle Mitglieder)  
Synthetische Treibstoffe – energetische, technische und wirtschaftliche Hintergründe  
Einladung per E-Mail an die Mitglieder SSM folgt