

GENERATOR-ELEKTRISCHE ANTRIEBE FÜR ELEKTROFAHRZEUGE

EINE ANTRIEBSTECHNIK, DIE UNS HEUTE BEREITS MIT DER ZUKUNFT VERBINDET

Le Corbusier war einer der einflussreichsten Architekten in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts und verknüpfte den in dieser Zeit erlebten Wandel mit radikalen Forderungen nach neuen Gestaltungsformen für Wohnung, Staat und Kunst. Bereits 1925 formulierte er die Bedeutung von Mobilität und Verkehr:

„EINE STADT DER SCHNELLIGKEIT IST EINE STADT DES ERFOLGES“.

Heute lebt bereits mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten und viele dieser Städte wachsen mit einer ungeheuren Dynamik: 1950 waren nur die Metropolen New York und Tokio größer als 10 Millionen Einwohner – mittlerweile gibt es bereits 29 sogenannte Megastädte, in denen insgesamt 470 Millionen Menschen leben. In solchen Metropolregionen konzentrieren sich Chancen, Talente und Investitionen – die leistungsfähigsten Ballungsräume verfügen über eine größere Wirtschaftskraft als die der meisten Länder.

Neben den drei klassischen Produktionsfaktoren – Kapital, Arbeit sowie Grund und Boden – berücksichtigen Wirtschaftswissenschaftler heute immer öfter auch den Faktor Distribution, also die Gesamtleistung von organisatorischem und physischem Aufwand, der notwendig ist, um die klassischen Produktionsfaktoren zu einer Produktion zusammenzuführen. Genau das ist aber in den Metropolregionen oftmals ein großes Problem, weil deren Entwicklung immer demselben Muster folgt: Während die Größe der einzelnen Haushalte schrumpft, steigt deren Anzahl und damit die Nachfrage nach Wohnungen und Infrastruktur. Deshalb haben Mobilität und Verkehr in diesem Kontext tatsächlich eine dienende Funktion; sie sind über wirtschaftliche und infrastrukturelle

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Bartningstr. 47
64289 Darmstadt
www.lbf.fraunhofer.de

Ansprechpartner
Dipl.-Ing. Rüdiger Heim
Bereichsleiter Betriebsfestigkeit
ruediger.heim@lbf.fraunhofer.de
Telefon +49 6151 705-283
www.lbf.fraunhofer.de/gev

Parameter, aber auch über soziologische und demographische Merkmale mit der gesellschaftlichen Entwicklung verbunden. Diese Entwicklung hat ihren Preis: Der Transport von Personen und Gütern verbraucht Energie und beansprucht Verkehrsfläche. Die verkehrsbedingten Emissionen von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid, Stickstoffoxiden, flüchtigen Kohlenwasserstoffen, Staub und Feinstaub verursachen Atemwegserkrankungen durch schlechte Luft (Abbildung 1) sowie Klimafolgeschäden durch Treibhausgasemissionen. Hinzu kommen Verkehrslärm, Flächenversiegelung und Unfälle.



Abb. 1: Umweltbelastung durch Feinstaub in großen Städten im Jahr 2002 |
Quelle: Weltbank

Die Europäische Umweltagentur publizierte jüngst die Ergebnisse eigener Berechnungen, nach denen im Jahr 2014 in Deutschland mehr als 80.000 Personen aufgrund von Atemwegserkrankungen durch Feinstaub und Stickoxide vorzeitig starben. Verkehrsbedingte Emissionen haben daran einen nicht geringen Anteil – auch wenn sich gerade in den Städten das Bild anders darstellt als es viele vermitteln wollen.

DIE EUROPÄISCHE UNION HAT FÜR PKW IN DEN JAHREN SEIT 2000 INSGESAM VIER NEUE ABGASNORMEN EINGEFÜHRT UND EIN EURO-6 DIESEL DARF NUR NOCH 80 MG STICKOXID PRO KILOMETER EMITTIERT. DEMGEGENÜBER BETRÄGT DIE EMISSION VON BUSSEN IM LINIENBETRIEB BIS ZU 550 MG PRO KILOMETER UND PASSAGIER!

Das King's College berechnete für London die Anzahl vorzeitiger Todesfälle wegen Luftverschmutzung auf eine Größenordnung von 9.500 im Jahr 2010; das waren knapp 0.1% der dort lebenden Menschen. Im Jahresmittel betrug dort die Feinstaubbelastung 15 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft. Drei Jahrzehnte zuvor waren es noch mehr als 60 Mikrogramm und vor einhundert Jahren war die Luft mit mehr als 500 Mikrogramm Feinstaub belastet – zu einer Zeit, in der Henry Ford gerade mit der Fließbandproduktion seiner Fahrzeuge begonnen hatte. Heute werden jährlich mehr als 83 Millionen Fahrzeuge produziert. Im Jahr 2010 gab es erstmals mehr als eine Milliarde Fahrzeuge weltweit und diese Zahl wird sich voraussichtlich bis spätestens 2040 nochmals verdoppeln. Seit Jahren wächst die globale Flotte um ein Fahrzeug pro Sekunde und verursacht heute rund 18% der Emissionen klimaschädlicher Treibhausgase (THG).

Solche Zahlen verdichten sich zu Bildern, die uns ein wenig ideen- und atemlos zurücklassen: Mit der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls verpflichteten wir uns, die Treibhausgas-Emissionen in Deutschland bis 2020 gegenüber 1990 um mindestens 40 Prozent zu reduzieren. Die verkehrsbedingten Klimagasemissionen lagen 2016 aber um etwa 2 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente über dem Wert von 1990. Im Rahmen der letzten UN-Klimakonferenz in Bonn im November 2017 bestätigte auch die Bundesregierung, dass die vereinbarten Klimaschutzziele für 2020 wahrscheinlich nicht erreicht werden – obwohl die durch Erneuerbare Energien vermiedenen Emissionen mehr als fünf Mal so hoch sind wie 1990. Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien trug 2016 mit rund 74 % zu der vermiedenen Menge an Treibhausgasen gegenüber 1990 bei. Der Wärmebereich war für 23 % der vermiedenen Menge verantwortlich; der Verkehrssektor demgegenüber nur für 3 %, was vorrangig durch den Einsatz von Biokraftstoffen möglich war.

Elektromobilität

Klimapolitisch besitzt die Elektromobilität also noch keinen Effekt: Die Anzahl der Fahrzeuge ist vergleichsweise niedrig und die in der Stromproduktion heute noch anfallenden Emissionen liegen in der Größenordnung wie die dadurch vermiedenen CO₂-Emissionen aus der Nutzung fossiler Kraftstoffe in Verbrennungskraftmaschinen. Das Kraftfahrtbundesamt dokumentierte zum 1. Januar 2017 einen Bestand von 34.022 batterieelektrischen Fahrzeugen und eine Anzahl von 21.644 neu zugelassenen Fahrzeugen bis Ende November 2017 – das sind also gut 55.000 reine Elektrofahrzeuge zu diesem Stichtag. Plug-in-Hybridelektrische Fahrzeuge (PHEV) erreichten in 2017 bei den Neuzulassungen einen geringfügig höheren Marktanteil und wiesen eine um knapp 5.000 Einheiten höhere Verkaufszahl aus.

Die Elektromobilität kämpft unverändert mit den bekannten Vorbehalten gegenüber dieser Technologie: Zu teuer, zu schwer sowie eine zu geringe Reichweite bei einer gleichzeitig zu geringen Anzahl von öffentlichen Ladepunkten. Im November 2015 sagte der Vorsitzende der *Nationalen Plattform Elektromobilität* (NPE), *Prof. Henning Kagermann*:

„DIE LADEINFRASTRUKTUR MUSS MIT DEN STÜCKZAHLEN DER ELEKTROFAHRZEUGE MITWACHSEN. DENN DIE NUTZER WOLLEN IHRE ELEKTROFAHRZEUGE VERLÄSSLICH UND KOMFORTABEL LADEN KÖNNEN – SEI ES AM ARBEITSPLATZ, WÄHREND DES EINKAUFENS ODER ZWISCHENDURCH BEI LANGSTRECKENFAHRTEN. FÜR WIRTSCHAFT UND POLITIK GILT ES NUN, DEN AUSBAU MIT GEMEINSAMEN INVESTITIONEN IM SINNE DER NUTZER VORANZUTREIBEN.“

Es ist aber nicht allein die Anzahl der verfügbaren Ladepunkte, es ist auch die zur Energiespeicherung notwendige Zeit: Im Zeitraum von 13 Stunden – also vom Abstellen des Fahrzeugs in der heimischen Garage bis zur Fahrt am nächsten Morgen – lässt sich an einer konventionellen Steckdose gerade einmal die Energie für eine Fahrt von rund 200 km speichern. Die heute leistungsfähigsten Ladepunkte erlauben es, diese Zeit um den Faktor 100 zu verkürzen – anstatt 13 Stunden warten wir dann nur noch etwa 8 Minuten – sicherlich eine Voraussetzung für das Reisen auf Fernstraßen und Bundesautobahnen. Das Problem hierbei ist, dass solche Ladesäulen technisch sehr aufwendig und dementsprechend teuer sind sowie eine Ladeleistung zur Verfügung stellen, die heutige Hochvolt-Energiespeicher deutlich überfordert und deren Lebensdauer stark herabsetzen würde. Zwischen diesem High-Power-Charging (HPC) und einer normalen Steckdose befindet sich der Bereich des beschleunigten Ladens, das eine Ladeleistung von >22 kW zur Verfügung stellt und einen Großteil aktueller

und zukünftiger Initiativen zum Ausbau der öffentlichen bzw. halböffentlichen Ladeinfrastruktur darstellen wird.

Aktuell gibt es in Deutschland weniger als 7.000 öffentlich zugängliche Ladepunkte – über 90% davon mit einer Ladeleistung von höchstens 22 kW. Unterstützt durch staatliche Subventionen sollen in den nächsten Jahren mehr als 20.000 zusätzliche Ladepunkte entstehen, die dann den Bedarf für rund 800.000 Elektrofahrzeuge bedienen könnten, sofern diese überwiegend zu Hause und am Arbeitsplatz geladen werden. Aktuell gehen Politik, Fahrzeughersteller und Energieversorgungsunternehmen davon aus, dass ein Elektrofahrzeug nur 15% seines Energiebedarfs an öffentlich zugänglichen Ladesäulen aufnimmt und deshalb ein einzelner Ladepunkt ausreichend ist, um rund 30 Elektrofahrzeuge zu versorgen.

Nach *Tesla* hat jetzt auch ein Konsortium europäischer Fahrzeughersteller damit begonnen, an den Fernstraßen in Nord- und Mitteleuropa sowie in England ein Netz mit zunächst 400 besonders leistungsfähigen Ladestationen aufzubauen. In dieser Hinsicht hat *Tesla* mit seinen mehr als 750 Ladestationen – den sogenannten Super Charger – allein in Europa einen großen Vorteil: Kein anderer Fahrzeughersteller hat es bisher verstanden, seinen Kunden die Elektromobilität als ein eigenes Ökosystem anzubieten. Dennoch ist es auch für *Tesla* ein steiniger Weg: Die Unternehmensverluste stiegen in der vergangenen Bilanzperiode weiter an – auch weil das Unternehmen die Anzahl seiner Ladestationen deutlich erhöhen will.

Im Umfeld der für die Elektromobilität notwendigen Ladeinfrastruktur sind valide Prognosen zur Entwicklung von Geschäftsmodellen und Bedarfen kaum möglich, da in Erfahrung und Bewußtsein verankerte Analogiemöglichkeiten noch fehlen. Zwar hatte die NPE bereits vor Jahren in ihrer Vision 2020 formuliert, dass ein

„GESAMTSYSTEM ELEKTROMOBILITÄT [...] GESELLSCHAFTLICH BREIT AKZEPTIERT IST, INDIVIDUELLE MOBILITÄTSBEDÜRFNISSE MIT HOHER VERFÜGBARKEIT UND ZUVERLÄSSIGKEIT GEWÄHRLEISTET SOWIE TECHNISCH ANSPRUCHSVOLLE UND PROFITABLE PRODUKTE AM MARKT PLATZIERT“,

aber das Nutzungs- und Kaufverhalten potenzieller Autokunden sieht noch deutlich anders aus. Deshalb stellte die Bundesregierung auf ihrer Fach- und Ideenkonferenz zur Elektromobilität im Sommer 2016 die Frage: „Das Elektroauto – Extravaganz für wenige oder automobiler Normalität der Zukunft?“ (Abbildung 2).

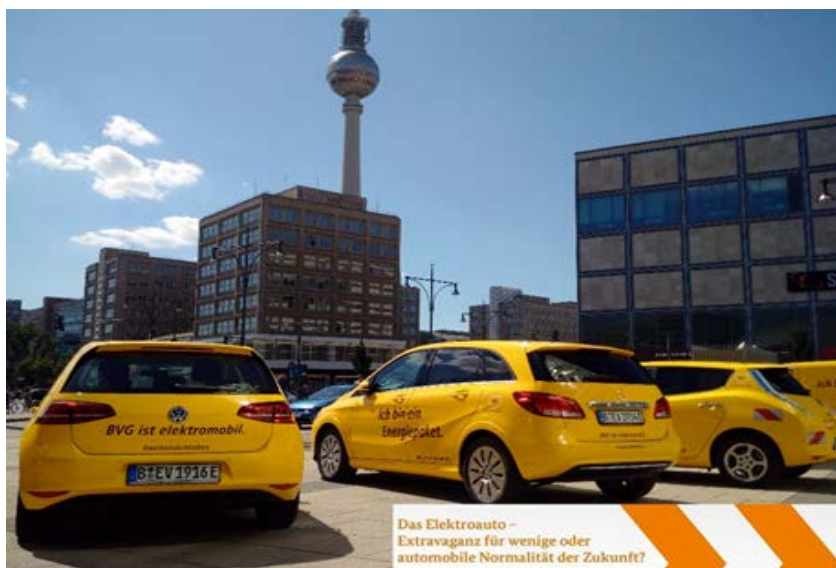


Abb. 2: Fahrzeugausstellung im Rahmen der Konferenz der Bundesregierung in Berlin | bcc im Juni 2016

Diese Extravaganz drückt sich auch dadurch aus, dass Wertschöpfung und Gewicht dieser Fahrzeuge gänzlich anders gestaltet sind als wir es von konventionellen Autos kennen: Der Hochvolt-Energiespeicher besteht aus einer Vielzahl von Lithium-Ionen Sekundärzellen, die ein Drittel der Fahrzeuggesamtmasse und der Fahrzeugkosten ausmachen. Der von potenziellen Kunden formulierte Wunsch nach einer Reichweite von real wenigstens 300 Kilometern erfordert selbst bei kompakten Fahrzeugen eine Kapazität des Energiespeichers von 60 kWh; bei größeren Fahrzeugen oder sogar batterieelektrischen SUV finden sich dementsprechend Energiespeicher mit bis zu 100 kWh.

Fahrzeugproduktion und -nutzung

In einer Studie des IVL Swedish Environmental Research Institute aus dem Mai 2017 wurde berechnet, dass bei der Produktion von Lithium-Ionen Sekundärzellen 150 bis 200 g CO₂/kWh entstehen, was bedeutet, dass ein Fahrzeug mit einem konventionellen Ottomotor acht Jahre gefahren werden kann, bevor es die Umwelt so stark belastet wie allein die Produktion eines Hochvolt-Energiespeichers. Damit verknüpft sich ein neuer Blick auf die Elektromobilität, der einen Paradigmenwechsel hinsichtlich der Energiespeicherung fordert: Die vollständige Speicherung elektrischer Ladungsträger für seltene Langstreckenfahrten ist ressourcen- und emissionsbedingt nicht sinnvoll. Die dafür notwendigen Speicherkapazitäten machen das Fahrzeug zu schwer und zu teuer sowie bereits in seiner Produktionsökobilanz sehr problematisch (Abbildung 3). Hinzu kommen sehr lange Ladezeiten oder bei großen Ladeleistungen entsprechend große Stromwärmeverluste bereits beim Ladevorgang, die deutlich über 10 kW liegen können.

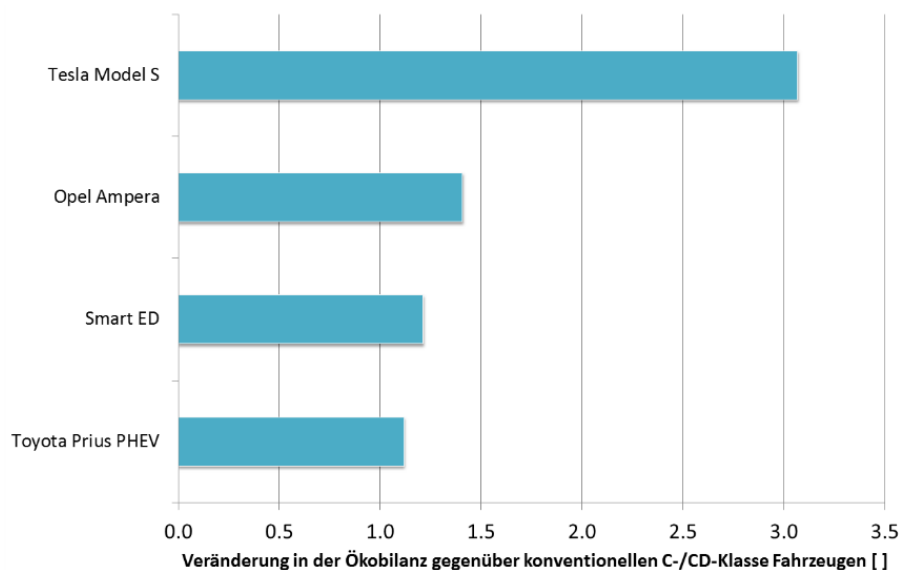


Abb. 3: Bis zu drei Mal schlechtere Produktionsökobilanz bei Elektrofahrzeugen mit großem Energiespeicher

Eine erstfahrzeugtaugliche Elektromobilität ist konzeptionell anders zu gestalten: Kosten und Ökobilanz müssen so überzeugend sein, dass diese Fahrzeuge – auch international – massenmarkttauglich werden und damit einen gegenüber heutigen konventionellen Fahrzeugen echten Fortschritt hinsichtlich Umwelt und Klima gewährleisten. Damit wird auch klar, dass sich die Elektromobilität als Teil eines zukünftigen Energieszenarios wiederfinden und widerspruchsfrei integrieren muss. Das Umweltbundesamt zeigte bereits 2010 in einer Studie, dass eine Stromerzeugung aus 100 % Erneuerbaren Energien möglich ist. Das Ziel einer weitgehenden Dekarbonisierung unserer Gesellschaft macht es aber notwendig, neben der

kompletten Energieversorgung einschließlich des Wärme- und Verkehrssektors auch die Treibhausgas-Emissionen von Industrie, Abfallwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft sowie aus Landnutzungsänderungen zu betrachten. Zentraler Baustein einer vollständig regenerativen Energieversorgung ist die Erzeugung von Wasserstoff durch die Elektrolyse mittels Strom aus Erneuerbaren Energien. Durch weitere katalytische Prozesse können aus diesem Wasserstoff dann Methan und andere Kohlenwasserstoffe erzeugt werden, die als Brenn- und Kraftstoffe in einem treibhausgasneutralen Energiesystem sowie in der Industrie unbedingt erforderlich sind. Gegenüber der direkten Nutzung von Strom in Elektrofahrzeugen gibt es deutliche Umwandlungsverluste, wenn stromgenerierte Kraftstoffe erzeugt und in Fahrzeugen eingesetzt werden. Aber die stromerzeugten Kraftstoffe haben große Vorteile hinsichtlich der Energiespeicherung und eignen sich deshalb in den nicht für die Elektrifizierung geeigneten Bereichen des Verkehrssektors eingesetzt zu werden – das sind vor allem langstreckenorientierte Straßenfahrzeuge für den Güter- und Personentransport sowie grundsätzlich die Schiff- und Luftfahrt.

Tatsächlich beträgt die mittlere Wegelänge in Deutschland gerade einmal 15 Kilometer und mit einer durchschnittlichen Wegezahl von täglich 3,5 pro Person ergibt sich dann eine Gesamtwegelänge von 36 bis 42 Kilometern – eine für Kernstädte sowie verdichtete und ländliche Kreise gleichermaßen gültige Fahrstrecke, die eine Speicherkapazität von weniger als 7 kWh bei kompakten Elektrofahrzeugen notwendig machen würde.

MIT EINER VERFÜGBAREN KAPAZITÄT VON 10 kWh WÜRD E ES ALSO MÖGLICH SEIN, FAST ALLE EINZELWEGE SOWIE ÜBERWIEGEND AUCH DIE GESAMTWEGE BATTERIEELEKTRISCH ZURÜCKZULEGEN UND AM ARBEITSPLATZ ODER ZU HAUSE DEN ENERGIESPEICHER ZU LADEN.

Allein für Wegelängen jenseits von 50 Kilometern wäre ein Zwischenstopp zum Laden des Energiespeichers oder eine zusätzliche Energiequelle notwendig. Dies führt zwangsläufig zu jenen Konzepten, die wir als „Range Extender“ oder Plug-in-Hybrid-Elektrische Fahrzeuge kennen – bei beiden Ausführungen wird die gesamte verfügbare Energie in eine Speichereinrichtung für elektrische Energie sowie in einen Betriebskraftstofftank aufgeteilt. Während die REEV (range extender electric vehicles) einen verhältnismäßig kleinen Kraftstofftank besitzen und im Regelfall batterieelektrisch angetrieben werden, sind die PHEV umgekehrt konzipiert – besitzen also eine kleinere Speichereinrichtung für die elektrische Energie und können mit ihren im Regelfall leistungsverzweigten Antrieben hohe Systemleistungen sowie mit konventionellen Kraftstoffen auch große Reichweiten erreichen. Mit beiden Konzepten ist es möglich, mittlere Wegelängen batterieelektrisch und lokal emissionsfrei zurückzulegen und für längere Fahrstrecken über eine zusätzliche Energiereserve zu verfügen. Bei den PHEV sind zwei für die Fahrzeugtraktion geeignete Antriebe in Leistungsverzweigung zusammengefasst, was einen großen technischen Aufwand bedeutet: Mit seiner Drehmoment- und Leistungscharakteristik ist der Elektromotor bei diesen Fahrzeugen besonders für geringere, wechselnde Fahrgeschwindigkeiten geeignet, wie sie im Stadtverkehr auftreten, und der Verbrennungskraftmotor spielt seine Vorteile bei konstanten, höheren Geschwindigkeiten beispielsweise auf der Autobahn aus. Beide Motoren arbeiten als drehzahlvariable Fahrtriebe und können bei einem bestimmten Leistungsbedarf auch zusammenwirken.

Fahrzeugantriebe

Während der elektrische Traktionsantrieb in bestimmten Betriebspunkten einen Wirkungsgrad von deutlich über 90% erreicht, liegt dieser Wert bei einem idealen ottomotorischen Verbrennungsprozess bei 60% und in der Praxis selbst bei einem

optimierten Ottomotor bei bestenfalls vierzig Prozent. Gegenüber den Betriebsbedingungen mit diesem verhältnismäßig hohen Wirkungsgrad, was einem spezifischen Kraftstoffverbrauch von etwa 210 g/kWh entspricht, erreicht der Ottomotor in anderen Betriebspunkten deutlich schlechtere Effizienzwerte: Speziell bei geringen Mitteldrücken kann der spezifische Kraftstoffverbrauch schnell auf mehr als den doppelten Wert des Optimums ansteigen (Abbildung 4).

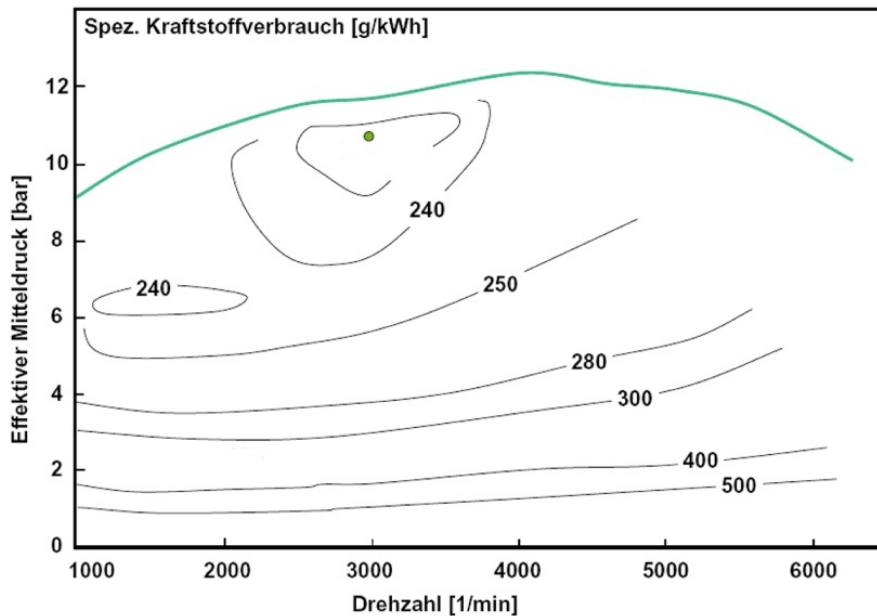


Abb. 4: „Muscheldiagramm“ eines Ottomotors

DER MODERNE OTTOMOTOR IST ALSO IN SEINEM BESTPUNKT HINREICHEND ENERGIEEFFIZIENT, IN VIELEN RELEVANTEN BETRIEBSPUNKTEN SOWIE BEIM INSTATIONÄREN BETRIEB ABER DEUTLICH SCHLECHTER. DAMIT IST ER UNTER EFFIZIENZGESICHTSPUNKTEN ALS DREHZAHLVARIABLER FAHRANTRIEB NICHT BESONDERS GUT GEEIGNET.

Weiterhin sind im Hinblick auf ein gutes Leistungs- und Emissionsverhalten über einen großen Drehzahlbereich entsprechende aufwendige Konstruktionen der Ansaug- und Abgasstrecke sowie des Ventiltriebs notwendig. Das ist dann auch maßgeblich für die vergleichsweise hohen Kosten von Plug-in-Hybrid-Elektrischen Fahrzeugen, die einen modernen drehzahlvariablen Ottomotor als Fahrtrieb nutzen und den Antriebstrang mit einem zusätzlichen elektrischen Traktionsantrieb ergänzen.

Diese Zusammenhänge illustrieren hinlänglich die Aufgaben des Antriebstrangs künftiger Straßenfahrzeuge:

DIE FÜR DEN SICHEREN UND KOMFORTABLEN TRANSPORT VON VIER BIS FÜNF INSASSEN NOTWENDIGE ENERGIE IN EINER GRÖßENORDNUNG VON 150 BIS 250 WH PRO KILOMETER FAHRSTRECKE MUSS MÖGLICHST EFFIZIENT UND EMISSIONSARM ZUR VERFÜGUNG STEHEN.

Diese Energiemenge ist eine unverrückbare Randbedingung der motorisierten Individualmobilität sobald eine bestimmte Transportkapazität – beim klassischen Auto sprechen wir über bis zu fünf Passagiere und deren Gepäck – damit verknüpft wird. Nur erheblich leichtere und in ihrer Transportkapazität deutlich beschränkte Fahrzeuge haben einen geringeren Energiebedarf.

Damit dokumentieren sich zunächst unauflösbare Widersprüche für die Konzeption erstfahrzeugtauglicher Elektrostraßenfahrzeuge, was folgerichtig zu Kompromissen wie Plug-in- oder Range-Extender-Fahrzeugen führte: Elektrische Maschinen sind – anders als Wärmekraftmaschinen – als drehzahlvariable effiziente Traktionsantriebe geeignet, müssen aber mit elektrischer Energie versorgt werden, die sich nicht besonders effizient im Fahrzeug speichern lässt. Gleichzeitig ist die Produktionsökobilanz großer Energiespeicher so problematisch, dass selbst die ausschließliche Nutzung von Erneuerbaren Energien für den Betrieb des Fahrzeugs zu keiner überzeugenden Emissionsbilanz im Lebenszyklus führt. In keinem Fall bedeutet dies das Festhalten an konventioneller Antriebstechnik, denn drehzahlvariable Ottomotoren erreichen nur unter den wenig realistischen Bedingungen bisheriger Fahrzyklen wie dem NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) Emissionswerte von 100 g CO₂/km oder weniger. Ab 2020 gelten für neu zugelassene Fahrzeuge aber bereits Grenzwerte, die bei 95 g CO₂/km liegen und mit konventioneller Antriebstechnik nicht mehr eingehalten werden können.

Generator-elektrische Antriebe mit Brenngasen

Effizienz, Emissionsverhalten und Energiespeicherfähigkeit müssen also für die automobilen Zukunft neu zusammengesetzt werden. Konventionelle drehzahlvariable Verbrennungsmotoren für den Fahrzeugantrieb sind keine Lösung mehr, batterieelektrische Fahrzeuge sind es noch nicht – und Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden in den nächsten fünfzehn Jahren ebenfalls noch keine Lösung sein, weil die Fahrzeugkosten und die verfügbare Wasserstoff-Infrastruktur dagegen sprechen.

AUTOMOBILE ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN VERLANGEN ZWINGEND NACH ELEKTRISCHEN TRAKTIONSANTRIEBEN UND SPEICHERLÖSUNGEN, DIE FÜR TYPISCHE WEGESTRECKEN EIN LOKAL EMISSIONSFREIES FAHREN ERMÖGLICHEN, ABER ES MUSS AUCH DIE VERFÜGBARKEIT DER NOTWENDIGEN ENERGIEMENGEN FÜR LÄNGERE STRECKEN GEWÄHRLEISTET SEIN.

Das ist verhältnismäßig einfach zu erreichen – nämlich durch die Abkehr vom Dogma der vollständigen Speicherung der elektrischen Energie für die gesamte Fahrstrecke, was ja den Charakter der batterieelektrischen Fahrzeuge bisher prägt. Die elektrische Energie für Fahrstrecken bis 30 oder 40 Kilometer kann mit heute verfügbaren Technologien verhältnismäßig effizient gespeichert werden; das funktioniert für den Energiebedarf bei längeren Strecken aber nur noch mit großen Anstrengungen, die im Hinblick auf Gewicht, Kosten und notwendige Zeit des Speichervorgangs eigentlich unverhältnismäßig sind.

DESHALB IST ES DEUTLICH SINNVOLLER, DIE FÜR LÄNGERE FAHRSTRECKEN NOTWENDIGE ENERGIE IN EINER ANDEREN FORM IM FAHRZEUG ZU SPEICHERN UND BEI BEDARF IN ELEKTRISCHE ENERGIE UMZUWANDELN.

Für die Erzeugung elektrischer Energie während der Fahrt können Wärmekraftmaschinen und elektrische Generatoren eingesetzt werden: Die Wärmekraftmaschinen können fossile oder bereits heute biobasierte Kraftstoffe, zukünftig auch stromgenerierte Kraftstoffe nutzen und die damit erzeugte mechanische Arbeit wird mit Hilfe eines Generators in elektrische Energie umgewandelt und steht dann für die Elektrotraktion zur Verfügung (Abbildung 5).

DAS NENNEN WIR GENERATOR-ELEKTRISCHES ANTRIEBSKONZEPT.

Bei solchen monovalenten Kraftmaschinen erfolgt dann auch der Kaltstart ausschließlich mit Gas, was für den Gemischbildungsprozess anspruchsvoll ist. Vorteilhaft ist aber, dass es mit Methan nicht zu der sonst üblichen Anlagerung des Kraftstoffes an die Wände kommt, was sich sehr vorteilhaft auf die Rohemissionen beim Warmlauf auswirkt. Trotz der verringerten Rohemissionen ist auch beim Betrieb von monovalenten Kraftmaschinen eine Abgasnachbehandlung notwendig. Aufgrund der besonders stabilen Methan-Moleküle ist die Konvertierung der Kohlenwasserstoffe im Katalysator schwieriger als bei konventionellen Flüssigkraftstoffen und macht auch höhere Temperaturen notwendig. Die bei monovalenten Motoren deutlich höhere Verdichtung und der gute thermische Wirkungsgrad haben verringerte Abgastemperaturen zur Folge, die bei Einsatz eines Abgasturboladers noch weiter reduziert werden – dies verdeutlicht, dass für die katalytische Abgasreinigung beim Betrieb mit Methan eine entsprechende Betriebsstrategie notwendig ist, um eine Unterschreitung der Temperaturgrenze sowie deutlich Durchbrüche in der Emissionsbilanz der Kohlenwasserstoffe zu verhindern. Technisch kann das mit einem elektrisch betriebenen Heizkatalysator gewährleistet werden, der direkt vor dem Hauptkatalysator angeordnet ist und damit längere Wege und Heizverluste vermeidet. Die Schadstoffemissionen – speziell Stickoxide, Partikel und Feinstaub – sind bei monovalenten Motoren gegenüber konventionellen Otto- oder Dieselmotoren deutlich verringert.

Mit dem Potential für Effizienzsteigerungen aufgrund beispielsweise der höheren Verdichtung kann der spezifische Kraftstoffverbrauch einer auf den Betrieb mit Methan abgestimmten Wärmekraftmaschine auf weniger als 200 g/kWh reduziert werden. Gemeinsam mit der kraftstoffseitigen Reduktion der CO₂-Emissionen um etwa 20% lässt sich auf diese Weise der THG-Ausstoß um etwa ein Drittel gegenüber Motoren mit konventionellen Kraftstoffen verbessern. Mit der hohen Energiedichte sowie der guten Speichereigenschaft von Methan sind vorteilhafte Voraussetzungen für die emissionsarme, kontinuierliche Energieerzeugung direkt im Fahrzeug geschaffen, wofür neben dem Tanksystem und der Wärmekraftmaschine noch ein elektrischer Generator notwendig ist.

Fahrzeugspezifische Leistung von Energieerzeuger und -speicher

Damit stehen in einem solchen Fahrzeug zwei unterschiedliche Energiequellen zur Verfügung: Einmal der elektrochemische Energiespeicher – die Batterie – und dann die monovalente Wärmekraftmaschine, deren mechanische Arbeit in elektrische Energie umgewandelt wird. Dabei hat die Wärmekraftmaschine die Aufgabe, den durchschnittlichen Leistungsbedarf des Fahrzeugs abzubilden, während der Energiespeicher in der Lage sein muss, kurzzeitigen Leistungsmehrbedarf – beispielsweise bei Steigungsstrecken, beim Beschleunigen, Überholen oder bei der Fahrt mit hohen Geschwindigkeiten – zur Verfügung zu stellen. Deshalb kann die Dimensionierung sowohl des Energiespeichers wie auch des Energieerzeugers mit Mittelwerten von notwendiger Kapazität und Leistung erfolgen. Selbst für ein erstfahrzeugtaugliches Auto bedeutet dies eine Batteriekapazität von höchstens 10 kWh und eine konstante Leistung des Energieerzeugers von weniger als 20 kW. Damit ist gewährleistet, dass der im Mittel für einen normalen Streckenmix notwendige Leistungsbedarf immer durch den Energieerzeuger zur Verfügung steht und gleichzeitig der Energiespeicher nahezu beliebige Leistungsspitzen, aber auch das Potential für die Bremsenergieerückgewinnung abdeckt.

Die Betrachtung der Fahrzeugspezifischen Leistungsklasse (engl.: vehicle specific power | VSP) für verschiedene Fahrzyklen gibt eine hilfreiche Orientierung über die Zeitdaueranteile der auf die Fahrzeugmasse bezogenen Antriebsleistungen (Abbildung 6). Für beispielsweise den NEFZ ist erkennbar, dass die mit Abstand größten

Zeitdaueranteile bei einer spezifischen Leistung von weniger als 7 kW je Tonne Fahrzeugmasse liegen.

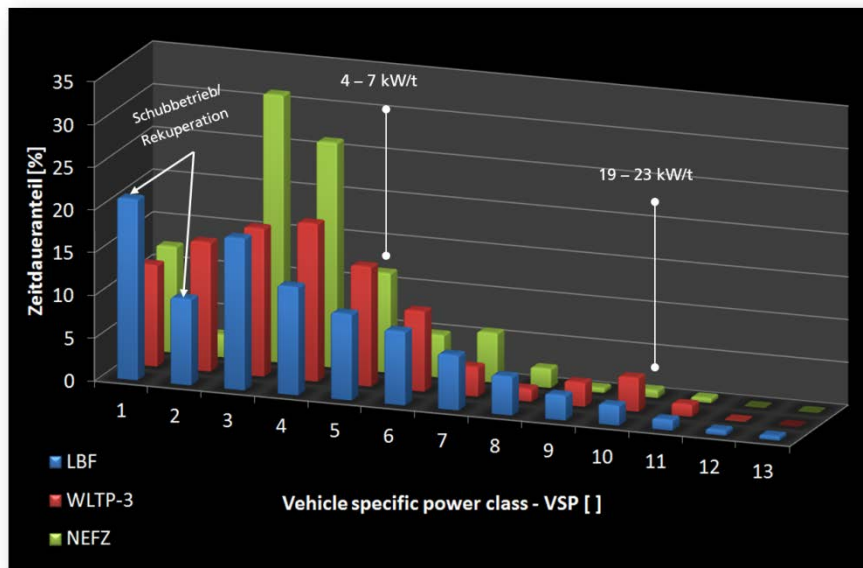


Abb. 6: Zeitdaueranteile der Fahrzeugspezifischen Leistung für verschiedene Fahrzyklen

Die Fahrzeugbeschleunigung von 0 bis 100 km/h innerhalb von 15 Sekunden entspricht einer spezifischen Leistung von 33 kW je Tonne Fahrzeugmasse; eine konstante Geschwindigkeit von 100 km/h bei einer vierprozentigen Steigung macht eine spezifische Leistung von 23 kW je Tonne Fahrzeugmasse notwendig. In beiden Fällen handelt es sich um kurzzeitige Betriebsbedingungen, die einen gewissen Leistungsmehrbedarf verlangen, der das Zusammenwirken von Energiespeicher und -erzeuger notwendig macht. Im für einen typischen Streckenmix gültigen Mittel steht bereits mit konstant erzeugten 15 kW je Tonne Fahrzeugmasse ein Energieüberschuss zur Verfügung, der für das Aufladen des Energiespeichers sowie für den Betrieb von Nebenverbrauchern genutzt werden kann.

Für eine erstfahrzeugtaugliche Elektromobilität mag der maximale spezifische Leistungsbedarf in einer Größenordnung von 60 kW je Tonne Fahrzeuggewicht liegen und illustriert damit das Verhältnis der Leistungsdimensionierung von Energiespeicher und Energieerzeuger: Die Größe des Energiespeichers muss auf eine Höchstleistung von 45 kW je Tonne Fahrzeuggewicht dimensioniert sein, während der Energieerzeuger nur ein Drittel dieser Größenordnung, aber als konstante Leistung aufzubringen hat. Die konstante Leistung des Energieerzeugers macht dann eine Geschwindigkeit von rund 120 km/h auf einer ebenen Fahrbahn möglich, d.h. gewährleistet damit auch längere Autobahnfahrten auf häufig geschwindigkeitsbegrenzten Strecken.

Der Betrieb eines monovalenten Gasmotors für eine konstante Energieproduktion von 15 kW je Tonne Fahrzeuggewicht führt zum Entwurf einer effizienten und emissionsarmen Wärmekraftmaschine, die nur einen einzigen Betriebspunkt kennt – nämlich jenen im Bereich des optimalen Wirkungsgrads mit einem Energieverbrauch von dann weniger als 200 g/kWh. Heutige Motorkonstruktionen haben ihren Bestpunkt nahe der Vollastlinie und oftmals bei knapp der Hälfte der Höchstdrehzahl; eine konstante Leistung von 15 kW/t im Bestpunkt würde also eine Höchstleistung von gut dem 2,5-fachen Wert, also rund 40 kW/t notwendig machen.

Kosten

DER WIRKUNGSGRADOPTIMALE EIPUNKT-BETRIEB DES GASMOTORS ERMÖGLICHT WEITERHIN ERHEBLICHE KOSTEN- UND GEWICHTSEINSPARUNGEN DURCH DIE GEGENÜBER DEM DREHZAHLVARIABLEN BETRIEB DEUTLICH VEREINFACHTEN KONSTRUKTIVEN RANDBEDINGUNGEN: ANSAUGSTRECKE, VENTILTRIEB, ABER AUCH KURBELTRIEB UND KURBELGEHÄUSE SOWIE DIE ABGASSEITE LASSEN SICH ERHEBLICH EFFIZIENTER GESTALTEN.

Für die bisherigen Kosten eines drehzahlvariablen Verbrennungsmotors lassen sich jetzt der stationär betriebene Gasmotor sowie der mit ihm verbundene elektrische Generator – also die komplette Einheit zur Erzeugung der elektrischen Energie – aufbauen.

Mit der in dieser Weise optimierten Baugruppe für die Energieerzeugung sowie einem leistungsorientierten, kapazitätsreduzierten Hochvolt-Energiespeicher lässt sich eine erstfahrzeugtaugliche Elektromobilität annähernd zu den Kosten heutiger, leistungsgleicher Diesel-Fahrzeuge realisieren (Abbildung 7).

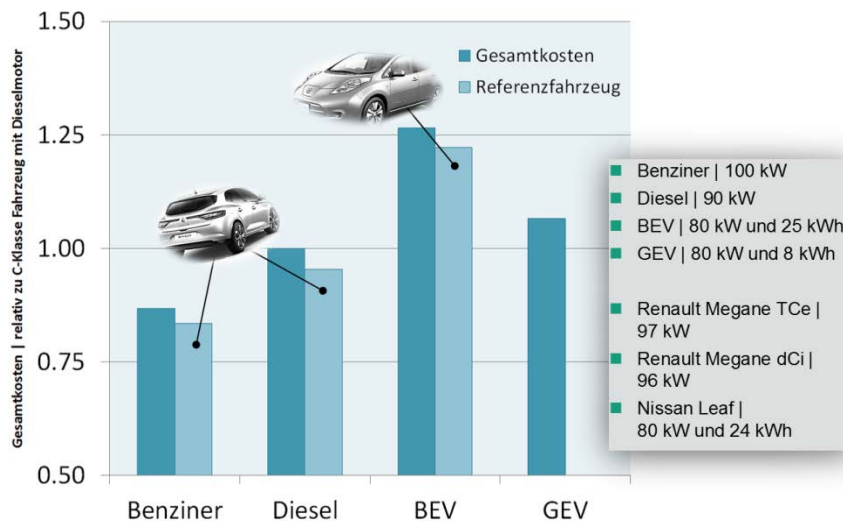


Abb. 7: Kostenvergleich eines generator-elektrischen Fahrzeugs bei angenommener Serienfertigung

Mit Hilfe eines am Fraunhofer LBF entwickelten Kostenmodells wurden die Gesamtkosten für leistungsgleiche Fahrzeuge des sogenannten C-Klasse Segments („Golfklasse“) von Renault-Nissan berechnet und mit den Verkaufspreisen der Hersteller verglichen. Einheitlich ergaben sich auf Basis des LBF-Kostenmodells geringfügig höhere Preise als dies den unverbindlichen Preisempfehlungen der Hersteller entspricht. Damit erlaubt das LBF-Kostenmodell eine hinreichend gute Abschätzung der Gesamtkosten von konventionellen Fahrzeugen wie auch von batterie-elektrischen Fahrzeugen und wurde um die Prognose für ein generator-elektrisches Fahrzeug erweitert. Die abgebildeten Kosten eines generator-elektrischen C-Klasse Fahrzeugs mit einer elektrischen Antriebsleistung von 80 kW liegen demnach um etwa 10% über den Gesamtkosten des Referenzmodells mit Dieselmotor, aber erheblich unter denen eines batterie-elektrischen Fahrzeugs.

Fahrzeugprototyp

Das *LBF* realisierte einen ersten Prototypen eines C-Klasse Fahrzeugs mit einem generator-elektrischen Antrieb. In der Konzeptphase (Abbildung 8) wurden Komponenten und deren Spezifikationen, Einbauraum und -position sowie die Betriebsstrategie simuliert.

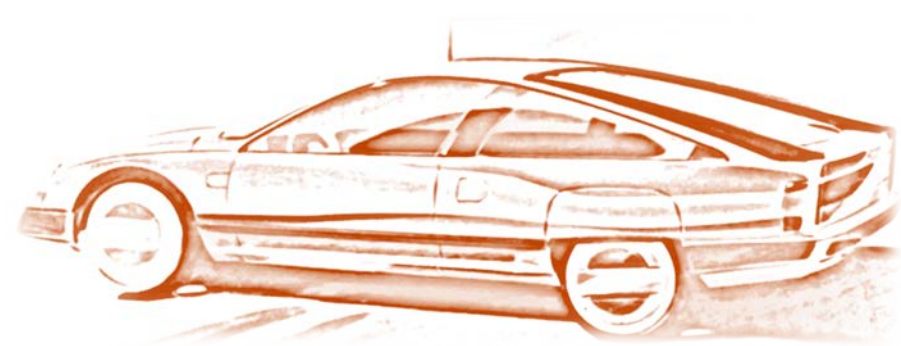


Abb. 8: Frühe Skizze des GEV Prototyp als Basis für CAD-Konstruktion

Aufgrund der masseffizienten Komponenten des Antriebstrangs konnte das Fahrzeuggewicht auf rund 1,3 Tonnen begrenzt werden. Das machte eine Dauerleistung von 18 kW durch den stationär betriebenen, monovalenten Gasmotor notwendig, an dessen Kurbelwelle der elektrische Generator über eine Hirth-Stirnverzahnung angesetzt ist und damit einen Schleppstart des Gasmotors ermöglicht (Abbildung 9).

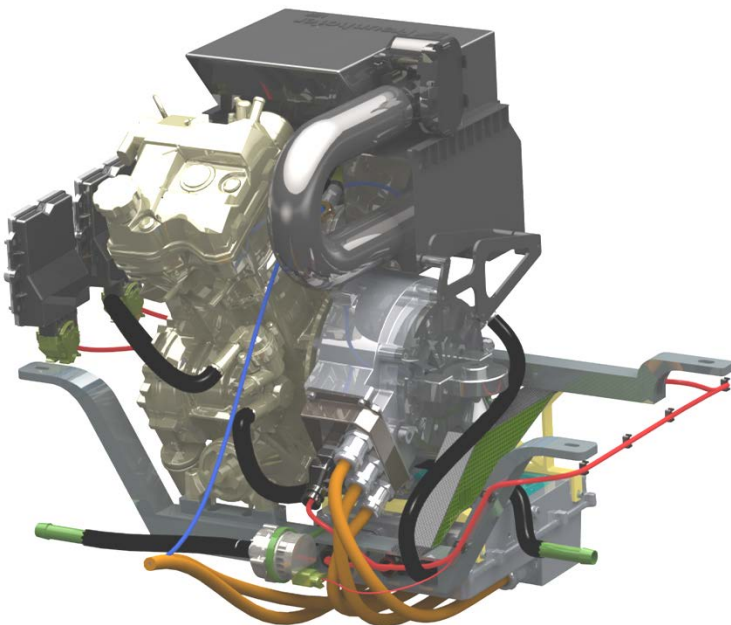


Abb. 9: 1-Zylinder Gasmotor mit elektrischer Transversalflux-Maschine als Generator

Der Hochvolt-Energiespeicher wurde aus Li-Ion Rundzellen mit einer Einzelkapazität von 8.000 mAh aufgebaut – dabei wurden 128 solcher Zellen in Reihe geschaltet, um eine Systemspannung von 400 V abzubilden. Die Gesamtkapazität des Hochvoltsystems (Abbildung 10) beträgt 9,8 kWh (24 Ah) und ermöglicht damit eine rein elektrische Reichweite von rund 35 Kilometern, ehe dann aufgrund der verbliebenen Restkapazität

des Energiespeichers die Zustartschwelle für die generatorische Energieerzeugung erreicht wird. Auch zu diesem Zeitpunkt steht die maximale elektrische Antriebsleistung von 80 kW noch zur Verfügung.

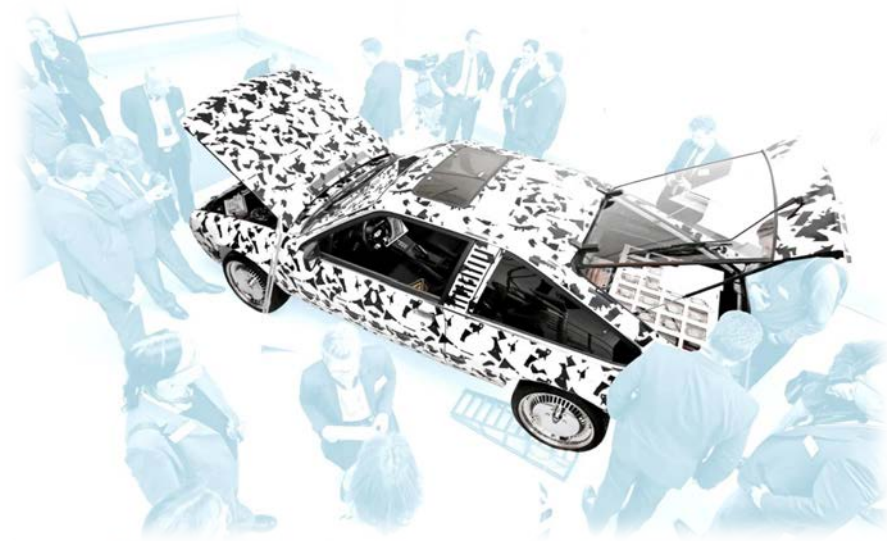


Abb. 10: Hochvolt-Batteriesystem für GEV Prototyp

Die Zustart- bzw. Abschaltschwellen für den monovalenten Gasmotor lassen sich mit vorgegebenen Profilen bzw. durch die festgelegte Fahrstrecke definieren. Diese Profile können beispielsweise ein Höchstmaß emissionsfreier Fahrstrecke oder einen möglichst hohen Ladezustand des Energiespeichers berücksichtigen. Entspricht im NEFZ der Ladezustand am Ende des Fahrzyklus dem Wert beim Beginn der Fahrstrecke, dann entspricht dies dem sogenannten Ladungserhaltungsbetrieb, d.h. in diesem Fall ist die gesamte, für die Fahrstrecke notwendige Energie generatorisch erzeugt worden. Die CO₂-Emissionen betragen dann weniger als 75 g/km und stellen emissionsseitig den ungünstigsten Fall für dieses Antriebskonzept im Fahrzyklus dar. Solange der Energiespeicher in der Praxis über eine entsprechende Restkapazität verfügt, kann eine damit korrespondierende Fahrstrecke komplett emissionsfrei zurückgelegt werden.

DIE EMISSIONSBILANZ DES GENERATOR-ELEKTRISCHEN FAHRZEUGS BEWEGT SICH ALSO ZWISCHEN NULL BEI FAHRSTRECKEN BIS 35 KILOMETER UND 70 G/KM BEI ZEHN MAL LÄNGEREN FAHRSTRECKEN, DIE DANN UNTERBRECHUNGSFREI AUCH AUF BUNDESFERNSTRABEN ZURÜCKGELEGT WERDEN KÖNNEN.

Der am LBF aufgebaute erste Prototyp eines generator-elektrischen Fahrzeugs wurde als GEV₁ präsentiert (Abbildung 11) und dokumentiert das Potenzial eines solchen Antriebskonzeptes. Die Motor-Generator-Baugruppe sowie der Spannungswandler sind im Vorderwagen angeordnet, während Energiespeicher, Antrieb und Leistungselektronik über der Hinterachse sitzen. Mit verhältnismäßig einfachen Maßnahmen lassen sich unerwünschte Schwingungen bei Motorhochlauf und stationärem Betrieb wirkungsvoll tilgen bzw. dämpfen. Damit wird ein solches Fahrzeug so leise, wie wir es von batterie-elektrischen Autos kennen.



**Abb. 11: GEV_{one}
Konzeptfahrzeug des
Fraunhofer LBF**

Neben dem hohen Wirkungsgrad des monovalenten Gasmotors bei der Stromproduktion wird der Gesamtwirkungsgrad mit Nutzung der Abwärme des Motors speziell für Heizung und Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums weiter verbessert: Für Innenraum-, Sitz- und Lenkradheizung eines batterieelektrischen Fahrzeugs sind bei niedrigen Außentemperaturen bis zu 4,5 kW zusätzliche Leistung notwendig, die bei dem generator-elektrischen Antriebskonzept als ‚thermisches Nebenprodukt‘ der Wärmekraftmaschine entstehen.

GEV₁ als Lösung für den motorisierten Individualverkehr

GENERATOR-ELEKTRISCHE ANTRIEBE SIND PROBLEMLOS SKALIERBAR, D.H. SIE KÖNNEN FÜR MITTELSCHWERE UND SCHWERE PKW, ABER AUCH FÜR LEICHTE UND SCHWERE NUTZFAHRZEUGE MIT ENTSPRECHENDEN REICHWEITENANFORDERUNGEN AUFGEBAUT WERDEN. DEMGEGENÜBER SIND BATTERIE-ELEKTRISCHE FAHRZEUGE FÜR SEHR LEICHTE UND DESHALB EFFIZIENTE AUTOS SOWIE GENERELL FÜR ZWEIRÄDER VORTEILHAFT. NEBEN EMISSIONSARMEN SUV SIND DESHALB AUCH GENERATOR-ELEKTRISCHE KOMMUNAL- ODER NAHVERTEILERFAHRZEUGE VORSTELLBAR.

Anders als für batterie-elektrische Fahrzeuge ist bei solchen Antriebskonzepten keine kostenintensive Ladeinfrastruktur notwendig: Selbst an einer konventionellen Haushaltssteckdose ist der Energiespeicher innerhalb von weniger als drei Stunden wieder vollständig aufgeladen und auch ohne Zugang zum Stromnetz kann der elektrische Generator innerhalb von einer halben Stunde den Hochvoltspeicher aufladen sowie in dieser Zeit den Fahrzeuginnenraum aufheizen. Damit kultiviert dieses Antriebskonzept den Markt für eine emissionsarme Elektromobilität auch ohne umfangreiche Investitionen in die Ladeinfrastruktur und ist deshalb auch für Schwellenländer interessant, da die dort rasch wachsende Individualmobilität enorme Implikationen für die Klima- und Umweltbelastung mit sich bringt, dort im Regelfall aber noch nicht die wirtschaftlichen Möglichkeiten für eine vollständige Transformation zu emissionsfreier Elektromobilität gegeben sind.

IN URBAN ZENTRIERTEN VERKEHRSKORRIDOREN, DIE SICH BEISPIELSWEISE IN VIELEN ASIATISCHEN LÄNDERN FINDEN, WÜRDIE UMSTELLUNG VON KONVENTIONELLEN PKW AUF SOLCHE MIT GENERATOR-ELEKTRISCHEN

ANTRIEBEN ZU EINER REDUKTION DER VERKEHRSBEDINGTEN CO₂-EMISSIONEN UM WAHRSCHEINLICH MEHR ALS VIERZIG PROZENT FÜHREN!

Bereits mit fossilem Erdgas lassen sich bedeutende Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen durch den Verkehrssektor erzielen. Diese vervielfachen sich beim Einsatz von Biogas nochmals – dann aber mit den häufig diskutierten Nachteilen einer Nutzungskonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion sowie landwirtschaftlichen Monokulturen. Die Dekarbonisierung im Verkehr verlangt deshalb nach wirkungsvollen und nachhaltigen Ansätzen, um die Treibhausgasemissionen auf niedrigste, tendenziell klimaverträgliche Mengen zu begrenzen. Eine solche Größenordnung entspricht wahrscheinlich einem Minderungsniveau von 95 % gegenüber 1990. Der Pro-Kopf-Ausstoß von Treibhausgasen in Deutschland müsste dann von heute etwa elf Tonnen pro Jahr und Kopf auf ungefähr eine Tonne im Jahr 2050 reduziert werden. Dieses Minderungsziel macht es notwendig, die für Energiesysteme und Industrien erforderlichen Brenn- und Kraftstoffe aus regenerativ erzeugten Kohlenwasserstoffverbindungen herzustellen. Das ist mit der Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse mit Hilfe von Erneuerbaren Energien sowie nachfolgenden katalytischen Prozessen möglich: In dieser Weise lassen sich Methan und weitere Kohlenwasserstoffe produzieren. Die strombasierte Erzeugung von Wasserstoff oder Methan wird heute als Power-to-Gas, die von flüssigen Kohlenwasserstoffen als Power-to-Liquid bezeichnet.

Mobilität und Energiewende

Seit 2011 positioniert *Greenpeace* die Produktion und Speicherung stromgenerierter, gasförmiger Kohlenwasserstoffe unter dem Begriff „Windgas“: Dabei werden überschüssige, nicht in die Stromnetze integrierbare Mengen Erneuerbarer Energie genutzt, um synthetisches Methan herzustellen.

DIESE VORRANGIG AUS DEM STROM VON WINDENERGIE-ANLAGEN PRODUZIERTEN KOHLENWASSERSTOFFE SIND MEHR ALS EIN ERNEUERBARES GAS – SIE SIND EIN ENERGIESPEICHERSYSTEM UND DAMIT EINE FUNDAMENTALE VORAUSSETZUNG FÜR DAS GELINGEN DER ENERGIEWENDE!

Der große Anteil fluktuierender Energieerzeugung durch Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen macht es nämlich notwendig, dass produzierte Überschussmengen gespeichert werden können, um später bedarfsgerecht zur Verfügung zu stehen.

Die dafür benötigten Energiespeicher sind also ein entscheidendes Element für den Umbau der Energiewirtschaft: Stromgeneriertes Methan ist hierfür besonders vorteilhaft, weil es in großen Mengen im bestehenden Gasnetz und in dessen unterirdischen Kavernen und Porenspeichern eingelagert werden kann. Die heute vorhandenen Speicherkapazitäten wären ausreichend, um durch die Rückverstromung bis zu dreimonatige „Dunkelflauten“ zu überbrücken. Damit ist das bestehende Gasnetz der größte und leistungsfähigste, gleichzeitig ein gesellschaftlich vollständig akzeptierter Energiespeicher.

Wegen der hervorragenden Speicherfähigkeit werden synthetische Kraft- und Brennstoffe ein zentraler Baustein in einer vollständig regenerativen Energieversorgung – trotz der vergleichsweise hohen Umwandlungsverluste bei der Bereitstellung von Brenn- und Kraftstoffen in einem regenerativen Energiesystem (Abbildung 12).

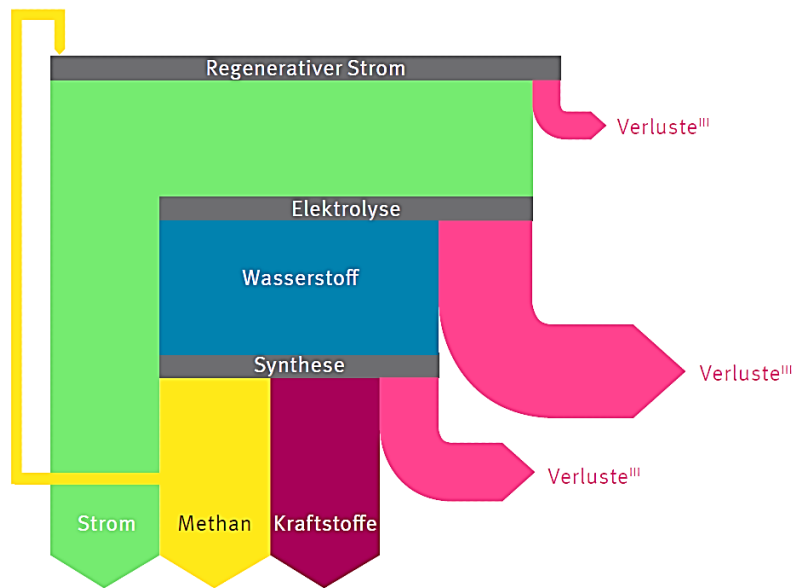


Abb. 12:
Umwandlungsverluste bei
Erzeugung strombasierter
Brennstoffe | Quelle:
Umweltbundesamt, 2014

Nachhaltige Mobilitätskonzepte integrieren sich in bestmöglicher Weise in den Transformationsprozess, den Energiewirtschaft, Industrie und Verkehrssektor in den nächsten Jahrzehnten vor sich haben.

MIT GENERATOR-ELEKTRISCHEN FAHRZEUGEN WERDEN DIE FÜR DEN VERKEHRSEKTOR SO WICHTIGEN MERKMALE EFFIZIENZ, EMISSIONSVERHALTEN UND ENERGIESPEICHERFÄHIGKEIT NEU ZUSAMMENGESETZT UND KÖNNEN DIE ZUKUNFT DER MOTORISIERTEN INDIVIDUALMOBILITÄT SEHR POSITIV MITGESTALTEN.

Mit einem ersten Prototyp (Abbildung 13) hat das Fraunhofer LBF gezeigt, dass ein solches Fahrzeugkonzept zu einer erstfahrzeugtauglichen, wirtschaftlichen Elektromobilität führen kann.



Abb. 13: GEV₁ Prototyp

„Der patentierte generator-elektrische Antrieb mit monovalentem Gasmotor ist ein für PKW und Nutzfahrzeuge interessantes Antriebskonzept, das uns bereits heute mit der Zukunft verbindet.“
Rüdiger Heim (Autor)