Hochwirkungsgrad Hybridantrieb für nachhaltige Elektromobilität

1.	Einleitung	. 1								
2.	Flüssige Kraftstoffe als Energiespeicher	. 2								
3.	Batterien als Energiespeicher	. 2								
4.	Fahrten innerhalb von Städten	.4								
5.	Langstreckenfahrten außerhalb von Ballungsräumen	.4								
6.	CO ₂ Emissionen konventioneller und batterieelektrischer Fahrzeuge	.7								
7.	Erzeugung der elektrischen Energie im Fahrzeug aus flüssigem Kraftstoff									
8.	Kurzfristspeicherung der elektrischen Energie im Fahrzeug	13								
9.	Power-Tank Realisierungsvariante	14								
10.	Technologieauswahl für Power-Tanks	19								
10.1	. Allgemeine Überlegungen zur Technologieauswahl	19								
10.2	. Speicherauswahl unter Berücksichtigung der Lastkollektive aus Fahrzyklen	21								
10.2	.1. Realisierung eines Power-Tanks mit Batterien	21								
10.2	.2. Realisierung eines Power-Tanks mit Kondensatoren	23								
10.2	.3. Realisierung eines Power-Tanks mit einem Schwungrad	23								
11.	Simulation des elektrischen Antriebstranges im Artemis-Zyklus	24								
11.1	. Der Artemis Stadtzyklus	25								
11.2	. Der Artemis Überlandzyklus	26								
11.3	. Der Artemis Autobahnzyklus	27								
12.	Zusammenfassung	30								
13.	Danksagung	34								
14.	Literatur	34								

1. Einleitung

Die Einführung eines elektrischen Antriebes in Fahrzeugen ist eine technische Revolution, die vergleichbar mit der Umrüstung der Antriebsquelle in Fabriken im 20. Jahrhundert von Dampfmaschinen auf Elektroantrieb ist. Die Größe und die Komplexität einer Dampfmaschine – später ersetzt durch eine Verbrennungskraftmaschine – erlaubten es nicht, jeder Arbeitsmaschine wie z.B. Spinnmaschinen, Webstühlen, Schmiedehämmern, Walzstraßen, etc. eine individuelle Antriebsquelle zuzuordnen. Damit benötigte man einen Antriebsstrang, der die Antriebsleistung der Quelle über Getriebe, Wellen und Treibriemen auf viele Arbeitsmaschinen verteilt. Zufolge der langen Übertragungsstrecken und der damit verbundenen großen Anzahl an bewegten Teilen hat eine zentrale Kraftversorgung einen schlechten Wirkungsgrad, ist gefährlich (offene Riementriebe) und auf der Ebene der Arbeitsmaschine kaum regelbar.

Der Durchbruch wurde durch den Ersatz der zentralen Antriebsquelle durch viele dezentrale Elektromotoren erzielt. Damit ist die individuelle Steuerung und Regelung jeder Arbeitsmaschine einfach und kostengünstig machbar. Genau dieser Weg wird bei Fahrzeugen mit einem elektrifizierten Antriebsstrang begangen: Ein oder mehrere Elektromotoren treiben das Fahrzeug an. Getriebe und Wellen entfallen großteils, der Antrieb ist kostengünstig, robust und sehr gut regelbar.

Durch die Vorstellung des elektrisch betriebenen Lohner-Porsche Fahrzeuges | ¹, sind die herausragenden Vorteile eines elektrischen Fahrzeugantriebes seit Anfang des 20. Jahrhunderts bekannt. Trotzdem konnten sich Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang bis

^{| &}lt;sup>1</sup> FAZ Seite T 4 / Dienstag, 30. Mai 2000, Nr. 125 Technik und Motor, access on 1.1.2020, <u>https://web.archive.org/web/20080331224434/http://de.geocities.com/jayedelman/porsche.html</u>

heute nicht durchsetzen, weil die Versorgung mit elektrischer Energie für mehrere Stunden Fahrzeit und/oder ca. 800 km Reichweite und eine "Betankung" in ein paar Minuten bis heute nur mangelhaft gelöst sind. Das war auch der Grund für den Siegeszug des Verbrennungsmotors für Fahrzeugantriebe, der zu Beginn des 20. Jahrhunderts Kopf an Kopf mit Elektrofahrzeugen begann.

Der elektrische Fahrzeug<u>antrieb</u> ist auch heute kein Problem, sondern – so wie vor über 100 Jahren – die Mitnahme beziehungsweise Speicherung und die rasche (Wieder-)Aufladung der elektrischen Energie für Fahrstrecken, die die Bevölkerung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren gewohnt ist.

2. Flüssige Kraftstoffe als Energiespeicher

Die Energiedichte üblicher Kraftstoffe für Fahrzeuge wie Benzin und Diesel ist ca. 12 kWh/kg. Die hohe gravimetrische Energiedichte beruht zum Teil darauf, dass für eine vollständige Verbrennung von 1 kg Kraftstoff ungefähr 14,6 kg Umgebungsluft verwendet werden müssen. Da man die für die Verbrennung notwendige Luft aus der Umgebung beziehen kann, geht diese Masse nicht in die Energiedichtebetrachtung des Kraftstoffs ein. Damit sind bei für Menschen zumutbaren Temperatur- und Druckbedingungen flüssige Kohlenwasserstoffe für mobile Anwendungen unschlagbar, da neben der hohen gravimetrischen wie volumetrischen Energiedichte des Kraftstoffes das Tankgewicht weniger als 20 % des Brennstoffes ausmacht. Ob ein Kraftstoff fossil basiert ist oder bei nahezu identischer Kraftstoffchemie synthetisch hergestellt wird, beeinflusst nicht die Funktion des damit betriebenen Verbrennungsmotors. Synthetische Kraftstoffe, hergestellt aus Solar- Wind- oder Geothermiestrom und "nachwachsendem Kohlenstoff", also nicht fossilem Kohlenstoff, reduzieren den CO₂ Ausstoß eines Verbrennungsmotors signifikant², egal ob mit oder ohne elektrischen Antriebsstrang. Auf Grund der hohen Verluste im Herstellungsprozess von synthetischen Kraftstoffen, sind die Herstellkosten gegenüber fossil basierten Kraftstoffen leider immer noch zu hoch und damit deren Marktdurchdringung gering.

3. Batterien als Energiespeicher

Auf Batterien übertragen wäre es zur signifikanten Steigerung der Energiedichte ebenfalls sinnvoll, als Oxydationsmittel die Umgebungsluft zu verwenden. Dies ist bei den <u>nicht wieder aufladbaren</u> Zellen (Primärzellen) für beispielsweise Hörgeräte seit Jahren üblich und führt bei Zink-Luft Zellen auf eine Energiedichte von ca. 440 Wh/kg [2]. <u>Wieder aufladbare</u> Zellen (Sekundärzellen), welche die Umgebungsluft als Reaktionspartner verwenden, wie beispielsweise Lithium-Luft, Schwefel-Luft und Aluminium-Luft Batterien sind noch im Forschungsstadium [5] und [6]. Insbesondere konnte noch kein Weg gefunden werden, Batterien, die die Umgebungsluft als Reaktionspartner Zeit aufzuladen, ohne dass die Batterie signifikant an Kapazität verliert [5]. Gegenüber der heute gebräuchlichen Lithium-Ionen Batterien könnten in der Entwicklung befindliche wieder aufladbare Aluminium-Ionen Zellen 400 Wh/kg [3] und Aluminium-Schwefel Zellen 1000 Wh/kg [4] erreichen.

Nur dort, wo zufolge der geringen Geschwindigkeit der Fahrzeuge der Energieaufwand zur Zurücklegung einer Wegstrecke gering ist und man insbesondere auf minimale Feinstaubbelastung und NO_x Emissionen Wert legen muss, wie beispielsweise in Städten und Ballungsräumen, ist <u>der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen sinnvoll</u>. Für eine angestrebte Reichweite von gut 100 km, erlaubt die geringe Durchschnittsgeschwindigkeit von 20 bis

^{|&}lt;sup>2</sup> Diese Kraftstoffe werden synthetisch unter Zuhilfenahme von Solar- oder Windenergie und Kohlenstoff mit geringer CO₂ Belastung für die Umwelt hergestellt.

25 km/h in Ballungsräumen den Energieinhalt der Fahrzeugbatterie auf ca. 25 kWh zu begrenzen. Die langsame Entladezeit von 4 bis 5 Stunden gestattet den Einsatz einer Batterie mit besonders hoher gravimetrischer Energiedichte ("Hochenergiebatterie mit ca. 260 Wh/kg auf Zellebene" |³), die in einem Batteriepack mit 110 bis 120 kg mit heute verfügbaren Lithium-Ionenzellen [7] aufgebaut werden kann. Dieser Weg spart Kosten, Gewicht, Platz und man kann auf die Batteriekühlung nahezu verzichten, da bei mehrstündiger Entladung die Verlustleistung in der Batterie gering ist. Trotzdem haben Hochenergiebatterien immer noch um gut einen Faktor 40 geringere gravimetrische Energiedichten als flüssige Kraftstoffe.

Auch in Städten und Ballungsräumen wird erwartet, dass ein Fahrzeug exzellente Beschleunigung bietet und zur Vermeidung von Bremsenstaub möglichst jede Bremsung nahezu ausschließlich über elektrische Bremsenergierückgewinnung (Rekuperation) leistet. Eine Hochenergiebatterie mit "nur" 25 kWh Energieinhalt würde bei der hohen vom Fahrzeug verlangten Dynamik und der damit verbundenen hohen Leistung des elektrischen Antriebsstranges die Batterie unzulässig belasten und folglich die Lebensdauer verringern. Eine Hochleistungsbatterie [8] - [10] mit 25 kWh hätte kein Verlustleistungsproblem mit der hohen Fahrzeugdynamik, die um den Faktor 2 bis 4 geringere gravimetrische Energiedichte |⁴ verbietet aber aus Kosten- und Gewichtsgründen den Einsatz dieses Batterietyps. Der Widerspruch *"Einsatz einer Hochenergiebatterie zufolge mehrstündiger Entladung"* gegenüber *"kurzfristige Belastung der Hochenergiebatterie mit hoher Leistung durch dynamische Fahrweise"* lässt sich durch die Verwendung eines <u>zusätzlichen</u> Hochleistungsenergiespeichers lösen.

Der in Kapitel 9 und 10 näher ausgeführte Hochleistungsenergiespeicher, im Folgenden als "**Power-Tank**" bezeichnet, benötigt nur einen geringen Energieinhalt aber hohe Leistung und ermöglicht in batterieelektrischen Fahrzeugen leichte und platzsparende Hochenergiebatterien einzusetzen. Das energieoptimierte Batteriemodul hat bei gleichem Energieinhalt ein deutlich geringeres Gewicht als die heute üblichen Batteriemodule mit höherer Leistungsdichte, da diese einen Kompromiss zwischen Energiedichte, Leistungsdichte und Kühlungsaufwand der Batterie eingehen müssen. Um Schädigungen zu vermeiden, dürfen Hochenergiebatterien nur langsam, typischerweise in zwei bis vier Stunden, aufgeladen werden. Das muss kein Nachteil sein, da damit die Ladeinfrastruktur mit der heute in einem Haushalt verfügbaren Anschlussleistung zu bewältigen ist.

Wenn große Strecken über Land mit hoher Geschwindigkeit zurückzulegen sind, <u>machen</u> <u>batterieelektrische Fahrzeuge hingegen keinen Sinn</u>, denn die Antriebsleistung wächst mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit und dieser Fahrwiderstand dominiert bei heutigen Fahrzeugen bereits ab ca. 80 km/h. Damit braucht man, um Fahrstrecken von 300 bis 400 km mit Autobahngeschwindigkeit zurückzulegen, sehr energiereiche Batteriepacks mit gut 600 kg Eigengewicht [11] - [13]. Die große Batterie erhöht das Fahrzeuggewicht signifikant und damit auch den Energiebedarf des Fahrzeuges; das ist eine Spirale in die falsche Richtung. Die Sicherheit von Batterien mit großem Energieinhalt, der heute ausschließlich mittels Lithium-Ionen Technologie realisierbar ist, lässt sich nur bedingt sicherstellen, weder bei allen möglichen Batteriedefekten noch bei schweren Unfällen. Im Brandfall ist das Löschen der

^{|&}lt;sup>3</sup> Man kann auf die Zellenchemie heute üblicher Laptop- und Mobiltelefonzellen zurückgreifen.

^{|&}lt;sup>4</sup> Hochleistungs-Lithium Batterien mit Lithiumtitanspinell (Li₄Ti₅O₁₂) Anode haben eine Energiedichte von 30 bis 110 Wh/kg und einige 10.000 Lade-Entladezyklen @ 10 C [36], Ultra High Power NMC Zellen zu 140 Wh/kg und bis zu 4.000 Lade-Entladezyklen @ 4 C, Hochenergie-Batterien von ca. 260 Wh/kg und einige 1000 Lade-Entladezyklen @ 0,5 C [7] bis [10].

Batterie nahezu unmöglich und es entweichen aus der brennenden Batterie für die Umwelt und den Menschen giftige Gase in großer Menge |⁵.

Um – so wie heute gefordert – beliebig lange Strecken mit einem batterieelektrischen Elektrofahrzeug zurücklegen zu können, benötigt man eine Batterie mit großem Energieinhalt. Das Laden dieser Batterien setzt eine in jedem Land aufzubauende und mit gewaltigen Kosten verbundene, flächendeckende Schnelllade-Infrastruktur voraus. Die damit erreichbare kurze Nachladezeit für ca. 60 % der Batterieenergie in 15 Minuten ist immer noch lange, verglichen mit der heute typischen Nachtankzeit mit flüssigem Kraftstoff von 3 bis 5 Minuten und fordert hohe Netzanschlussleistungen jenseits der 150 kW pro Ladestation. Die vom Kunden geforderte rasche Nachladezeit der Batterie verhindert den Einsatz von Zellen mit hoher Energiedichte und verlangt zusätzlich einen großen Kühlaufwand der Zellen, viel mehr als man für den Fahrbetrieb benötigt, denn es ist unmöglich, im Fahrbetrieb in 15 Minute 60 % der Batterieenergie zu verbrauchen. Damit sind die im Fahrzeug verbauten Zellen eher Zellen, die auf hohe Leistungsdichte statt auf hohe Energiedichte optimiert sind.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass nicht alles, was technisch machbar ist, auch sinnvoll ist. Das Ziel muss sein, eine nachhaltige Mobilität bei kleinstmöglicher CO₂ Belastung darzustellen. Die Kapitel 6 bis 10 zeigen einen Weg auf, wie man <u>bei einer **fairen** "Well-to-Wheel" oder noch besser "Cradle-to-grave" | ⁶ Betrachtung</u> gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen mit großen Batterien, die über eine Schnellladeinfrastruktur geladen werden, durch <u>eine Senkung der Emissionen und des CO₂ Ausstoßes</u> nachhaltige Mobilität realisieren kann.

4. Fahrten innerhalb von Städten

Die vielerorts hohe und auf den Verkehr zurückzuführende Partikel- und gasförmige Schadstoffbelastung üben großen Druck auf die Politik aus, im städtischen Bereich nur mehr Fahrzeuge zuzulassen, deren Energiespeicher und Antriebsstrang während der Fahrt keine Schadstoffe freisetzen, also beispielsweise batterieelektrische Fahrzeuge oder mit Wasserstoff betriebene Polymermembran (PEM) Brennstoffzellenfahrzeuge. Beide Fahrzeugkategorien werden am Markt angeboten. Für Wasserstoffbrennstoffzellenfahrzeuge fehlt ein flächendeckendes Tankstellennetz, womit für den städtischen Verkehr kurz- bis mittelfristig nur batterieelektrische Fahrzeuge oder Hybridfahrzeuge, die innerstädtisch rein elektrisch fahren, in Frage kommen.

5. Langstreckenfahrten außerhalb von Ballungsräumen

Der Betrieb eines Fahrzeuges über größere Distanzen außerhalb der städtischen Ballungsräume stellt andere Anforderungen an den elektrischen Antriebsstrang und an dessen Energiespeicher als eine innerstädtische Fahrt. <u>Nicht mehr der Ort der Schadstofffreisetzung</u> ist wichtig, sondern <u>der gesamte CO₂, Partikel- und gasförmige Schadstoffausstoß muss</u> <u>minimiert</u> werden, möglichst in einer "Well-to-Wheel" oder noch präziser "Cradle-to-Grave" Betrachtung. Es ist unerheblich, ob dieser Ausstoß durch das Fahrzeug erfolgt oder durch ein Kraftwerk, das die Elektrizität zum Nachladen der Fahrzeugbatterie bereitstellt oder

Im Falle des Versagens von Lithium-Ionen-Batterien entstehen je nach Zusammensetzung der Batterien Fluorwasserstoff und Phosphorsäure sowie weitere giftige und kanzerogene Stoffe. Je nach Zusammensetzung werden Schwermetalle in Form von Nickel- und Cobaltoxiden sowie Graphit und ca. 150 I gasförmiger Fluorwasserstoff (HF) pro kWh Batterieenergie freigesetzt. Eine 18650 2,2 Ah Zelle speichert 8,7 Wh elektrische Energie, setzt eine thermische Energie von 100 Wh und 11 I Gasmenge frei. Bei einer 20 kWh BEV Batterie ist die chemisch gespeicherte Energie das 7 bis 11 Fache und sie setzt 12500 I Gasmenge frei [52].

^{|&}lt;sup>6</sup> Auch als Lebenszyklusanalyse oder Life Cycle Assessment bezeichnet

durch eine Raffinerie, die den Wasserstoff für die Betankung des Brennstoffzellenfahrzeuges produziert.

Die Automobilindustrie hat erkannt, dass es kontraproduktiv zu den Anstrengungen ist, die Anzahl an Fahrzeugen des nicht öffentlichen Verkehrs zu reduzieren, wenn man zwei Fahrzeugtypen anbietet: ein BEV mit kleiner Batterie für Städte und Ballungsräume und ein Fahrzeug für längere Strecken bei höheren Fahrgeschwindigkeiten. Das Ziel ist daher, **EIN Fahrzeug anzubieten**, das sowohl als BEV in Ballungsräumen emissionsfrei arbeitet als auch außerhalb lange Strecken bei hoher Geschwindigkeit zurücklegen und rasch "nachgetankt" werden kann.

Die Automobilindustrie bietet gegenwärtig zwei Fahrzeugvarianten an, die **beide** den Anspruch erheben, innerstädtisch wie über Land gegenüber heute verfügbaren konventionellen Fahrzeugen mit Vkm, die CO₂ Emissionen signifikant zu verringern, leistbar und soziologisch verträglich zu sein.

Fahrzeugtype A) Die Proponenten von BEV mit großen Batterien verdrängen,

- dass aus **globaler Sicht** der Strom zum Nachladen noch für viele Jahre mehr CO₂ hervorrufen wird, als Fahrzeuge mit dem in diesem Papier vorgestellten Hybridkonzept,
- dass die Risiken und Bedenken zufolge der neuen Rohstoffabhängigkeiten (Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan, ...) für die Produktion von Lithium-Ionen Batterien ernst zu nehmen sind,
- dass die in **Kapitel 3** adressierten Probleme der Schnellladung von großen Batterien hohe Investitionen in den Netzausbau erfordern und damit lange dauern wird und
- dass gewisse Fahraufgaben, für die grundsätzlich viel Energie notwendig ist und die der Kunde von konventionellen Pkw als beherrschbar kennt, nicht erfüllt werden können. Nicht erfüllt bedeutet, dass die Reichweite oder die Nutzungszeit des BEV bis zum nächsten Nachladen unakzeptabel kurz wird oder der Fahrer gezwungen ist, die Fahrgeschwindigkeit unangemessen zu verringern. Beispiele für energieaufwändige Fahraufgaben sind, Dachtransporte mit Boxen oder Fahrrädern auf der Autobahn, Winterbetrieb bei großer Kälte und höherer Geschwindigkeit oder das Ziehen von Booten und Wohnwagen.

Fahrzeugtype B) Hybrid und Plug-in Hybrid Fahrzeuge kombinieren eine kleine bis mittelgroße Batterie mit einer Vkm, die über ein vielstufiges Automatikgetriebe (auch) mit den Antriebsrädern verbunden ist.

- Mit diesem Konzept vermeidet man die Probleme im Zusammenhang mit Schnellladung von BEV und kann das bestehende Tankstellensystem zur Abdeckung der Reichweite nutzen.
- Da die Batterie relativ wenig Kapazität hat, kann die erwartete Fahrzeugbeschleunigung nicht ausschließlich mit elektrischer Energie aus der Batterie erfolgen. Die Vkm muss ebenfalls Beschleunigungsleistung liefern und über einen großen Last- und Drehzahlbereich betreibbar sein. Damit ist trotz vielstufigem Automatikgetriebes zur Lastpunktverschiebung der Wirkungsgrad der Vkm in großen Bereichen des Kennfeldes weit weg von optimal.
- Das Resultat ist eine vom Hersteller ermittelte fahrzeugspezifische CO₂ Emissionsangabe, die realitätsfremd ist, da beim Testlauf die Vkm möglichst wenig eingesetzt wird und die beim Test verbrauchte elektrischer Energie mit **Null g CO₂ Emissionen in die**

Berechnung eingeht. In Kundenhand sind damit der Kraftstoffverbrauch und damit auch die CO₂ Emissionen viel höher, als vom Hersteller in den Papieren festgehalten.

Der Hybridansatz der Automobilindustrie war die Motivation durch die Einführung eines "Fuel-Converters" statt der Vkm und eines "Power-Tanks" statt der kleinen bis mittelgroßen Batterie zu einer Lösung zu kommen, die simulationsbasiert gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Vkm signifikant CO₂ einspart und gleichzeig die weiter oben erwähnten Probleme der handelsüblichen BEV und Hybridfahrzeuge vermeidet.

Gegenüber Stadtfahrten mit Durchschnittsgeschwindigkeiten von 20 bis 25 km/h steigern Langstreckenfahrten auf Freilandstraßen und Autobahnen die Geschwindigkeit auf ein Vielfaches. Damit steigt auch die Antriebsleistung zufolge des mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit v wachsenden Luftwiderstandes. Die folgende **Tabelle 1** zeigt, welche Energie man benötigt, um bei Konstantfahrt auf der Autobahn eine Strecke von 400 km <u>ohne</u> Zusatzverbrauch für Nebenaggregate (typisch 2 kW) zurückzulegen. Bergiges Gelände, ungleichmäßige Fahrweise und oftmaliges starkes Beschleunigen erhöhen trotz Bremsenergierückgewinnung den genannten Energiebedarf.

Tabelle 1Antriebsleistung, Energieverbrauch und Fahrzeit eines Fahrzeuges gemäß Abb. 1 bei
Konstantfahrt über eine Distanz von 400 km und ohne Zusatzverbrauch für Neben-
aggregate bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

Geschwin- digkeit	Fahrzeit für	Antrieb	sleistung	Energieverbrauch des Antriebstranges abhängig vom Wirkungsgrad η		
	400 KIII	mechanisch	elektrisch aus	$\eta = 100 \%$	$\eta = \text{realistisch}$	
		am Rad	dem Speicher	1		
80 km/h	5 h	8,1 kW	11,0 kW	40,5 kWh	55,0 kWh	
100 km/h	4 h	12,9 kW	17,1 kW	51,6 kWh	68,4 kWh	
130 km/h	gut 3 h	23,6 kW	30,2 kW	72,6 kWh	92,9 kWh	
150 km/h	2¾ h	33,7 kW	42,3 kW	89,9 kWh	112,8 kWh	
180 km/h	2¼ h	54,0 kW	66,3 kW	120,0 kWh	147,3 kWh	

100 kWh Energie in Batterien gespeichert bedeuten ca. 80 - 90 kWh effektiv nutzbare Energiemenge und gut 600 kg Batteriegewicht [11] - [14]. Diese zusätzliche Fahrzeugmasse muss durch konstruktive Maßnahmen im Rahmen, in den Radaufhängungen und in der Karosserie Rechnung getragen werden, womit das Fahrzeuggewicht weiter zunimmt. Damit stellt sich die Frage, ob es nicht zur Gewichtsreduktion des Fahrzeugges sinnvoll wäre, die elektrische Energie an Bord aus flüssigem Kraftstoff bereitzustellen, statt aus schweren Batterien mit hoher Kapazität zu beziehen. Allerdings macht die Energiekonversion im Fahrzeug nur dann Sinn, wenn das Fahrzeuggewicht dadurch sinkt und die Bereitstellung der elektrischen Energie mit hohem Wirkungsgrad, also mit vergleichbarer oder geringerer CO_2 - und Schadstoffbelastung bewerkstelligt werden kann als die CO_2 - und Schadstoffbelastung zur Bereitstellung der elektrisch nachzuladenden Energie aus dem Netz verursachen würde. Ein geringes Fahrzeuggewicht hilft zusätzlich, den Energieverbrauch des Fahrzeuges und im Crash-Fall die Unfallfolgen für den Unfallgegner zu verringern.



Abb. 1: Leistungsbedarf P_{Luft} eines Mittelklassefahrzeuges mit einem Rollwiderstandsbeiwert $\mu = 0,013$, der Luftdichte $\rho = 1,225$ und einem Luftwiderstand $c_WA = 0,60$ aus [1]. Die gezeigte elektrische Antriebsleistung berücksichtigt die Wirkungsgradkette des Antriebsstranges aber <u>nicht</u> die elektrische Antriebsleistung für die Nebenaggregate.

6. CO₂ Emissionen konventioneller und batterieelektrischer Fahrzeuge

Etwa die Hälfte des Stromes wird heute in Europa aus fossilen Quellen, insbesondere aus Kohle und Erdgas gewonnen [40] und [50]. Aus **globaler** Sicht wird Strom im Durchschnitt mit 518 g CO₂/kWh bereitgestellt [22]. Auch Wasserstoff wird zur Zeit vorwiegend über Steamreforming aus Erdgas generiert und dieser Zustand wird sich global betrachtet leider nur langsam ändern. Der durchschnittliche elektrische Wirkungsgrad fossiler Kraftwerke zur Stromerzeugung, die großtechnisch immer Gas- und/oder Dampfturbinen (GuD) einsetzen, liegt weltweit bei ca. 33 % [20]. Deutsche Kraftwerke erreichen im Mittel derzeit ca. 38 % Wirkungsgrad und die im letzten Jahrzehnt ans Netz gegangenen neuen Kohlekraftwerke liegen zwischen 40 und 45 % [20]. Neue und mit dem Brennstoff Erdgas betriebene GuD-Kraftwerke erreichen bis zu 64 % Wirkungsgrad [20] & [21].

Abb. 2 zeigt einen Vergleich der Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen in t CO₂-eq von Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen (ICE), von Hybrid-(HEV), von Plug-in-Hybrid (PHEV), von batterieelektrischen (BEV) und von Brennstoffzellen-Fahrzeugen (FCEV) [22], wenn die Kraftstoffe fossil sind, für die Aufladung der Batterie der Mittelwert der CO₂ Emissionen einer globalen Elektrizitätserzeugung von 518 gCO₂/kWh angenommen wird und man Wasserstoff über "Steam-Reforming" herstellt. Man erkennt, dass ein mit fossilen Kraftstoffen betriebener Kleinwagen (ICE-small) vergleichbare CO₂ Emissionen aufweist wie ein großes Elektrofahrzeug (BEV) und wie ein mittelgroßes Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV).

Um das Ziel, den **globalen** CO₂ Footprint des Verkehrs in absehbarer Zeit signifikant abzusenken, sind Elektrofahrzeuge offensichtlich schlecht geeignet, da der Ersatz von fossilen Energieträgern zur Stromerzeugung durch CO₂ arme Energieträger ein langwieriger und teurer Prozess ist.

Georg Brasseur, Institut für Elektrische Meßtechnik und Sensorik, Technische Universität Graz



Source: IEA 2019. All rights reserved.

Note: This figure portrays mid-size vehicles having similar performance with the exception of driving range. The BVE refers to a vehicle with 200 km range, the addition of the shaded area refers to at vehicle with 400 km range. The ranges suggested by the sensitivity bars represents the case of small cars (lower bound) and of large cars (uper bound) – for BVEs, the lower bound of the sensitivity bar represents a small car with 200 km range, and the upper bound represents a large car with 400 km range. The carbon intensity of the electricity mix is assumed equal to the global average (518 g CO₂/kWh). FCEVs are assumed to rely entirely on hydrogen produced from steam methane reforming. Other assumptions used to develop this figure are outlined in chapter 4 of the *Global EV Outlook 2019*.



Wesentlich rascher ließe sich das Ziel einer CO₂ Emissionssenkung dadurch erreichen, dass der Wirkungsgrad von Fahrzeugen, die mit Benzin oder Dieselkraftstoff betrieben werden, signifikant gesteigert wird. Diese Maßnahme soll **nicht ein Ersatz** für die Vermeidung fossiler Energie zur Stromerzeugung sein, sondern eine **zusätzliche Brückentechnologie** zur Vermeidung von CO₂ Emissionen, bis global "grüner" Strom und damit auch "grüner" Wasserstoff die Regel und nicht die Ausnahme ist.

Das mit Abstand größte Potenzial zur Senkung der CO₂ Emissionen von Vkm liegt in der Wahl des Arbeitspunktes, denn im Stadtverkehr haben Pkw-Dieselmotoren einen Wirkungsgrad von ca. 20 % und Pkw-Ottomotoren von 10 bis 15 %, hingegen im Bestpunkt bei Pkw-Dieselmotoren ca. 42 % und bei Pkw-Ottomotoren ca. 37 % [23]. Das bedeutet, dass eine Lastpunkverschiebung der Vkm in den Bestpunkt die CO₂ Emissionen mehr als halbieren könnte, denn der Verkehr wird sich weltweit immer mehr in Städten und Ballungsräumen abspielen. Zur Zeit leben bereits mehr als 50 % der Weltbevölkerung in Ballungsräumen, für 2050 geht [51] von 70 % aus.

Die optimale Lastpunktverschiebung bei einer Vkm bedeutet deren Betrieb <u>ausschließlich</u> im Bestpunkt, also bei <u>einer bestimmten Drehzahl</u> **und** bei <u>einer bestimmten Last</u>. Leider kann man ein Straßenfahrzeug nicht mit konstanter Leistung betreiben. Ergo benötigt man ein Elektro-Hybridkonzept, das den rein elektrischen Antriebsstrang aus einem elektrischen Energiespeicher versorgt und die Vkm stellt mittels eines mit der Vkm verbundenen Generators sicher, dass der elektrische Energiespeicher nicht leer wird. Unter den im nächsten Kapitel gezeigten Voraussetzungen hat ein mit einem Verbrennungsmotor betriebenes Elektro-Hybridfahrzeug noch für lange Zeit einen vergleichbaren bis geringeren CO₂- und Schadstoffausstoß als ein batterieelektrisches Fahrzeug, das <u>unter Berücksichtigung der länderspezifi-</u> schen CO₂ Belastung der elektrischen Energiebereitstellung aus dem Netz geladen wird. Weitere Varianten, um aus einem im Fahrzeug mitgeführten Kraftstoff mit hoher Energiedichte Elektrizität für den Betrieb des elektrischen Antriebsstranges eines Fahrzeuges bereitzustellen, werden im nächsten Kapitel diskutiert.

7. Erzeugung der elektrischen Energie im Fahrzeug aus flüssigem Kraftstoff

Als Energiekonverter für Elektrizität aus flüssigen Kohlenwasserstoffen eignen sich Festoxidbrennstoffzellen (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) oder Verbrennungsmotoren mit einem Generator. Gegenwärtig verfügbare SOFC arbeiten zwischen 750 und 1000 °C und haben bis zu 65 % ([26], [27]) Konversionswirkungsgrad. Der Aufwärm- und Abkühlvorgang einer SOFC muss über viele Minuten bis Stunden erfolgen, damit der Keramik-Metall Stack die hohe mechanische Belastung der Temperaturänderung unbeschadet übersteht. Trotzdem hält ein Stack nur ein paar hundert Aufheizzyklen aus. In einem stationären Betrieb, wie etwa zur Strom- und Wärmegewinnung im Haushalt ist diese Betriebseinschränkung nicht störend, für Fahrzeuganwendungen, die hohe dynamische Anforderungen an die Energiequelle stellen, sind heutige SOFC Stacks ungeeignet.

Polymermembran (PEM) Brennstoffzellen wären grundsätzlich als Energiekonverter gut geeignet. Allerdings benötigen PEM-Zellen als Energieträger hochreinen Wasserstoff und dieser wird, wie in Kapitel 4 ausgeführt, auch in absehbarer Zeit nicht flächendeckend und vorwiegend nur aus fossilen Quellen hergestellt, verfügbar sein.

Somit bleiben nur mit Generatoren gekoppelte Gasmaschinen, um flüssige Kraftstoffe in elektrische Energie umzuwandeln. Gasmaschinen nutzen einen thermischen Kreisprozess (Carnot-Prozess), über den die in einem Gas gespeicherte Wärmeenergie in mechanische Arbeit umgewandelt wird. Der ideale Wirkungsgrad $\eta_i = 1 - (T_A / T_V) = 1 - (T_{min} / T_{max})$ eines <u>verlustlosen</u> (idealen) Kreisprozesses wird gemäß vorstehender Formel nur vom Temperaturunterschied zwischen der (Verbrennungs)temperatur T_V des Gases im Arbeitsraum und der Austrittstemperatur T_A aus dem Arbeitsraum bestimmt. Die grundsätzlichen Überlegungen gelten auch für reale und verlustbehaftete Gasmaschinen. Zur Optimierung des Wirkungsgrades sollte ohne wesentliche Vergrößerung der von der Gasmaschine abgegebenen Verlustwärme die Temperatur T_{max} im Arbeitsraum maximiert und die Austrittstemperatur T_A aus dem Arbeitsraum minimiert werden.

Die <u>intermittierende Verbrennung</u> eines Viertakt Hubkolbenmotors erlaubt eine sehr hohe Flammentemperatur im Brennraum (ca. 2200 bis 2600 °C [15] - [18]), da diese nur ca. 5 % der Zykluszeit einwirkt (30 ° Kurbelwinkel (KW) bezogen auf 720 ° KW des Arbeitszyklus). Zufolge der thermischen Trägheit und einer angemessenen Bauteilekühlung erwärmen sich trotz der hohen Verbrennungstemperatur die für die Umwandlung der thermischen Energie in mechanische Arbeit notwendigen Bauteile (Zylinder, Kolben, Ventile) auf eine über einen Arbeitszyklus (720 ° KW) gemittelte Temperatur, die nur bei wenigen 100 °C liegt. Drauf beruht der <u>grundsätzlich höhere Wirkungsgrad einer Gasmaschine mit intermittierender Verbrennung (Vkm)</u> ($\eta_i = 1 - (T_A / T_V) = 1 - (1100 \text{ K}/2900 \text{ K}) = 0,62)$ gegenüber einer mit kontinuierlicher Verbrennung (Gasturbine).

Die mit <u>kontinuierlicher Verbrennung</u> arbeitende Gasturbine erlaubt eine Turbineneintrittstemperatur von maximal 1200 bis 1600 °C ([19] - [21]), da die Turbinenschaufeln ungefähr die gleiche Temperatur wie die Verbrennungsgase annehmen und derzeit kein Werkstoff existiert, der eine höhere Temperatur bei gleichzeitig hoher mechanischer Beanspruchung (Fliehkraft und Gaskräfte) aushält ($\eta_i = 1 - (T_A / T_V) = 1 - (950 \text{ K}/1900 \text{ K}) = 0,50$). Deshalb hat eine Gasturbine grundsätzlich einen schlechteren Carnot-Wirkungsgrad als ein Hubkolbenmotor. Der reale Wirkungsgrad η der Vkm wird als das Verhältnis der von der Vkm abgegebenen mechanischen Arbeit $W_{\rm M}$ ([$W_{\rm M}$] = Nm) zum unteren Heizwert $H_{\rm U}$ ([$H_{\rm U}$] = J/kg) mal der Masse $m_{\rm K}$ des verwendeten Kraftstoffes verstanden: $\eta = W_{\rm M}/(m_{\rm K} \cdot H_{\rm U})$ [24]. Lkw Dieselmotoren haben im Bestpunkt einen Wirkungsgrad von 45 % [24], großvolumige, langsam laufende Schiffsdieselmotoren (Kreuzkopfmotoren) von 54 % [24]. Die bei der Drehzahl n ([n] = s^{-1}) arbeitende Vkm treibt einen Generator mit dem Drehmoment $M_{\rm Vkm}$ ([$M_{\rm M}$] = Nm) an. Das Drehmoment $M_{\rm Vkm}$ ergibt sich aus der Vkm Leistung $P_{\rm Vkm}$ ([$P_{\rm Vkm}$] = W) zu $M_{\rm Vkm} = P_{\rm Vkm}/(2\pi n)$. Wenn man die Vkm <u>nur bei einer Drehzahl und einer Last</u> betreibt und diesen Arbeitspunkt konstruktiv optimiert, kann der thermische Wirkungsgrad η auch von kleinvolumigen Viertaktmotoren auf 50 % und bei zusätzlicher Nutzung von Abgasenergierückgewinnung bis auf annähernd 60 % gesteigert werden [25].

Abgasenergierückgewinnung zur Wirkungsgradsteigerung einer Vkm ist nicht neu, bereits um 2005 haben sich Firmen wie BMW und heat2power SARL intensiv mit der Materie auseinandergesetzt [28] und [29]. Eine marktkonforme Umsetzung ist aber bisher daran gescheitert, dass eine Vkm in einem Fahrzeug ohne elektrischen Antriebsstrang über einen großen Lastund Drehzahlbereich betrieben werden muss. Damit schwanken je nach Betriebspunkt die Abgastemperatur und -energiemenge stark, womit die Abgasenergie <u>nicht effizient</u> in elektrische Energie W_{el} konvertiert werden kann.

Zum Thema Emissionen ist festzuhalten, dass Fahrzeughersteller zur Erfüllung der aktuellen Emissionslimits viel Zeit und Geld in die motorbaureihenspezifische Anpassung der Abgasnachbehandlungssysteme konventioneller Kraftfahrzeuge investieren müssen. Hierbei sind neben den Zusatzkosten die immer strikteren Emissionslimits und der dynamische Betrieb der Vkm über einen möglichst großen Last- und Drehzahlbereich DIE dominanten Herausforderungen. Wenn – wie bei konventionellen Kraftfahrzeugen üblich – der gesamte mögliche Lastund Drehzahlbereich der Vkm statisch wie dynamisch ausgenutzt werden soll, liegen – so wie bei einem Kaltstart – nicht alle Betriebspunkte in einem Abgastemperaturfenster, das eine klaglose Emissionsreduktion sicherstellt und es müssen zusätzliche last- und drehzahlabhängige Maßnahmen vorgesehen werden, um die Emissionsgrenzwerte zu erfüllen.

Bei einem konventionellen Kraftfahrzeug tritt ein "Kaltstart" nur beim Starten der Vkm auf und die Aufwärmzeit der Abgasanlage bis zur Betriebstemperatur ist in der Regel kurz gegenüber der Betriebsdauer der Vkm bis zum Ende der Fahrt. Bei einem "Punktmotor", also einer Vkm, die entweder stillsteht oder nur bei <u>einer Drehzahl</u> und einer <u>fixen Last</u> betrieben wird, kann möglicherweise ein "Kaltstart" mehrfach während einer Fahrt auftreten, da die in einem Speicher bereitgestellte elektrische Energie nicht ausreicht, um die gewünschte Fahrstrecke rein elektrisch zurückzulegen. Da der "Punktmotor" starr mit einem elektrischen Generator verbunden ist, besteht z.B. die Möglichkeit bei einem "Kaltstart" den "Punktmotor" mit dem als Elektromotor verwendeten Generator anzutreiben und erst dann Kraftstoff in den "Punktmotor" einzuspritzen, bis das Abgasnachbehandlungssystem die Betriebstemperatur erreicht hat. Man verschenkt damit etwas Wirkungsgrad, stellt aber geringstmögliche Emissionen sicher.

Bei modernen Kraftfahrzeugen mit Start/Stopp Automatik dürfte bei Motorstopp das Abkühlproblem des Abgasnachbehandlungssystems bereits gelöst sein, da bei diesen Fahrzeugen ein oftmaliger Start/Stopp der Vkm zulässig ist ohne dass dadurch die strengen Emissionslimits überschritten werden.

Der Betrieb einer Vkm in einem Arbeitspunkt bei fixer Last und Drehzahl liefert eine durch die Konstruktion der Vkm festgelegte konstante Wärmeenergiemenge bei konstanter Temperatur. Da ein rein stationärer Betrieb der Vkm vorliegt, kann davon ausgegangen werden, dass die Erreichung der Emissionslimits mit einem "Punktmotor" generell leichter zu erfüllen sein

werden, als mit einer in einem konventionellen Kraftfahrzeug verbauten und dynamisch betriebenen Vkm.

Weiters eröffnet sich die Chance, mit Hilfe einer effizienten Abgasenergierückgewinnung (Waste-Heat Recovery) und Umwandlung der thermischen Energie in elektrische Energie W_{WHR} , den Wirkungsgrad des "Punktmotors" weiter zu steigern. Dank optimierter Verbrennung und Abgasenergierückgewinnung haben z.B. die in der Saison 2017 eingesetzten Formel 1 Rennmotoren an der Volllast bei ca. 700 PS einen Gesamtwirkungsgrad η_{Σ} von ca. 50 % [32] erreicht. Der Rennmotor treibt die Hinterräder über ein mechanisches Getriebe an und die aus der Abgasenergie zusätzlich gewonnene elektrische Energie W_{WHR} erhöht mittels eines Elektromotors das Drehmoment an der Hinterachse. Die elektrische Energie W_{WHR} erhält der Elektromotor von einem hochdrehenden Generator, der von einer Gasturbine angetrieben, die Wärmeenergie aus dem Überschuss-Abgasmassenstrom des Vkm-Turboladers bezieht.

Für Serienanwendungen bestehen mehrere Möglichkeiten Abgaswärmeenergie in elektrische Energie umzuwandeln, wie beispielsweise mit Peltier-Elementen, einer Abgasturbine, einem Dampfkreislauf mit Dampfturbine oder einer Kombination der genannten Maßnahmen [29]. Es besteht auf diesem Gebiet großer Forschungsbedarf, um das bereits Erreichte weiter zu verbessern und zu kostengünstigen, effizienten und serientauglichen Lösungen für Fahrzeuge zu kommen. Hochwertige Ingenieurkunst ist hier gefragt, die grundlegenden Zusammenhänge der Thermodynamik sind längst bekannt. <u>Wenn bedeutende Fahrzeug- respektive Motorenhersteller das Thema ernsthaft angehen, könnten in wenigen Jahren Fahrzeuge in Kundenhand den Beweis antreten.</u> Das Optimierungspotenzial wird nie gänzlich ausgeschöpft sein, wie Verbrennungsmotoren seit über 150 Jahren zeigen.

Eine aus der Formel 1 abgeleitete und optimierte Vkm, die <u>in nur einem Arbeitspunkt betrie-</u> <u>ben</u> wird ("Punktmotor") und zusätzlich <u>Abgasenergierückgewinnung nutzt</u> (diese Kombination wird als <u>"Fuel-Converter</u>" bezeichnet), kann einen noch höheren Wirkungsgrad als heutige Formel 1 Motoren erreichen, da bei vorgegebener Kraftstoffmenge nicht die maximale Leistung bei minimalem Gewicht das Optimierungskriterium ist, sondern ein minimaler Verbrauch bei leistbarem technischen Aufwand. Zur Spezifizierung des in Abb. 3 ausgeführten Fuel-Converters werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die optimierte Vkm hat eine Kurbelwellenleistung P_{Vkm} ([P_{Vkm}] = W) von 50 kW (\approx 68 PS) und einen Wirkungsgrad $\eta_{VKM} = W_M/(m_K \cdot H_U)$ von 50 % [25].
- Das Kurbelwellendrehmoment $M_{\rm M}$ der Vkm wird über einen Generator mit nachgeschaltetem Gleichrichter mit dem Gesamtwirkungsgrad $\eta_{\rm GG}$ = 93 % (Generator $\eta_{\rm GE}$ = 95 % [34] und Gleichrichter $\eta_{\rm GR}$ = 98 %) in elektrische Energie $W_{\rm el}$ umgewandelt.
- Abb. 3 zeigt zwei Ausführungsvarianten 1) und 2), die <u>wahlweise</u> aus dem heißen Vkm-Abgas elektrische Energie gewinnen. Sie unterscheiden sich im apparativen Aufwand und dem daraus resultierenden Wirkungsgrad der Abgasenergierückgewinnung.

50 % der Kraftstoffenergie (100 kWs) werden von der Vkm in mechanische Arbeit und 50 % in Motorabwärme gewandelt (50 kWs). 40 % der Motorabwärme (20 kWs) hat relativ geringe Temperatur (Kühlwasser, Motoröl, Konvektionskühlung und Strahlungswärme heißer Teile) und steht zum Teil zur Fahrzeugklimatisierung zur Verfügung. 60 % der Motorabwärme (30 kWs) ist heißes Abgas mit ca. 800 °C und kann zur Abgasenergie-rückgewinnung genutzt werden.

- **Ausführungsvariante 1):** Eine Abgasturbine nutzt 30 % der Abgasenergie *W*_{ht} und wandelt diese mit 30 % Wirkungsgrad [33] in elektrische Energie *W*_{WHR1} um. - **Ausführungsvariante 2):** In einer aufwändigeren Anordnung kann mit Gasturbine 2, einem nachgeschalteten Abhitzkessel und einer Dampfturbine (oder Ranking Cycle) die Abgasenergie W_{ht} mit 40 bis 50 % Wirkungsgrad in die elektrische Energie W_{WHR2} umgewandelt werden [21], [28] und [29].



- **Abb. 3:** Wirkungsgradabschätzung eines **Fuel-Converters**: Hochwirkungsgrad-Vkm mit Abgasenergierückgewinnung, die bei fixer Last und Drehzahl betrieben wird und im Fahrzeug aus flüssigem Kraftstoff elektrische Energie erzeugt.
- Die in einem Kühlkreislauf bei ca. 100 °C anfallende Restabwärme W_{lt} der Vkm und die Restwärme der Abgasenergierückgewinnung kann man für Heizung oder Kühlung des Fahrzeuges einsetzen. Es gilt für die ungenutzte Abwärme $W_{U} = H_{U} W_{el} W_{lt}$.

Der in **Abb. 3** dargestellte **Fuel-Converter** hat in der Ausführung gemäß "Variante 1" einen <u>Gesamtwirkungsgrad</u> $\eta_{\Sigma} = (W_{el} + W_{WHR1})/H_{U}$ von ca. <u>55 %</u> und in der "Variante 2" einen Gesamtwirkungsgrad $\eta_{\Sigma} = (W_{el} + W_{WHR2})/H_{U}$ von ca. <u>58 %</u>. Die Bandbreite des Wirkungsgrades η_{Σ} ist vom technischen und damit auch vom finanziellen Aufwand, den man in die Abgasenergierückgewinnung investieren will, abhängig.

Ein rasch umsetzbarer Ansatz zur Senkung der verkehrsbedingten CO₂ Emissionen wäre die zügige Umstellung auf Hybridfahrzeuge mit **Fuel-Converter**, da **Abb. 2** und **Tabelle 5** zeigen, dass mit dem aktuellen globalen Strommix von 518 g CO₂-eq/kWh keine signifikanten CO₂ Einsparung durch batterieelektrische Fahrzeuge erzielt werden kann.

Der hervorragende Gesamtwirkungsgrad eines Fuel-Converters von über 50 % und die daraus ableitbare geringe CO₂ Belastung von Hybridfahrzeugen mit Fuel-Converter sollten als Messlatte dienen, wie hoch die CO₂ Belastung für die Bereitstellung der elektrischen Energie in einem Land maximal sein darf, damit ein Staat Förderungen für batterieelektrische Fahrzeuge vergibt.

8. Kurzfristspeicherung der elektrischen Energie im Fahrzeug

Beim privaten Fahrzeugkauf bestimmen vorwiegend Emotionen die Entscheidung für oder gegen ein gewisses Fahrzeugmodell. Dabei spielt neben dem Styling und dem gebotenen Komfort, der Kraftstoffverbrauch (CO₂ Emissionen) und die vom Fahrzeug gebotene Fahrdynamik eine entscheidende Rolle. Das unmittelbare Ansprechen auf die Fahrpedalstellung und die hohe Fahrzeugbeschleunigung sind hierbei entscheidend. Diese Eigenschaften werden von einem elektrischen Antriebsstrang ideal erfüllt. Fahrzeuge mit Vkm müssen komplizierte und teure Systeme in die Vkm und in das Getriebe einbauen, um nur annähernd an die Agilität und die Beschleunigungscharakteristik eines elektrischen Antriebsstranges heranzukommen. Die von Kunden geforderte hohe Beschleunigung führt bei Vkm auf irrwitzig hohe Motorleistungen, die als "Abfallprodukt" Höchstgeschwindigkeiten ergeben, die im öffentlichen Verkehr gefährlich sind und deshalb typisch bei 250 km/h abgeregelt werden. Weiters verkomplizieren und verteuern die hohen Dynamikanforderungen an die Vkm die immer härter werdenden Emissionsvorschriften der Abgasnachbehandlungssysteme.

Hohe Fahrdynamik ist für eine effizient arbeitende Abgasnachbehandlung kontraproduktiv und die Lösung dieses Zielkonfliktes wird Jahr für Jahr schwieriger, <u>da die Emissions- und</u> <u>Verbrauchsbestimmungen immer strenger werden</u>. Diese Situation ist eine offensichtliche Sackgasse, aus der man mit einem elektrischen Antriebsstrang elegant herauskommt. Der **Fuel-Converter** ist von der maximalen Beschleunigung des Fahrzeuges vollständig entkoppelt und damit sind auch dessen Schadstoffemissionen von der Fahrdynamik vollständig entkoppelt und immer gleichbleibend. Hohe Fahrdynamik wird den Durchschnittsverbrauch des Fahrzeuges vergrößern aber nicht die Reichweite, da der Flüssigkeitstank des **Fuel-Converters** nur mit geringfügiger Gewichtszunahme|⁷des Fahrzeuges nahezu beliebig groß gemacht werden kann.

Auf den Punkt gebracht sind <u>Vkm Fahrzeuge mit mechanischem Antrieb nur leistungsbegrenzt</u>. Die für den Betrieb notwendige Kraftstoffenergie sorgt quasi für unlimitierte Fahrstrecken und hängt nur von der Tankgröße ab. <u>Batterieelektrische Fahrzeuge sind kaum leistungslimitiert</u>, sondern energie- und damit reichweitenbegrenzt.

^{|&}lt;sup>7</sup> Ein Kraftstofftank aus Kunststoff mit 22 l Inhalt hat ca. 2,0 kg und mit 43 l ca. 4,3 kg [53]. Bei 4 l/100 km Kraftstoffverbrauch des Fuel-Converters kann die Reichweite des Fahrzeuges von ca. 550 km durch die Erhöhung des Tankgewichtes um 2,3 kg plus ca. 16 kg Kraftstoff auf gut 1000 km mehr als verdoppelt werden.

Die Kurzfristleistung eines elektrischen Antriebsstranges ist quasi unbegrenzt und hängt bei einem batterieelektrischen Fahrzeug nahezu nur von der Leistungsfähigkeit des im Fahrzeug befindlichen elektrischen Energiespeichers ab. Die optimale Lösung und der Ausweg aus der Misere scheinen eine Kombination aus dem Besten zweier Welten zu sein; also ein Hybridfahrzeug: Es liefert sehr gute Fahrdynamik (elektrisches Beschleunigen und Bremsen) und durch die Kraftstoffbetankung des Fahrzuges in Kombination mit dem **Fuel-Converter** die heute üblichen Reichweiten von 700 bis 900 km je Tankfüllung.

Die am Markt verfügbaren Konzepte, wie Serienhybrid, Parallelhybrid, Power-Split Hybrid, etc., konnten das Versprechen bisher nicht einlösen, bei gleicher Fahrleistung den Verbrauch und die Emissionen in Kundenhand deutlich zu senken. Die Ursache liegt einerseits im erhöhten Fahrzeuggewicht, das durch die Hybridisierung hervorgerufen wird und andererseits im Betrieb der Vkm in einem großen Kennfeldbereich mit zum Teil miserablen Wirkungsgraden.

Hybridisierung wird erst dann sinnvoll, wenn die Vkm nur mehr als **Fuel-Converter** im optimierten Bestpunkt beim höchsten Wirkungsgrad betrieben wird.

Ein Element fehlt allerdings noch in der Kette des elektrischen Antriebsstranges und dieses Element ist ein elektrischer Energiespeicher – im Folgenden als "**Power-Tank**" bezeichnet –, der hohe elektrische Leistungen aufnehmen und abgeben kann, hunderttausende Lastspiele ohne wesentliche Alterung verkraftet und aus Gewichtsgründen nur so viel Energie speichert, wie für den dynamischen Betrieb des Fahrzeuges notwendig ist. Die mittlere elektrische Energie, die man zum Fahren mit Heizung und Klimaanlage benötigt, wird vom **Fuel-Converter** bereitgestellt und dieser benötigt zur Betankung flüssige Kraftstoffe, welche die von Vkm Fahrzeugen gewohnten Fahrstrecken und Betankungszeiten ermöglichen.

Die Generatorausgangsleistung des **Fuel-Converter** muss nur so groß sein, wie die verlangte <u>Dauer</u>höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges. Bei einem Mittelklassefahrzeug benötigt man gemäß **Abb. 1** bei 80 km/h am Rad ca. 8,1 kW, bei 100 km/h ca. 12,9 kW, bei 130 km/h ca. 23,6 kW, bei 150 km/h ca. 33,7 kW und bei 180 km/h ca. 54 kW. Welche Leistung tatsächlich gewählt wird, liegt am Kundenkreis und am Markt, den ein Fahrzeughersteller mit seinen Modellen adressieren will.

Die elektrische Leistung des **Power-Tanks** legt die Leistung, die Dynamik und die Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeuges fest, der elektrische Energieinhalt des **Power-Tanks** bestimmt, wie lange bzw. wie weit das Fahrzeug rein elektrisch fahren kann, bevor der **Fuel-Converter** automatisch in Betrieb genommen wird, um den **Power-Tank** nachzuladen.

Zur Klärung, welche elektrischen Speicher für das Anforderungsprofil des **Power-Tanks** geeignet sind, werden im Folgenden die Spezifikationen aus einem Lebensdauerzyklus erarbeitet.

Zum optionalen emissionsfreien Betrieb des Fahrzeuges, z.B. in Ballungsräumen, dient quasi als Ersatz des **Fuel-Converters** für eine Fahrstrecke von ca. 100 km eine <u>zusätzliche</u> Hochenergiebatterie, wie in Kapitel 3 "Batterien als Energiespeicher" ausgeführt.

9. Power-Tank Realisierungsvariante

Hohe Beschleunigung und hohe Rekuperationsleistung (Nutzbremsung) verlangen einen leistungsstarken elektrischen Antriebsstrang mit einem leistungsstarken **Power-Tank**. Ein Mittelklassefahrzeug mit einer Masse von 1.500 kg, das von Null auf 100 km/h in ca. neun

Sekunden beschleunigt, erfüllt diese Bedingung und benötigt dafür ca. 80 kW Antriebsleistung |⁸. Wenn vom Fahrzeug eine <u>Dauer</u>höchstgeschwindigkeit $v_{avg-max}$ von ca. 140 km/h erwartet wird, folgt aus **Abb. 1**, dass die mechanische Antriebsleistung P_{mech} des Fahrzeugs 30 kW und damit die elektrische DC-Ausgangsleistung P_{DC} des **Fuel-Converter** ca. 35 kW betragen muss. In diesem Betriebszustand ist das Hybridfahrzeug ein reiner Serienhybrid, dessen elektrischer Energiespeicher (**Power-Tank**) weder geladen noch entladen wird. Hierbei sind die folgenden Wirkungsgrade angenommen:

- **Fuel-Converter**: η_{Σ} = 54,87 % ... Elektrische DC Ausgangsleistung P_{el} des Generators bezogen auf den Heizwert H_{U} des Kraftstoffs; siehe **Kapitel 7**.
- **Power-Tank**: $\eta_{PT} = 92 \%$... Von der Fahrdynamik abhängige mittlerer Round-Trip Wirkungsgrad des elektrischen Energiespeichers; siehe **Tabelle 2**.
- **Elektrischer Antriebsstrang** <u>motorisch</u>: $\eta_{\Sigma} = 84,5 \%$... Mittelwert der DC-Eingangsleistung P_{DC} am Umrichter zu Antriebsleistung P_{mech} am Rad.
- **Elektrischer Antriebsstrang generatorisch** (Nutzbremsen): $\eta_{\Sigma} = 92 \%$... Mittelwert der DC-Eingangsleistung P_{DC} am Umrichter zu Antriebsleistung P_{mech} am Rad.

Der Kraftstoffverbrauch des hier präsentierten Serienhybrids beträgt bei konstant 140 km/h **5,13 Liter Benzin** oder **4,61 Liter Dieselkraftstoff** pro 100 km/⁹.

Im Alltagsbetrieb ist eine permanente Konstantfahrt mit 140 km/h nur in wenigen Ausnahmefällen möglich. Man benötigt zur Erfüllung der Fahraufgaben <u>zusätzlich</u> einen elektrischen Hochleistungs-Energiespeicher (**Power-Tank**), der die elektrische Energie für den dynamischen Fahrbetrieb bei beliebigen Geschwindigkeiten zur Verfügung stellt und der **Fuel-Converter** sorgt dafür, dass der **Power-Tank** von Zeit zu Zeit aufgeladen wird.

Zur Bestimmung der <u>Lebensdauer</u> eines **Power-Tanks** in Bezug auf Zyklenanzahl und Betriebszeit ist ein Testzyklus notwendig. Mit Hilfe des Testzyklus werden die Anzahl an Lade-/Entladezyklen und die Betriebsdauer ermittelt, die ohne wesentliche Einbuße der Leistungsfähigkeit des Speichers bereitgestellt werden müssen.

Unter Extrembedingungen darf die fehlerkritische Komponente "**Power-Tank**" nur mit einer für einen aktuellen mechanischen Antriebsstrang vergleichbaren Ausfallrate versagen, da im Fehlerfall die Antriebsleistung des Fahrzeuges ausfällt und daraus ein hohes Unfallrisiko erwachsen kann.

Ein Test zur Feststellung der Zyklenfestigkeit muss an die Belastungsgrenzen der Komponenten gehen, da auch Fahrzeugkunden möglicherweise diese Grenzen ausloten werden. Übliche Fahrzyklen, wie NEFZ und ARTEMIS [30] oder WLTP [31], sind für den hier benötigten Zweck ungeeignet, da sie zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauches und der CO₂ Emissionen von Fahrzeugen bei schonender Fahrweise gestaltet sind und nicht zum Ausloten der Grenzbelastung von Fahrzeugkomponenten.

Die Lebensdauer eines **Power-Tanks** leidet bei elektrochemischen Speichern am stärksten, wenn hohe und langanhaltende Lade- und Entladeströme die Verlustleistung und damit die Eigenerwärmung des Speichers maximieren. Hohe Lade- und Entladeströme entstehen, wenn

^{|&}lt;sup>8</sup> Sie Realisierungsvarianten in den Kapiteln 10.2.1 Batterien, 10.2.2 Kondensatoren und 10.2.3 Schwungrad.

^{|&}lt;sup>9</sup> Bei 140 km/h Fahrgeschwindigkeit und der dafür benötigten elektrischen Ausgangsleistung P_{el} des **Fuel-Converter**s von 35 kW (Wirkungsgrad η_{Σ} = 54,87 %) ist die benötigte Kraftstoffenergie H_U = 45,56 kWh pro 100 km = (35 kW/0,5487) *(100/140). Der Heizwert H_U von Benzin ist 8,89 kWh/Lit. und von Dieselkraftstoff 9,88 kWh/Lit. [40].

der Straßenverlauf stark wechselndes Gefälle aufweist und das Fahrzeug dynamisch mit oftmals wechselnder und hoher Geschwindigkeit betrieben wird. Ein Testzyklus, der diese Fahrweise abbildet, weist grundsätzlich eine hohe Durchschnittsgeschwindigkeit auf, woraus folgt, dass eine Fahrzeugbetriebsstunde im Testzyklus eine signifikant größere Fahrstrecke als die typischen 50 km bis 60 km aufweisen wird. Demnach wird die <u>kilometerbezogene</u> <u>Fahrzeuglebensdauer</u> T_k von z.B. 300.000 km in signifikant kürzerer Zeit erreicht werden, als die von einem Fahrzeug erwartete <u>Betriebslebensdauer</u> T_z von z.B. 5.000 Stunden.

Der zum Testen erarbeitete Zyklus belastet den **Power-Tank** so wie beschrieben und entnimmt dabei 75 % der Speicherkapazität (Depth Of Discharge, DOD) bevor durch Aufladen der zu Beginn des Zyklus herrschende Ladezustand (State Of Charge, SOC) wiederhergestellt wird. <u>Während der gesamten Testzeit benötigen elektrische Nebenaggregate eine elektrische Leistung von $P_{NA} = 2 \text{ kW}$. Der aus drei Schritten bestehende und im Folgenden genauer dargelegte Testzyklus, wird so lange wiederholt, bis die kilometerbezogene Fahrzeuglebensdauer T_k erreicht ist.</u>

1) Überholen:

- a) Beschleunigen des Fahrzeuges mit der Maximalleistung $P_{\rm M}$ von der Geschwindigkeit $v_1 = 100$ km/h auf die Geschwindigkeit $v_2 = 150$ km/h,
- b) Konstantfahrt mit v₂ = 150 km/h für 10 Sekunden,
- c) elektrisches Abbremsen mit der Maximalleistung $P_{\rm M}$ von der Geschwindigkeit $v_2 = 150$ km/h auf die Geschwindigkeit $v_1 = 100$ km/h,
- d) Konstantfahrt mit der Geschwindigkeit v_1 = 100 km/h für 10 Sekunden und
- e) Wiederholung des Überholvorganges 1a) bis 1d) bis der Ladezustand (DOD) des Power Tanks den minimal zugelassenen Wert erreicht hat (75% des **Power-Tank** Energieinhaltes sind entnommen).

2) Nachladen:

Starten des **Fuel-Converter** mit Hilfe des eingebauten Generators und Konstantfahrt mit der Geschwindigkeit v_1 bis der **Power-Tank** vollgeladen ist. Die Ladeleistung P_{chg} ergibt sich aus der Differenz der **Fuel-Converter** Leistung P_{FC} und der für die Fahrt mit der Geschwindigkeit v_1 aus **Abb. 1** entnommenen Leistung P_{v1} , vermehrt um die für den Betrieb der Nebenaggregate benötigten Leistung P_{NA} : $P_{chg} = P_{FC} - P_{v1} - P_{NA} \forall v | P_{v1} + P_{NA} < P_{FC}$.

3) Der Test beginnt wieder mit dem Zyklusschritt 1) und wird solange wiederholt bis die geforderte kilometerbezogene Lebensdauer T_k des **Power-Tanks** erreicht ist. Die Durchschnittsgeschwindigkeit v_{afg} des Tests ergibt sich aus der pro Testzyklus zurückgelegten Strecke und der dafür benötigten Zeit.

Die folgende **Tabelle 2** präsentiert neben der Anzahl *k* an Zyklen für die kilometerbezogene Lebensdauergrenze von 300.000 km zusätzlich wertvolle Informationen über das Lastkollektiv mit dem der **Power-Tank** betrieben wird.

Für den Testzyklus wird ein mit Lithiumtitanat-Batteriezellen von Toshiba (10 Ah S*CiB*[™]) [10] aufgebauter **Power-Tank** eingesetzt. Die Anzahl der Zellen und damit das Gewicht und die Kosten des **Power-Tanks** errechnen sich aus der maximal zulässigen Leistung, die vom Hersteller für die Zellen festgelegt ist (siehe **Kapitel 10.2.1**). Insgesamt kommen 167 Zellen mit einer Gesamtmasse von 85,2 kg zum Einsatz.

Tabelle 2Berechnung der Zyklenzahl eines Power-Tanks mit 4,09 kWh Energieinhalt und 80
kW Maximalleistung aus den Betriebsdaten eines verbrauchsoptimierten Hybrid-
fahrzeuges mit Fuel-Converter für 300.000 km Laufleistung.

Masse m = 1500 kg, Geschw. (km/h) v_1 = 100, v_2 =150, v_{max} = 194, $v_{avg-max}$ = 140, Leistung Neben-								
Energieinhalt W_{PT} = 4,09 kWh, W_{75} = 3,068 kWh. Lebensdauer: T_z = 5.000 h und T_k = 300.000 km								
	D	auer in Sek.	Dauer in Min.	Strecke in km	Ener	gie in kWh		
1a) 7mal Beschleunigen von $v_1 = 100$ km/h auf v_2	7 · 1 @	6,5 (12,0 % P _{PT} = 80 kW)	1,928	4,129		-2,564		
1b) 7mal v₂ = 150 km/h für 10 Sekunden	6·10 @	+6,1 ¹⁰ (6,9 % P _{PT} = 44,3 kW)	1,102	2,754		-0,813		
1c) 7mal Nutzbremsen mit <i>P</i> _M von <i>v</i> ₂ auf <i>v</i> ₁	7 · 6, @	7 (4,9 % P _{PT} = 80 kW)	0,783	1,652 +1		+1,052		
1d) 6mal v ₁ = 100 km/h für 10 Sekunden	6 · 1 @	0 (6,3 % P _{PT} = 19,1 kW)	1,000	1,667	-0,317			
Summen 1a) bis 1d)		288,8 Sek.	4,813 Min	10,202 km	-3, (+1,	694 kWh 052 kWh)		
2) Laden bei v ₁ mit 15,9 kW = 2,957 kWh	669, @	6 (69,9 % Ρ _{ΡΤ} = 15,9 kW)	11,160	18,600 -3,6 +4,0		-3,694 +4,009		
Zyklusdauer		958,4 Sek.	11,16 Min.	28,802 km	η	т = 92 %		
Mögliche zeitbez. Zykler	n: <i>z</i> =	18.781	Kilometerbez	ogene Zyklenzal	nl <i>k</i> =	10.416		
Gesamte Betriebszeit (h) <i>T</i> _k =	300.001						
Dur	108,	2 km/h						
Elektrischer Energieve	22,6	kWh						
Energieverbrauch Fuel	-Conv	erter (η _Σ = 54,87	′ %) pro 100 km : <i>I</i>	H _∪ = 41,19 kWh	4,63	Lit Benzin		
Heizwert: Benzin: H_{U} = 8,8	9 kWł	n/Liter; Dieselkra	aftstoff: <i>H</i> _U = 9,88	kWh/Liter [38]	4,17	Lit. Diesel		



Abb. 4: Elektrische Leistung *P*_{PT} und Ladezustand DOD des **Power-Tanks** in Testzyklus

Wenn man im für den Testzyklus verwendeten Fahrzeug einen elektrischen Energiespeicher mit gleicher **Power-Tank** Leistung P_{PT} = 80 kW einsetzt und den Energieinhalt des Speichers variiert, verhält sich die Zyklusdauer nahezu proportional und die Zyklusanzahl (= Lebensdauer

 $^{|^{10}}$ Beim siebten Zyklus dauerte die Konstantfahrt mit $v_2 = 150$ km/h statt 10 Sekunden nur mehr 6,1 Sekunden, da zu diesem Zeitpunkt der **Power-Tank** entladen war (75 % DOD erreicht).

des Power Tanks) nahezu umgekehrt proportional zum Energieinhalt. Für einen **Power-Tank** mit z.B. 2 kWh Energieinhalt würde der **Fuel-Converter** bereits nach drei Überholvorgängen anspringen und den **Power-Tank** in ca. 5 Minuten nachladen.



Abb. 5: Verlustleistung, Kühlleistung und Erwärmung des im Testzyklus verwendeten Batteriepacks, bestehend aus 167 Zellen der Lithiumtitanat-Batterie 10 Ah SCiB[™] der Firma Toshiba. Mit ca. 1300 W Kühlleistung kann im Testzyklus die Erwärmung der Batterie um ca. 16 °C begrenzt werden.

Tabelle 3 fasst die zur Auswahl geeigneter Speichertechnologien, die ermittelten *C*-Raten, Lastkollektive und Zyklenzahlen zusammen. Unter der *C*-Rate versteht man den Quotienten aus der Leistung P_{max} ([P_{max}] = W), die ein Speicher aufnimmt oder abgibt, im Verhältnis zur Energie W_{PT} ([W_{PT}] = Wh), die ein Speicher maximal speichern kann: $C = P_{max}/W_{PT}$.

Neben Kosten, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Raumbedarf und Gewicht liefert das Lastprofil für den **Power-Tank** (siehe **Tabelle 2 und Tabelle 3**) mit der Energie W_{PT} = 4,09 kWh wichtige Daten, um einen passenden elektrischen Energiespeicher auszusuchen.

Die minimal notwendige **Power-Tank** Energie *W*_{PT} lässt sich größenordnungsmäßig aus der für eine Speichertechnologie charakteristischen maximal zulässigen *C*-Rate abschätzen. Für das vorstehende Beispiel wird eine maximale *C* Rate von 20 angenommen.

 P_{max} = 80 kW \rightarrow C = 20 \rightarrow 4 kWh (davon werden 3 kWh genutzt).

Für eine kilometerbezogene Lebensdauer von 300.000 km benötigt man mit diesem Speicher ca. 10.000 Ladezyklen mit 75 % DOD. Diese durch den Testzyklus gefundenen Daten dienen dazu, im nächsten Kapitel geeignete Energiespeicher auszusuchen.

Tabelle 3Zusammenfassung der Lastkollektive und C- Raten eines Power-Tanks mit 4,09 kWhEnergieinhalt bei einem verbrauchsoptimierten Fahrzeug

Fahrzeug Betriebsart	Verbrauchsoptimiert B) W _{PT} = 4,09 kWh
Lade- Entladetiefe (DOD) eines Power-Tank Zyklus	75 % = 3,068 kWh
Zykluslänge und Zykluszeit	28,802 km; 11,16 Min.
Gesamte Betriebszeit	2.773 h
Anzahl k der Zyklen für 300.000 km Laufleistung	10.416
Zeitlicher Anteil der Maximalleistung <i>P</i> _{max} und <i>C</i> Rate im Zyklus (Nutzbremsen = aufladen)	≈20 C : 80 kW @ 4,9 %
Aufladen des Power-Tanks mit den Fuel-Converter	≈ 4 C : 15,9 kW @ 69,9 %
Zeitlicher Anteil der Maximalleistung <i>P</i> _{max} und <i>C</i> Rate im Zyklus (entladen)	≈20 C : 80 kW @ 12,0 %
Leistung P_{v2} bei der Geschwindigkeit $v_2 = 150$ km/h (entladen)	≈ 11 <i>C</i> : 44,3 kW @ 6,9 %
Leistung P_{v1} bei der Geschwindigkeit $v_1 = 100$ km/h (entladen)	≈5 C : 19,1 kW @ 6,3 %
	Insgesamt 100 %

10. Technologieauswahl für Power-Tanks

Grundsätzlich stehen zur Realisierung eines **Power-Tanks**, also eines Speichers für elektrische Energie mit wenig Energieinhalt, der mit hohen *C*-Raten betrieben wird und im vorstehenden Beispiel mit 4 kWh ca. 10.000 Vollladezyklen als Betriebslebensdauer haben muss, drei physikalische Prinzipien zur Verfügung.

10.1. Allgemeine Überlegungen zur Technologieauswahl

Die Speicherung der elektrischen Energie kann

- a) als Ladung (Elektronen) in einem Kondensator bei einer bestimmten Klemmenspannung oder
- b) als reversible elektrochemische Reaktion wie beispielsweise bei Blei-Schwefelsäure, Nickel-Cadmium und Nickel-Metallhydrid Batterien oder durch reversible Interkalation von Ionen im Elektrodenmaterial wie beispielsweise bei Lithium-Ionen Batterien, erfolgen.
- c) Das dritte Prinzip ist die Speicherung der Energie in einer schnell rotierenden Masse, die mit einer elektrischen Maschine verbunden ist, beim Laden die elektrische Energie in Rotationsenergie umwandelt und beim Entladen die Rotationsenergie über dieselbe elektrische Maschine wieder in elektrische Energie rückwandelt.

Um die am besten geeignete Technologie für die mobile **Power-Tank** Anwendung zu finden, müssen die Vor- und Nachteile der drei Speicherprinzipien gegeneinander abgewogen werden. Ein Optimum zwischen maximaler gravimetrischer und volumetrischer Energie- und Leistungsdichte, minimaler Verlustleistung im Speicher und kleinstmöglichen Kosten ist zu finden. Ein "Ragone-Diagramm" (siehe **Abb. 6**), das in einem doppelt logarithmischen Maßstab die Energiedichte bezogen auf die Leistungsdichte darstellt, kann dazu unter Beachtung gewisser Randbedingungen herangezogen werden. Die folgende **Abb. 6** basiert auf den Datenblättern der Firmen: A123, Skeleton Technologies, Yunasko, Saft, Altair Nano, Panasonic, Sanyo, Kokam, Varta, Wima, Epcos, Nesscap, Maxwell, Compact Dynamics, Williams Hybrid Power und CCM.

Das Verhältnis von Energie zu Leistung ist die Zeit, um den Speicher vollständig aufzuladen respektive zu entladen. Typischerweise ist dies in diagonalen Isochronen dargestellt. Jedoch enthält das in der Literatur typisch verwendete <u>Ragone-Diagramm keine Informationen über</u> <u>den Wirkungsgrad eines Speichers</u> und damit, ob der Speicher die thermische Belastung einer vollständigen Ladung oder Entladung ohne Schaden in der durch die Isochrone angegebenen Zeit aushält.

Hersteller neigen dazu, ihr Produkt möglichst attraktiv darzustellen und geben daher manchmal in den Spezifikationen des Speichers die Maximalwerte der Leistungsdichte und der Energiedichte an. Bei der <u>Energiedichte</u>bestimmung wird der Speicher mit geringer Last entladen, da dann der entnehmbare Energieinhalt maximiert ist und die im Speicher anfallende Verlustleistung und damit die Erwärmung des Speichers vernachlässigt werden kann. Bei der <u>Leistungsdichte</u>bestimmung gehen manche Hersteller sogar bis an die "Leistungsanpassung" der Last an die Quelle, bei der grundsätzlich die maximal mögliche Leistung aus der Quelle (dem **Power-Tank**) entnommen wird. Allerdings entsteht bei dieser Betriebsart im Speicher gleich viel Verlustleistung wie Nutzleistung in der Last verbraucht wird. Naturgemäß können nur wenige Prozent Energie (DOD sehr klein) aus dem Speicher entnommen werden, da sonst die Eigenerwärmung zur sofortigen Zerstörung des Speichers führen würde. Da das Ragone-Diagramm für die Energiebestimmung keine Angaben zur *C*-Rate und für die Leistungsmessung zum DOD macht, können die in Ragone-Diagrammen eingetragenen Werte irreführend sein, außer es wird vom Autor zusätzlich die Messmethode für die Energie- und Leistungsmessung des jeweiligen Speichers offengelegt.



Abb. 6: Gravimetrisches Ragone-Diagramm bei 90 % Wirkungsgrad der Speicher (basierend auf [35]); blau: Lithium-Ionen, grün: Nickel-Metallhydrid und orange: Supercapacitor Zellen und Module; lila: Schwungradspeicher

Um in **Abb. 6** einen korrekten Vergleich zu ermöglichen, sind alle Daten der Speicher bei einer Effizienz von 90 % eingetragen. Damit ist die Verlustleistung jedes Speichers so gering (10 %), dass der Speicher bei geeigneter Kühlung mit der angegebenen Leistungsdichte vollständig geoder entladen werden kann.

Schwungräder und kommerziell erhältliche Module sind in **Abb. 6** als Dreiecke markiert, die Leistungswerte einzelner Zellen sind als Kreise dargestellt. Werte von Einzelzellen sind theoretische Werte, da zum Aufbau des kompletten **Power-Tanks** zusätzlich zu den Einzelzellen auch Zellverbinder, Kühlkanäle, Gehäuse und Überwachungselektronik für die Zellbalancierung und das Batteriemanagementsystem erforderlich sind.

10.2. Speicherauswahl unter Berücksichtigung der Lastkollektive aus Fahrzyklen

Das Konzept eines verbrauchsoptimierten Hybridfahrzeuges mit einem leistungsfähigen **Power-Tank**, löst den für Vkm-Fahrzeuge unlösbaren Zielkonflikt, sehr gute Verbrauchs- und Emissionswerte und GLEICHZEITIG agile, sportliche Fahrleistungen zu bieten. Die drei vom Fahrzeughersteller festzulegenden Randbedingungen sind:

- Größte, permanent fahrbare Durchschnittsgeschwindigkeit: sie wird durch die Leistung P_{FC} des Fuel-Converter (siehe Kapitel 7) bestimmt.
- Höchstgeschwindigkeit und/oder maximale Beschleunigung: sie wird durch die Maximalleistung P_{max} des **Power-Tanks** und die Anzahl der zulässigen Lade-/Entladezyklen festgelegt (siehe Kapitel 9 und Tabelle 2).
- 3) Zeit, die das Fahrzeug mit der Höchstgeschwindigkeit fahren kann: sie wird durch den nutzbaren Energieinhalt *W*₇₅ des **Power-Tanks** (siehe **Kapitel 9** und **Tabelle 2**) definiert.

10.2.1. Realisierung eines Power-Tanks mit Batterien

Bis auf eine Ausnahme sind die hohe C-Raten Anforderung an einen Power-Tank in Kombination mit einer hohen (> 10.000 bei 75 % DOD) Zyklenzahl mit keiner heute erhältlichen Batterietechnologie erzielbar. Die Ausnahme sind möglicherweise Lithium-Titanat Batterien. Diese sind eine Ausführung einer Lithium-Ionen Batterie, bei der die negative Graphit Elektrode (Anode) durch eine gesinterte Elektrode aus Lithiumtitanspinell (Li₄Ti₅O₁₂) ersetzt ist. Da das Titanat nicht mit Oxiden aus der negativen Elektrode (Kathode) reagieren kann, wird bei dieser Bauform selbst bei mechanischen Schäden das thermische Durchgehen (thermal runaway) des Akkumulators verhindert. Diese Batterie kann in einem Temperaturbereich von -40 °C bis +55 °C betrieben werden. Nachteilig ist die zum Vergleich zu Lithium-Ionen Batterien mit Graphit Anode geringere Leerlaufspannung von ca. 2,4 V, die zu einer geringeren Energiedichte von 30 Wh/kg bis 110 Wh/kg führt [10] und [36]. Ein weiterer Nachteil ist der hohe Herstellungspreis (Stand 2016), der eine breite Markteinführung erschwert [36]. Die C-Raten für Dauerladen und -entladen (mehrere Minuten), insbesondere Aufladen bei niederen Temperaturen (bei -20 °C sind nur 1 C Lade-/Entladerate zugelassen) und Zyklenzahl bei C-Raten von 20 C und darüber werden vom Hersteller nicht veröffentlicht und dürften noch Verbesserungspotenzial haben.

Die Eigenschaften der Lithiumtitanat-Batteriezelle von Toshiba (10 Ah SC*iB*TM) oder der Kokam (SLPB130255255N_X60) eignen sich möglicherweise für den Power Tank. Maximal 20 *C* sind für 80 % DOD Laden / Entladen innerhalb von 3 Minuten zugelassen. Das entspricht einer Lade- / Entladeleistung $P_{c/d}$ = 2,4 V·200 A = 480 W. Dabei entsteht in jeder Zelle eine Verlustleistung P_{VC} von ca. 30 W (siehe **Abb. 5**).

	Туре	C-Rate Laden Dauer	C-Rate Laden Puls 10s	C-Rate Entladen Dauer	C-Rate Entladen Puls 10s	Kapazität Ah	Span- nung V	Energie Wh/kg	Verluste	Zyklen Zahl
Toshiba [10] LTO	<i>SCiB</i> 10 Ah	20	62,5	20	75	10	2,4	47	Siehe Abb. 5	20.000@ 5 <i>C</i>
Kokam [7] NMC	SLPB98188 216 P	4		20	30	30	3,7	128	1 mΩ	4.000 @ 4C
Kokam [7] LTO	SLPB13025 5255N_X60	4	8	6	10	60	2,4	76	0,40 mΩ	20.000 @ 1C

Tabelle 4 Spezifikationen von Ultra High Power Lithium Polymer (NMC) und Lithium-Titan-
Oxyd (LTO) Batterien.

Das verbrauchsoptimierte Fahrzeug hat laut **Tabelle 3** einen **Power-Tank** Energieinhalt von $\underline{W}_{PT} = 4,09 \text{ kWh}$ und eine Maximalleistung von $\underline{P}_{max} = 80 \text{ kW}$. Die gewünschte **Power-Tank** Energie lässt sich unter Einhaltung der maximal spezifizierten 20 *C* Dauerlade- / entladerate mit 167 Batteriezellen à 24 Wh der SCiB 10 Ah Zelle von Toshiba [10] erzielen (20 *C* = 200 A \rightarrow 200 A \cdot 2,4 V = $P_{c/d}$ = 480 W pro Zelle $\rightarrow B_P = P_{PT} / P_{c/d} = 80.000/480 = 167$). Die Batteriekühlung muss bei 20 *C* Dauerlade- / entladerate sicherstellen, dass auch bei 5 kW Verlustleistung im Batteriepack (30 W pro Zelle, siehe **Abb. 5**) in keiner der 167 Zellen die Temperatur über die zulässige Maximaltemperatur von 55 °C ansteigt. Diese Bedingung stellt hohe Anforderungen an das Batteriekühlsystem des Fahrzeuges.

Zur Erfüllung des Testzyklus (siehe **Tabelle 2**) aus **Kapitel [10]** hätte auch ein **Power-Tank** mit dem halben Energieinhalt <u> $W_{PT} = 2,02 \text{ kWh}$ </u> ausgereicht, also mit nur 84 Batteriezellen des gleichen Typs à 24 Wh (84 · 24 Wh = 2,02 kWh). Allerdings wäre die maximal zulässige Leistung der eingesetzten Zellen mit 952 W pro Zelle (ca. 40 *C* Lade- /-Entladerate) weit überschritten worden, womit diese Lösung verworfen werden musste.

Die größere 4,09 kWh Batterie führt durch das Mehrgewicht zu mehr Verbrauch und bewirkt, dass sich der **Fuel-Converter** nur etwa halb so oft einschalten wird als bei einem 2 kWh Pack.

Lebensdauer der Batteriezellen

Der **Power-Tank** muss laut Testzyklus etwa 10.000 Volladezyklen mit Spitzenleistungen gemäß **Tabelle 3**, die in 23,8 % der Zeit über den *C*-Raten liegt, die der Batteriehersteller für die Lebensdauerbestimmung festgelegt hat (5 *C*). Der Hersteller garantiert für den gewählten Zelltyp Toshiba 10 Ah *SCiB*TM bei 5 *C* Lade-/Entladeströmen und 35 °C Umgebungstemperatur nach 20.000 Zyklen eine maximale Abnahme der Kapazität um 10 % [10]. Wie stark die Batterie beim Einsatz als **Power-Tank** zufolge der wesentlich größeren *C*-Raten altert, lässt sich nicht aus den öffentlich verfügbaren Herstellerangaben ermitteln und müsste über Experimente herausgefunden werden.

Für Lithium-Batterien mit <u>Graphit Anode</u>, die nur mit wesentlich kleineren *C*-Raten belastet werden dürfen, könnte man den Batteriespeicher soweit vergrößern, bis die *C*-Raten auf ca. 3 *C* bis 5 *C* reduziert sind. Beim **Power-Tank** des betrachteten Fahrzeugs würde dies eine Batterie mit vierfacher Kapazität, also $W_{PT} = 16$ kWh, bedeuten. Fraglich bleibt, ob die vergrößerte Batterie einigen Tausend Lade- / Entladezyklen mit 75 % DOD erfüllen kann. Das Gewicht, die Kosten und nicht zuletzt der Sicherheitsaspekt der vergrößerten Batterie sind ein signifikantes Manko für die Realisierung des **Power-Tanks** mit Hilfe von Lithium-Ionen Batterien mit Graphit Anode.

10.2.2. Realisierung eines Power-Tanks mit Kondensatoren

Aus **Abb. 6** erkennt man, dass eine Supercapacitor Zelle mit ca. 25 Wh/kg im Ragone-Diagramm eingetragen ist. Diese Prototypzelle erreicht die hohe Energiedichte durch die Integration einer Art Lithium-Ionen Batterietechnologie in die Zelle. Damit sinkt allerdings die hohe Zyklenfestigkeit von "standard" Supercapacitor Zellen auf deutlich unter die geforderten 10.000 Lade-Entladezyklen. Alle anderen in **Abb. 6** eingetragenen Zellen haben Energiedichten unter 10 Wh/kg, die sich beim Zusammenbau eines Moduls aus Einzelzellen auf ca. 4 Wh/kg reduzieren, da – wie bereits ausgeführt – zusätzliche Komponenten wie Zellverbinder, Gehäuse und viel Elektronik für die Zellbalancierung erforderlich sind. Den Mehraufwand erkennt man, wenn man Einzelzellen mit handelsüblichen Supercapacitor Modulen vergleicht, die nur ca. 2 Wh/kg bieten.

Ein genereller Nachteil von Supercapacitors ist, dass sich die Klemmenspannung des **Power-Tanks** beim Entladen verringert, da der Energieinhalt eines Kondensators quadratisch mit der Kondensatorspannung abnimmt. Wenn man 75 % der gespeicherten Energie entnehmen will, halbiert sich die Klemmenspannung des **Power-Tank**. Damit verdoppelt sich bei festgehaltener Leistung der Strom aus dem Speicher, wodurch sich die Ohm'schen Verluste vervierfachen. Die Realisierung eines **Power-Tanks** mit Supercapacitors ist aber grundsätzlich möglich, da die Zyklenfestigkeit und die Leistungsdichte der Zellen für den Anwendungsfall ausreichend sind. Die Kühlung eines mit Supercapacitors realisierten **Power-Tanks** sollte kein unüberwindbares Problem darstellen, da der Einsatztemperaturbereich der Zellen typisch von -40 bis +70 °C spezifiziert ist. Basierend auf einer optimistisch angenommenen Energiedichte von 5 Wh/kg wäre das Gewicht eines 4 kWh **Power-Tanks** für das verbrauchsoptimierte Fahrzeug <u>800 kg</u> und damit kaum praxistauglich.

10.2.3. Realisierung eines Power-Tanks mit einem Schwungrad

Abb. 6 zeigt, dass Schwungräder eine vergleichbare gravimetrische Leistungsdichte wie Supercapacitor Zellen haben. Wenn man aber den oben angenommenen Faktor 2 zwischen Zellebene und Modulebene in Betracht zieht, haben Schwungräder einen klaren Vorteil. Im Vergleich zu Batterien zeigen Schwungräder etwa die Hälfte der gravimetrischen Energiedichte von NiMH-Modulen, etwa ein Zehntel der spezifischen Energie von Lithium-basierten Zellen und etwa 20 bis 30 % der Energie von Lithium-Titanat Batterien.

Darüber hinaus bieten Schwungräder eine Reihe von Vorteilen, wie einen großen Bereich der Betriebstemperatur, eine hohe Zyklenfestigkeit, Tiefentladung und daher eine längere Lebensdauer als Supercapacitors oder Batterien sowie eine Recyclingfähigkeit von bis zu 100 Prozent. Dies spielt eine wichtige Rolle in der Lebenszyklusbewertung eines Speichersystems.

Die gravimetrische <u>Leistungsdichte</u> eines Schwungrades beträgt laut **Abb. 6** ca. 2 kW/kg und laut [37] 2,2 kW/kg und die gravimetrische Energiedichte ca. 20 Wh/kg. Das bedeutet für das verbrauchsoptimierte Fahrzeug mit einer Maximalleistung P_{max} = 80 kW des **Power-Tanks** ein Gewicht des Schwungradspeichers von <u>40 kg</u> (2 kW/kg · 40 kg = 80 kW). Wenn man das Gewicht des Schwungradspeichers aus der gravimetrischen <u>Energiedichte</u> von 20 Wh/kg (siehe **Abb. 6**) bestimmt, resultiert ein Gewicht von <u>200 kg</u> (20 kWh/kg · 200 kg = 4 kWh). Da sich der Testzyklus aus **Tabelle 2** bei etwa einer Verdopplung der Zyklenzahl auch mit 2 kWh Energieinhalt darstellen lässt, käme auch ein Schwungradspeicher mit etwa 100 kg Gewicht in Frage. Die Maximalleistung P_{max} = 80 kW des **Power-Tanks** und damit auch die Kühlung des Schwungradspeichers sind bei diesem Energieinhalt gut zu bewerkstelligen.

11. Simulation des elektrischen Antriebstranges im Artemis-Zyklus

Kapitel 9 hat bereits die Leistungsfähigkeit und den geringen Kraftstoffverbrauch eines Hybridfahrzeuges mit **Fuel-Converter** und **Power-Tank** in einem speziellen Hochleistungs-Testzyklus gezeigt. Im Folgenden werden der Kraftstoffverbrauch und die **Power-Tank** Belastung dieses Hybridfahrzeuges anhand eines standardisierten Verbrauchszyklus ermittelt, mit einem konventionellen Vkm Fahrzeug mit ähnlicher Leistung, Gewicht und Luftwiderstand und mit einem um 400 kg schwereren BEV mit ähnlicher Leistung und Luftwiderstand verglichen.

Als Basis der Simulation dient:

- das in **Kapitel 5** vorgestellte Mittelklassefahrzeuge (Mercedes Benz E 200, Rollwiderstandsbeiwert μ = 0,013 und Luftwiderstand $c_W \cdot A$ = 0,60),
- der in **Kapitel 10.2.1** erarbeite **Power-Tank** mit einer Lithium-Titanat Batterie mit einem Energieinhalt W_{PT} = 4,09 kWh, einer Maximalleistung P_{max} = 80 kW und einem aus dem jeweiligen Zyklus bestimmten Round-trip Wirkungsgrad η_{PT} des Batteriepacks und
- ein im Fahrzeug verwendeter elektrischer Antriebsstrang, der aus einem Umrichter mit einer elektrischen Antriebsmaschine mit mechanischer Kopplung zu den Antriebsrädern besteht. Die Simulation berücksichtigt den lastabhängigen Wirkungsgrad des Antriebstranges gemäß dem Wirkungsgradkennfeld aus **Abb. 7**.
- Der **Fuel-Converter** aus **Kapitel 7** sorgt mit einer elektrischen Leistung von P_{PT} = 35 kW, dass der Ladezustand des **Power-Tank** zwischen 12,5 % und 87,5 % (75 % DOD) liegt. Er konvertiert die Kraftstoffenergie von Benzin oder Dieselkraftstoff, repräsentiert durch den Heizwert H_U , mit dem Konversionswirkungsgrad η_{Σ} = 54,87 % zu elektrischer Energie (siehe die einfachere Variante 1 aus **Abb. 3**)



 Abb. 7: Wirkungsgradkennfeld des elektrischen Antriebs (Umrichter + elektrische Maschine + Ankopplung zu den Antriebsrädern) im Artemis Zyklus. Die schwarze Linie ist der Bereich der Nennleistung (40 kW mechanische Leistung), das Kennfeld ist auf zweifache Überlast begrenzt (80 kW). Die Grenzen der eingefärbten Flächen sind: 50; 70; 80; 85; 87,5; 90 und 92,5 % Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs. Zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauches wird das Fahrzeug in einem Artemis-Zyklus (**Abb. 8**, Common Artemis Driving Cycle (CADC) [30]), der aus einem Stadt-, Überland- und Autobahnzyklus besteht, betrieben. Während der gesamten Testdauer versorgt der **Power-Tank** zusätzlich Nebenaggregate mit 2 kW elektrischer Leistung (Klimaanlage, Heizung, Licht, etc.).



Abb. 8: Geschwindigkeitsverlauf des Common Artemis Driving Cycles, CADC, aus [30].

11.1. Der Artemis Stadtzyklus

Der Artemis "Urban-Cycle" hat eine Streckenlänge von 4,9 km und benötigt 16,6 Minuten Fahrzeit, in der zusätzlich Nebenaggregate mit einer Leistung von 2 kW versorgt werden müssen. Die Durchschnittsgeschwindigkeit des in **Abb. 8** ersichtlichen Geschwindigkeitsprofils beträgt 17,7 km/h. In diesem Fahrzyklus ist der mittlere Wirkungsgrad des elektrischen Antriebstranges motorisch wie generatorisch 84 % und der Round-Trip Wirkungsgrad des **Power-Tanks** beträgt 96,8 %. Die **Abb. 9** und **Abb. 10** zeigen Simulationsergebnisse.



Abb. 9: Antriebsleistung in einem Urban-Cycle (links) und während 25 Stunden Fahrzeit.



Abb. 10: Erwärmung (links) und Kühlleistung einer Batteriezelle während 25 Stunden Fahrzeit im Urban-Cycle.

Der **Power-Tank** versorgt den elektrischen Antriebsstrang und die Nebenaggregate mit elektrischer Energie. Zur Absolvierung des Artemis Urban-Cycle werden **10,8 kWh/100 km** und zur Versorgung der Nebenaggregate weitere **11,3 kWh/100 km** Energie benötigt; insgesamt **22,1 kWh/100 km**. Der **Fuel-Converter** konvertiert die Kraftstoffenergie mit einem Wirkungsgrad $\eta_{\Sigma} = 54,87$ % in elektrische Energie und benötigt für die Versorgung des Antriebstrangs **2,01 l/100 km Dieselkraftstoff** und für die Nebenaggregate zusätzlich **2,11 l/100 km Dieselkraftstoff**, insgesamt **4,12 l/100 km Dieselkraftstoff**.

11.2. Der Artemis Überlandzyklus

Das Geschwindigkeitsprofil des Road-Cycle ist in **Abb. 8** ersichtlichen. Die **Abb. 11** zeigt Simulationsergebnisse der Lade- und Entladeleistungen des Power-Tanks und die **Abb. 12** die Erwärmung und die benötigte Kühlleistung einer Batteriezelle des Power-Tanks im Road-Cycle. Alle weiteren ermittelten Daten aus den drei Artemis Zyklen zum Antriebstrang, zum Fuel-Converter und zum Power-Tank sind in **Tabelle 5** nach dem in **Kapitel 11.3** vorgestellten Autobahnzyklus zusammengefasst.







11.3. Der Artemis Autobahnzyklus

Das Geschwindigkeitsprofil des Motorway-Cycle ist in **Abb. 8** ersichtlichen. Die **Abb. 13** zeigt Simulationsergebnisse der Lade- und Entladeleistungen des Power-Tanks und die **Abb. 14** die Erwärmung und die benötigte Kühlleistung einer Batteriezelle des Power-Tanks im Motorway-Cycle. Alle weiteren ermittelten Daten aus den drei Artemis Zyklen zum Antriebsstrang, zum Fuel-Converter und zum Power-Tank sind in **Tabelle 5** nach dem in **Kapitel 11.3** vorgestellten Autobahnzyklus zusammengefasst.



Abb. 13: Antriebsleistung in einem Motorway-Cycle (links) und während 25 Stunden Fahrzeit.



Abb. 14: Erwärmung (links) und Kühlleistung einer Batteriezelle während 25 Stunden Fahrzeit im Motorway-Cycle.

Tabelle 5Zusammenfassung der ermittelten Daten im Common Artemis Driving Cycle
gemäß Abb. 8

Artemis	Strecken-	Dauer	Durchschnitts- geschwindigkeit	Wirkun Antrieb	gsgrad des sstranges:	Round-Trip Wirkungsgrad des Power-Tanks	
Zykius	lange	in iviin.	aus Abb. 8	motorisch	generatorisch		
Urban	4,9 km	16,6	17,7 km/h	84 %	84 %	96,6 %	
Road	17,3 km	18,0	57,4 km/h	84,5 %	80 %	96,1 %	
Motorway	28,7 km	17,8	96,8 km/h	84,1 %	81 %	94,9 %	

25

Artemis	Der Powe liefert elekt	r -Tank (80 % DOD = rische Energie in kWh	3,27 kWh) n/100 km zu	Fuel-Con Dieselkra							
Zyklus	Antriebs- strang	Nebenaggre- gate mit 2 kW	Insgesamt	Antriebs- strang	Nebenaggre- gate mit 2 kW	Insgesamt					
Urban	10,8	11,3	22,1	2,01	2,22	4,12	14,8	200			
Road	13,4	3,5	16,9	2,5	0,65	3,15	19,3	334			
Motorway 20,3 2,1 22,4				3,78	0,39	4,17	14,6	618			
Rein elektrische Betriebsstrecke im jeweiligen Zyklus bei 80 % DOD des Power-Tanks in km: 1											
	Mittlere Kühlleistung des Batterie-Packs (167 Zellen Toshiba SCiB 10 Ah, siehe Tabelle 4) in W: 1										

Zum Abschluss dieses Kapitels sind in **Tabelle 6** der Kraftstoffverbrauch und die CO₂ Emissionen im Artemis CADC Fahrzyklus des präsentierten Hybridfahrzeuges (siehe **Abb. 1**) mit einem konventionellen Pkw mit Vkm [39] und mit einem reinen batterieelektrischen Fahrzeug (BEV) verglichen. Das BEV ist baugleich mit dem Hybridfahrzeug und verwendet an Stelle des **Fuel-Converter** und des **Power-Tanks** (- 200 kg) eine Hochenergiebatterie mit 600 kg Batteriepackmasse (1042 Kokam High Energy NMC Zellen: Type SLPB080085270, 27 Ah, 260 Wh/kg [7]). Damit steigt die Fahrzeugmasse des Hybridfahrzeuges von 1.500 kg auf 1.900 kg. Die CO₂ Emissionen der verglichenen Kraftstoffe sind auf Well-to-Wheel Basis angegeben. Beim Hybridfahrzeug sind sowohl die CO₂ Emissionen bei reiner Kraftstoffbetankung angeführt als auch bei Betrieb des um 400 kg schwereren BEV, bei dem die elektrische Energie aus dem Netz mit vier verschiedenen Netzwirkungsgraden nachgeladen wird. Der Vergleich in **Tabelle 6** zeigt, dass beim BEV zufolge der um 400 kg vergrößerten Batterie der Energieverbrauch gegenüber der Hybridlösung betriebsabhängig um ca. 6 % bis 14 % zunimmt.

Tabelle 6 zeigt, dass gegenüber einem Hybridfahrzeug mit **Fuel-Converter** ein konventionelles Fahrzeug mit Dieselmotor den **Verbrauch** und damit die CO₂ Emissionen des Verkehrs signifikant erhöht (24 bis 80 %):

- Im Artemis "Urban Cycle" verbraucht das dieselbetriebene Referenzfahrzeug um 80 %,
- im "Road-Cycle" um 37 % und
- im "Motorway-Cycle" um 24 % mehr Kraftstoff als das Hybridfahrzeug.

Die **CO₂ Emissionen** des konventionellen Fahrzeuges mit Dieselmotor erhöhen sich gegenüber dem Hybridfahrzeug um die gleichen Prozentsätze, da beide Fahrzeuge den gleichen Kraftstoff verwenden. Die Abgasnachbehandlung im Hybridfahrzeug gestaltet sich gegenüber dem Referenzfahrzeug einfacher, da der **Fuel-Converter** immer bei fixer Last und Drehzahl betrieben wird. Tabelle 6 Vergleich von Kraftstoffverbrauch und CO₂ Emissionen eines konventionellen Fahrzeuges mit Vkm (Renault Megane), eines Hybridfahrzeuges mit Power-Tank und Fuel-Converter und des als reines BEV betriebenen Hybridfahrzeuges mit 400 kg Mehrgewicht im Artemis Fahrzyklus.

Hybridfahrzeug: Rollwiderstandsbeiwert μ = 0,013; Luftwiderstand c_WA = 0,60; Masse = 1.500 kg, als BEV 1900 kg, Elektrischer Antriebsstrang mit **Power-Tank** (80 kW) und **Fuel-Converter** (35 kW, η_{Σ} = 54,87%).

Referenzfahrzeug: Renault Megane Baujahr 2016; Rollwiderstandsbeiwert μ = 0,01025; Luftwiderstand $c_w A$ = 0,66; Masse = 1.458 kg; Dieselmotor mit 81 kW.

Fahrzeug Elektrohybrid (1.500 kg) mit Power-Tank & Fuel-Converter oder BEV (1.900 kg)									Referenzfahrzeug		
type	Elektris	Elektrische Energie & resultierende CO ₂ Emission bei Nachladen mit Fuel-									
	Converter	Converter oder BEV mit Netzstrom aus verschiedenen Quellen nachladen *)									
	Energie- bedarf **)	Energie- bedarf **)2018: A- Strom-Mix2016: D- Strom-MixEU-Strom- 								Renault Megane mit Diesel ***)	
Artemis Cycle	kWh pro 100 km	g CO ₂ -eq pro km	g CO2-eq pro km	g CO ₂ -eq pro km	g CO₂-eq pro km	g CO₂-eq pro km	g CO₂-eq pro km	l pro 100 km	g CO₂-eq pro km	l pro 100 km	g CO₂-eq pro km
Urban mit 2 kW	22,1 (<mark>23,6</mark>)	70	155	110	123	263	314	4,12	124	7,413	220
Urban	10,8 (12,3)	37	81	57	64	137	163	2,01	60		
Road mit 2 kW	16,9 (18,4)	55	121	86	96	205	245	3,15	95	4,327	128
Road	13,4 (14,9)	44	98	70	78	166	198	2,5	75		
Motorway + 2 kW	22,4 (23,8)	71	157	111	124	265	316	4,17	125	5,516	164
Motorway	20,3 (21,7)	64	143	101	113	242	288	3,78	114		

*) Spezifische äquivalente CO₂ Emissionen in g CO₂-eq/kWh vermehrt um die Verluste vom Generator zum Haushalt (13,95 % [41]) und um Verluste im Ladegerät (5 %, bei Schnellladung signifikant schlechter) → xx CO₂-eq/kWh des Kraftwerks * 1,1395 * 1,05 = xx g CO₂-eq/kWh * **1.1965**

- des österreichischen Verbundnetzes inkl. Importe 2018 [47]: 248 g CO₂-eq/kWh * 1.1965 = 297 g CO₂-eq/kWh (nur A 209 g)

- des deutschen Verbundnetzes 2016, Mittelwert [45], [46] & [48]: 550 g CO₂-eq/kWh * 1.1965 = 658 g CO₂-eq/kWh

- des **europäischen Verbundnetzes 2013-2017**, Mittelwert [40], [42], [48] & [49]: 390 g CO₂-eq/kWh * 1.1965 = **467 g** CO₂-eq/kWh (Vorschau auf 2020 mit ca. 26 % Kernenergie und 30 % Wind-, Wasser-, Solar-, Geo- und Abfallenergie; der Rest (44 %) sind Gas-, Stein- und Braunkohlekraftwerke [40]).

- eines mit Erdgas (Methan) betrieb. Kraftwerkes, Mittelwert [43], [46] & [49]: 436 g CO₂-eq/kWh * 1,1965 = 522 g CO₂-eq/kWh

- eines mit Steinkohle betriebenen Kraftwerkes, Mittelwert [43], [46] & [49]: 932 g CO₂-eq/kWh * 1,1965 = 1115 g CO₂-eq/kWh

- eines mit Braunkohle betriebenen Kraftwerkes, Mittelwert [43], [46] & [49]: 1111 g CO₂-eq/kWh * 1,1965 = 1329 g CO₂-eq/kWh

**) Energiebedarf des BEV (Mehrgewicht 400 kg) sind in Spalte 2 in Klammern () und rot eingetragen.

***) g CO₂-eq/kWh Emissionen Well-to-Wheel von Kraftstoffen [38], [47] & [49]: Benzin: **314** g CO₂-eq/kWh; Diesel: **307** g CO₂-eq/kWh Heizwert Dieselkraftstoff: H₀ = 9,78 kWh/Liter; **Fuel-Converter** Wirkungsgrad η_Σ = 54,87 %

In **Tabelle 7** sind die von einem dieselbetriebenen Hybridfahrzeug verursachten CO₂ Emissionen in einer Well-to-Wheel Betrachtung mit jenen aus einem Kraftwerk, das die elektrische Energie zum Nachladen des BEV über das Netz bereitstellt, verglichen. Wie **Tabelle 7** zeigt, hängen die CO₂ Emissionen eines Kraftwerkes stark von der eingesetzten Primärenergie ab.

Wenn sich die Elektromobilität rascher entwickelt und damit der Bedarf an elektrischer Energie rascher zunimmt als der Ausbau des Stromnetzes mit CO₂ neutraler Primärenergie, müssen für die <u>zusätzliche</u> elektrische Energie zur Ladung von BEV kalorische Kraftwerke einspringen. Der Großteil des Ausbaues an Wasser- und Solarkraftwerken ist bereits erfolgt und die bis 2030 weiter ausgebaute Windenergie wird vorwiegend die fehlende Energie der abgeschalteten Kernkraftwerke kompensieren müssen [40] und [44].

Tabelle 7 Vergleich der CO2 Emissionen zum Laden eines BEV gegenüber einem diesel-
betriebenen Hybridfahrzeug mit Fuel-Converter.

Österreichisches Verbundnetz inkl. Importe 2018	um 38 bis 44 % weniger CO ₂
Europäisches Verbundnetz, Mittelwert 2013-2017	um 5 bis 11 % weniger CO ₂
Erdgas (fossiles Methan)	vergleichbar: -1 bis + 4 %
Globaler Energiemix (518 g CO ₂ /kWh) [22]	um 23 bis 29 % mehr CO ₂
Deutsches Verbundnetz 2016	um 25 bis 31 % mehr CO ₂
Steinkohle	um 112 bis 128 % mehr CO ₂
Braunkohle	um 152 bis 172 % mehr CO ₂

Für Österreich bedeutet dies wegen der Stellung als Stromimporteur, dass jede zusätzlich verbrauchte kWh Strom importiert werden muss und man einen sogenannten "Verdrängungsstrommix", der bis zu 800 g/kWh betragen kann, erwartet, weil Kohlekraftwerke Gaskraftwerke vom Markt drängen. Damit bleiben Hybridfahrzeuge mit hohem Wirkungsgrad, also mit einem **Fuel-Converter** und **Power-Tank**, auch noch bis mindestens 2038 (Deutschlands Ausstieg aus der Kohleverstromung) ein Garant, die verkehrsbedingten CO₂ Emissionen möglichst gering zu halten. Zusätzlich gewinnt die Volkswirtschaft Zeit, Mittel für die Schaffung einer flächendeckenden Schnellladeinfrastruktur für BEV oder Wasserstoff bereitzustellen, da weiterhin auf das bestehende Tankstellennetz mit flüssigen Kraftstoffen zurückgegriffen werden kann.

12. Zusammenfassung

Die technologische Facette einer nachhaltigen Elektromobilität muss Lösungsvorschläge anbieten, die langfristig die Mobilität der Bevölkerung sicherstellt und gleichzeitig die durch die Fahrzeuge hervorgerufenen Emissionen und den CO₂ Ausstoß minimieren. Diese Lösungsvorschläge müssen wissenschaftlich untermauert, fair und für die Bevölkerung transparent dargestellt sein. Das impliziert nicht nur die Beachtung der durch den Betrieb der Fahrzeuge hervorgerufenen, sondern auch die durch die Erzeugung und die Entsorgung der Fahrzeuge entstehenden Schadstoffe und CO₂ Emissionen; Stichwort "Life-Cycle-Assessment" (siehe **Abb. 2**).

Bis zum heutigen Tag ist die Verbrennungskraftmaschine DIE dominante Antriebsquelle für Mobilität, da sie zwei überzeugende Vorteile besitzt: Die Vkm kann die Antriebsenergie ohne Zwischenschritt direkt in Drehmoment zum Antrieb der Räder umwandeln und sie nutzt auf der ganzen Welt verfügbare flüssige Kraftstoffe, die eine unerreicht hohe gravimetrische wie volumetrische Energiedichte besitzen. Der Aufbau der heute verfügbaren Kraftstoffbereitstellungs- und Verteilinfrastruktur für Fahrzeuge hat gut 150 Jahre gedauert, hat Milliardenbeträge verschlungen und ist so gut wie in jedem Land der Welt vertreten. Diese Infrastruktur wäre quasi nutzlos und damit wertlos, wenn man bereits jetzt vollständig auf batterieelektrische Fahrzeuge umstiege, obwohl dadurch die globalen CO₂ Emissionen kaum gesenkt würden.

Die <u>Kapitel 3 und 4</u> zeigen auf, dass die scheinbar auf der Hand liegende Lösung eine nachhaltige Elektromobilität durch batterieelektrische Fahrzeuge aufzubauen, bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts gescheitert ist, da die Mitnahme der elektrischen Energie in ausreichender Menge und die rasche Aufladung damals wie heute ungelöst sind. Damit ist der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen nur in Städten oder Ballungsräumen sinnvoll, wo zufolge der geringen Geschwindigkeit der Fahrzeuge der Energieaufwand zur Zurücklegung einer Wegstrecke gering ist. Wenn man bei batterieelektrischen Fahrzeugen <u>zusätzlich</u> einen **Power-Tank** mit geringem Energieinhalt aber hoher Leistung einsetzt, kann man eine sehr

gute Dynamik des elektrischen Antriebsstranges erreichen, eine nur mit geringen C-Raten belastbare dafür aber energieoptimierte Batterie einsetzen und zufolge der verringerten Zyklenzahl die Lebensdauer der Hochenergiebatterie steigern.

Kapitel 5 diskutiert zu Beginn die Problematik von Fahrzeugkonzepten, die sowohl in Städten als auch über Land den CO₂ Ausstoß gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Vkm möglicherweise signifikant senken können. Leider bietet die Automobilindustrie gegenwärtig als eine Variante nur BEV mit großen schnellladefähigen Batterien am Markt an, die sowohl in Ballungsräumen wie über Land einsetzbar sind und zufolge des hohen Gewichtes und des bei weitem noch nicht CO₂ freien Stromes keine signifikante Verbesserung der CO₂ Emissionen des Verkehrs erreichen.

Die zweite am Markt befindliche Fahrzeugvariante zur CO₂ Reduktion sind Hybridfahrzeuge, die neben dem elektrischen Antrieb auch eine leistungsstarke Vkm mit vielstufigem Automatikgetriebe einsetzen. Nur durch die Tatsache, dass im Test zur Festlegung der CO₂ Emissionen des Fahrzeuges die für den Betrieb verwendete elektrische Energie mit Null CO₂ Emissionen gewertet wird, zeigen diese Fahrzeuge am Papier eine Verringerung der CO₂ Emissionen gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Vkm.

Anhand einer Fahrwiderstandskennlinie wird die für bestimmte Betriebszustände eines Mittelklasse-Pkws notwendig Antriebsleistung gezeigt und die Frage diskutiert, ob es nicht zur Gewichtsreduktion des Fahrzeuges sinnvoll wäre, die zum Betrieb notwendige elektrische Energie durch die Umwandlung von flüssigem Kraftstoff an Bord des Fahrzeuges mit einer besonders effizienten Vkm bereitzustellen, statt in einer zufolge hoher Kapazität schweren Batterie zu speichern.

Kapitel 6 diskutiert die CO₂ Emissionen konventioneller und batterieelektrischer Fahrzeuge, da immer noch der Großteil der elektrischen Energie weltweit aus fossilen Quellen, insbesondere aus Kohle, gewonnen wird. Deutsche Kraftwerke erreichen im Mittel derzeit ca. 38 % Wirkungsgrad und die im letzten Jahrzehnt ans Netz gegangenen neuen Kohlekraftwerke liegen zwischen 40 und 46 % [20].

Die "Well-to-Wheel" CO₂ Emissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschine (Vkm) und von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), deren Primärenergie aus zum Teil fossilen Energieträgern stammt, unterscheiden sich nur wenig. Ein mit fossilen Kraftstoffen betriebener Kleinwagen (Vkm-Pkw) hat vergleichbare CO₂ Emissionen wie ein Mittelklasseelektrofahrzeug (BEV), das mit Strom betrieben wird, der dem aktuellen globalen Energiemix entspricht und damit 518 g CO₂-eq/kWh aufweist. Bei Betrieb dieses BEV in Kanada, Brasilien, Frankreich oder Norwegen wären die CO₂ Emissionen deutlich geringer (viel Strom aus Wasserkraft oder Kernenergie) und bei Betrieb in China, Südafrika oder Indien (vorwiegend Strom aus Kohle) deutlich höher.

Um das so wichtige Ziel, den CO₂-Footprint des Verkehrs <u>in absehbarer Zeit</u> signifikant abzusenken, sind Elektrofahrzeuge schlecht geeignet, da der Umstieg der Stromerzeugung ein wesentlich langwieriger (mehrere Jahrzehnte) und kostspieligerer Prozess ist, als den Wirkungsgrad von Fahrzeugen, die mit Benzin oder Dieselkraftstoff betrieben werden, signifikant zu steigern. Hybridfahrzeuge mit **Fuel-Converter** und **Power-Tank** können nicht nur in industrialisierten Ländern, sondern insbesondere in den rasch wachsenden Schwellenländern, deren Bevölkerungszahlen explodieren und deren Wohlstand und damit Bedarf nach Mobilität wächst, eine Halbierung der <u>realen</u>, verkehrsbedingten CO₂ Emissionen innerhalb von weniger als 10 Jahren erzielen. Weiters ist die signifikante Reduktion der verkehrsbedingten CO₂ Emissionen in den Schwellenländern NICHT vom Aufbau einer Infrastruktur für neue Energieträger ("grüner" Strom oder Wasserstoff) abhängig. Der Infrastrukturaufbau benötigt hohe Finanzmittel und insbesondere gut ausgebildete Fachkräfte, die in Schwellenländern (noch) nicht zur Verfügung stehen.

Kapitel 7 bringt Beispiele, mit welchem Wirkungsgrad heutige Verbrennungskraftmaschinen flüssige Kraftstoffe in mechanische Arbeit umwandeln können. Durch die hohen dynamischen Anforderungen an moderne Fahrzeuge, muss die Vkm über ein weites Kennlinienfeld betrieben werden, woraus eine große Variationsbreite des Wirkungsgrades resultiert. Es wird in diesem Kapitel ein neuartiges Antriebskonzept vorgestellt, das unter Beibehaltung einer Vkm als primäre Leistungsquelle einen Systemwirkungsgrad von 55 bis 58 % erreicht. Die Kernpunkte der Innovation sind der Betrieb der Vkm in einem optimierten Arbeitspunkt bei fixer Last und Drehzahl sowie die Umwandlung der dabei anfallenden Abgasenergie in elektrische Energie mit Hilfe von Abgasenergierückgewinnung (Waste-Heat-Recovery). Die Vkm wird in diesem Fall zum "**Fuel-Converter**" und dient ausschließlich dazu, einen elektrischen Hochleistungsspeicher, den **Power-Tank**, mit konstanter Leistung nachzuladen, wenn die Energie im Speicher zur Neige geht. Die elektrische Leistung des **Fuel-Converters** legt nur die Dauerhöchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges fest und die Tankgröße die Reichweite.

Der hervorragende Gesamtwirkungsgrad eines Fuel-Converters von über 50 % und die daraus ableitbare geringe CO₂ Belastung von Hybridfahrzeugen mit Fuel-Converter sollten als Messlatte dienen, wie hoch die CO₂ Belastung für die Bereitstellung der elektrischen Energie in einem Land maximal sein darf, damit ein Staat Förderungen für batterieelektrische Fahrzeuge vergibt.

Kapitel 8 diskutiert die grundsätzlichen Realisierungsvarianten für einen Power-Tank, also für einen elektrischen Energiespeicher mit hoher Leistung aber mit geringem Energieinhalt. Der Power-Tank versorgt den elektrischen Antriebsstrang des Fahrzeuges und garantiert zufolge der hohen Leistung, die er aufnehmen und abgeben kann, hervorragende Fahrdynamik. Der Energieinhalt des Power-Tanks legt fest, wie häufig der Fuel-Converter anspringen muss, damit der Power-Tank für den aktuellen Fahrbetrieb immer ausreichend aufgeladen ist.

Kapitel 9 erarbeitet an Hand eines mit einem **Fuel-Converter** und einem **Power-Tank** ausgerüsteten Fahrzeuges einen neuen Fahrzyklus, um Lastkollektive für den **Power-Tank** zu ermitteln, die diesen maximal belasten. Um die Technologiegrenzen auszuloten, ist der Fahrzyklus so gestaltet, dass der **Power-Tank** möglichst lange mit möglichst hoher Leistung betrieben werden muss. Die über Simulation erarbeitete Dimensionierungsvariante wird diskutiert, um für die darauf aufbauenden Simulationen von standardisierten Fahrzyklen eine ausreichend belastbare und in Kundenhand sichere und langlebige Variante des Power Tanks zu erhalten.

Kapitel 10 nutzt das im **Kapitel 8** erarbeitete Lastkollektiv, um mit Hilfe eines Ragone-Diagramms abzuleiten, welche der drei zur Verfügung stehenden Technologien, Supercapacitors, Batterien oder Schwungräder, für die Realisierung eines **Power-Tanks** am besten geeignet ist. Es stellt sich heraus, dass bis auf eine Ausnahme alle heute verfügbaren **Batterietechnologien**, die für gute Fahrdynamik notwendigen hohen Lade- und Entladeraten des Antriebstranges bereitzustellen, ungeeignet sind. Man muss die notwendige **Power-Tank** Kapazität vervielfachen, um dadurch zu kleineren *C*-Raten und geringeren Lade-/Entladetiefen der Batterie zu kommen, damit die Batterie weniger Verlustleistung produziert und die Zyklenzahl aushält. Die daraus resultierenden Mehrkosten und das Mehrgewicht sind hoch. Die erst vor wenigen Jahren auf den Markt gekommenen Lithium-Titanat Batterien könnten eine Option darstellen. Diese Ausführung einer Lithium-Ionen Batterie ist für hohe Lade- und Entladeraten prädestiniert und verhindert zusätzlich das thermische Durchgehen des Akkumulators. Ob die Zellen die zehntausenden Lade-/Entladezyklen innerhalb der Fahrzeuglebensdauer aushalten oder die Batterie einmal erneuert werden muss, ist noch im Experiment zu ermitteln. Verglichen mit "klassischen" Lithium-Ionen Batterien, sind die deutlich geringere gravimetrische Energiedichte und die relativ hohen Kosten der Lithium-Titanat Batterie nachteilig.

Supercapacitors wären grundsätzlich als **Power-Tank** geeignet, scheiden aber auf Grund der zu geringen Energiedichte für die zu realisierende Energiemenge des **Power-Tanks** aus. Das Gewicht und die Kosten wären für Pkw Anwendungen viel zu hoch.

Schwungräder scheinen für die Applikation als **Power-Tank** gut geeignet, da sie in der Leistungsdichte mit Supercapacitors vergleichbar sind und die Energiedichte ausreicht, um eine nicht zu große Masse zu haben. Die zur Steigerung der Energiedichte höhere Festigkeit der Faserwerkstoffe ist ein Forschungsgebiet, das für viele Bereiche große Bedeutung hat. Davon können Schwungräder ohne viel Zutun profitieren und über am Markt verfügbare Faserwerkstoffe mit gesteigerter Festigkeit die gravimetrische Energiedichte der Schwungräder permanent steigern.

Kapitel 11 vergleicht den Kraftstoffverbrauch und die CO₂ Emissionen von drei Fahrzeugen: eines konventionellen Fahrzeuges mit Vkm (Renault Megane), eines Hybridfahrzeuges mit **Power-Tank** und **Fuel-Converter** und das zum BEV umgerüstete Hybridfahrzeug im standardisierten Artemis Fahrzyklus. Es wird ausgeführt, warum das konventionelle dieselbetriebene Referenzfahrzeug im Artemis Fahrzyklus 32 % bis 80 % mehr CO₂ emittiert als das mit gleichem Kraftstoff betriebene Hybridfahrzeug.

Der elektrische Antriebstrang des Hybridfahrzeuges benötigt elektrische Energie und diese kann entweder an Bord mit einem **Fuel-Converter** bei z.B. 55 % Wirkungsgrad aus Dieselkraftstoff erzeugt werden oder aus einer Fahrzeugbatterie stammen, die über das öffentliche Netz nachgeladen wird. Damit legen die von der Primärenergie und dem Kraftwerkswirkungsgrad abhängigen CO₂ Emissionen des öffentlichen Netzes fest, ob das Hybridfahrzeug oder das BEV geringere CO₂ Emissionen hervorruft. **Tabelle 7** aus **Kapitel 11** zeigt, dass die CO₂ Emissionen des BEV beim Nachladen über ein Gaskraftwerk vergleichbar mit dem dieselbetriebenen Hybridfahrzeug sind (fahrzyklusabhängig ist das BEV um 1 % besser bis 4 % schlechter). Bei Stein- oder Braunkohlebetrieb verursacht das BEV die doppelten bis dreifachen CO₂ Emissionen (um 112 % bis 172 % mehr als das Hybridfahrzeug mit **Fuel-Converter**).

Das europäische Verbundnetz setzt bereits relativ viel CO₂-arme Primärenergie ein (Kernenergie, Wind-, Wasser-, Solar-, Geo- und Abfallenergie). Der Rest sind Gas-, Stein- und Braunkohlekraftwerke [40]). Durch diesen Kraftwerksmix (Mittelwert 2013 – 2017) hat das BEV fahrzyklusabhängig um 5 % bis 11 % weniger CO₂ Emissionen als das dieselbetriebene Hybridfahrzeug mit **Fuel-Converter**. Dies entspricht etwa dem gegenwärtigen Zustand. Wenn sich der generelle Elektrizitätsbedarf (IKT-Infrastruktur wie Rechenzentren, Mobilkommunikation, Blockchain-Technologie, etc.) und die Elektromobilität rascher entwickeln und damit der Bedarf an elektrischer Energie rascher zunimmt als die Umstellung der Stromnetze auf CO₂ arme Primärenergie, müssen zur Ladung von BEV kalorische Kraftwerke einspringen, da der Großteil des Ausbaues der Wasser- und Solarkraftwerke bereits erfolgt ist und die bis 2030 weiter ausgebaute Windenergie vorwiegend die fehlende Energie der abgeschalteten Kernkraftwerke kompensieren muss [40] und [44]. Für Österreich bedeutet dies wegen der Stellung als Stromimporteur, dass jede zusätzlich verbrauchte kWh Strom importiert werden muss und man einen sogenannten "Verdrängungsmix", der bis zu 800 g CO₂-eq/kWh betragen kann, erwartet, weil Kohlekraftwerke Gaskraftwerke vom Markt verdrängen. Damit wäre der CO₂ Vorteil von BEV im europäischen Verbundnetz gegenüber Hybridfahrzeugen mit **Fuel-Converter** wieder verspielt.

Als Resümee kann festgehalten werden, dass <u>Hybridfahrzeuge mit hohem Wirkungsgrad</u>, also mit einem **Fuel-Converter** und **Power-Tank**, bis zur Umstellung der Stromerzeugung auf vorwiegend CO₂ freie Primärenergie <u>DIE Lösung für eine Verringerung der verkehrsbedingten</u> <u>CO₂ Emissionen außerhalb von Ballungsräumen sind</u>. Zusätzlich gewinnt die Volkswirtschaft Zeit und Mittel für die Schaffung einer flächendeckenden Schnellladeinfrastruktur für BEV oder Wasserstoff, da weiterhin auf das bestehende Tankstellennetz mit flüssigen Kraftstoffen zurückgegriffen werden kann.

13. Danksagung

Der Autor dankt den Mitarbeitern des Institutes für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung der Technischen Universität Graz für die hilfreichen Diskussionsbeiträge zur Publikation. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Bernhard Schweighofer für die Durchführung der Simulationen zum Energieverbrauch von Fahrzeugen bei den in der Publikation gezeigten Fahrzyklen.

14. Literatur

- [1] Messwerte eines Mercedes Benz E 200.
- [2] Primary Battery Chemistries, <u>http://www.epectec.com/batteries/chemistry/</u>, access 10.1.2018.
- [3] Albufera Energy Storage, *Aluminium-Ion cells*, <u>https://www.albufera-</u> <u>energystorage.com/index.php/aluminio-carbono/?lang=en</u>, access 24.3.2019.
- [4] Albufera Energy Storage, *Aluminium-Sulfur cells*, SALBAGE Project: <u>https://www.salbageproject.eu/salbage-project/</u>, access 24.3.2019.
- [5] Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI, Energiespeicher-Roadmap (Update 2017) Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien, Karlsruhe, Dezember 2017, access 10.1.2018, <u>http://www.isi.fraunhofer.de/isiwAssets/docs/t/de/publikationen/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf</u>.
- [6] Mohamed Alamgir, *Lithium has transformed vehicle technology*, IEEE Electrification Magazine, Vol 5-1, pp 43-52, 7.3.2017. <u>http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7873398</u>.
- [7] Kokam_Cell_Brochure, Ultra high energy NMC Cell SLBP080085270, <u>http://kokam.com/data/Kokam_</u>
 <u>Cell_Brochure_V.4.pdf?PHPSESSID=075964321b2636ec87c0b31bf1592762</u>, access 24.3.2019.
- [8] GWL Power, *Test cell results*, <u>http://gwl-power.tumblr.com/tagged/LTO</u>, access 24.3.2019.
- [9] Altairnano. 70Ah cell secifications, <u>http://www.altairnano.com/products/70-amp-hour-cell/</u>, access 24.3.2019.
- [10] Toshiba, Toshiba rechargeable battery SCiB[™] brochure, <u>http://www.scib.jp/en/download/Toshiba</u> <u>RechargeableBattery-en.pdf</u> and <u>http://www.scib.jp/en/product/cell.htm</u>, access 24.3.2019.
- [11] Ecomeno.de-Das Elektroauto- & E-Mobilitäts-Portal, *Elektroauto Tesla Model S: Das steckt drin*, <u>https://ecomento.de/2016/03/14/elektroauto-limousine-tesla-model-s-das-steckt-drin-infografik/</u>, access 24.3.2019.
- [12] <u>https://www.elumeen.com/media/wysiwyg/produits/Elumeen_panasonic_NCR-18650B_en.pdf</u>, access 24.3.2019.
- [13] Teslarati, Tesla Model S Weight Distribution, <u>https://www.teslarati.com/tesla-model-s-weight/</u>, access 31.12.2019.
- [14] <u>https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/fsev/fact2015kiasoulev.pdf</u>, Source 7.1.2018.
- [15] Sonderforschungsbereich rwth-Aachen: *Dieselmotor*, <u>http://www.sfb224.rwth-aachen.de/Kapitel/kap4_4.htm</u>, Abb. 4.4.2-4, access 10.1.2018.

- [16] autogenau.de, Brennraumtemperatur, <u>http://www.autogenau.de/ratgeber/auto-lexikon/autolexikon-b/brennraumtemperatur.html</u>, access 10.1.2018.
- [17] G. Merker, R Teichmann, Hrsg, *"Grundlagen Verbrennungsmotore"*, ATZ/MTZ Fachbuch, Springer Verlag, 7. Auflage 2014, S. 161-162.
- [18] <u>http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel_10_Verbrennung_WS0910.pdf</u>, access 10.1.2018.
- [19] Christoph Bernd König, "Das Potential der Dampfkühlung bei Gasturbinen und Kombianlagen" Diplomarbeit TU Wien 2002, <u>https://publik.tuwien.ac.at/files/pub-mb_371.pdf</u>, access 1.1.2020.
- [20] <u>http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis Energie/Basis Energie Nr. 17/BasisEnergie 17 internetx.pdf</u>, access 24.3.2019.
- [21] HA technology now available at industry-first 64 percent efficiency, GE Power, 4. Dezember 2017. <u>https://www.genewsroom.com/press-releases/ha-technology-now-available-industry-first-64-percent-efficiency</u>, access 24.3.2019.
- [22] SDSN and FEEM, 2019 Roadmap to 2050: A Manual for Nations to Decarbonize by Mid-Century, Sep.2019, <u>https://roadmap2050.report/static/files/roadmap-to-2050.pdf</u>, access 27.11.2019.
- [23] Springer Professional, *Pkw-Antriebe im Überblick Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft,* <u>https://www.springerprofessional.de/motorentechnik/pkw-antriebe-im-ueberblick-vergangenheit-gegenwart-und-zukunft/6561052</u>, access 10.1.2018.
- [24] Basshuysen, R. und Schäfer F., HRSG., Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 7. aktualisierte und erw. Aufl., Springer Vieweg, 2015, S. 22.
- [25] Toshihiro HIRAI, Nissan Motor Co., Ltd., Kanagawa, Japan, *Strategic Future: Powertrain Vision for Tomorrow*. In Proceedings 38. Intl. Motorensymposium, Wien, 27.-28. April 2017.
- [26] energie-experte.org; <u>https://www.energie-experten.org/heizung/brennstoffzelle/brennstoffzellen-typen/sofc-brennstoffzelle.html</u>, access 24.3.2019.
- [27] M. Klell, H. Eichlseder, A. Trattner, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, 4.Auflage, Springer Vieweg, 2018, Tab. 6.3.
- [28] Autosieger.de, *BMW Turbo Steamer: BMW Group nutzt Kraft-Wärme-Kopplung im Auto*, <u>http://www.autosieger.de/print.php?sid=8165</u>, access 8.12.2005. <u>https://www.autosieger.de/bmw-group-nutzt-kraft-waerme-kopplung-im-auto-</u> article8165.html, access 20.3.2019.
- [29] Heat2power SARL, Paris, *Heat to power conversion benchmark*, <u>http://www.heat2power.net/en_benchmark.php</u>, access 16.6.2009.
- [30] St. Hausberger, M. Schmitzberger, *Umweltbundesamt, Emissionsverhalten von SUV Sport Utility Vehicles*, FVT Report, REP-0155, Wien, 2008.
- [31] VDA, "Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure WLTP, <u>https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/WLTP-realitaetsnaehere-Ergebnisse-beim-Kraftstoffverbrauch/WLTP-Wieso-ein-neues-Testverfahren.html</u>, access 1.1.2020.
- [32] Peter Schöggl, AVL List GmbH, Die neue Formel 1-Technische Innovationen und Serienrelevanz, ÖVK-Vortrag TU Graz, 4.10.2017.
- [33] G. Merker, R Teichmann, Hrsg, *"Grundlagen Verbrennungsmotore"*, ATZ/MTZ Fachbuch, Springer Verlag, 7. Auflage 2014, S. 430-435.
- [34] Roland Schmetz, Überschlägige Berechnung der Verluste in elektrisch serienhybriden Antriebssträngen. In Proceedings 5. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, 25.2.2015, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S.150-151.
- [35] Hannes Wegleiter, *Energy Storage Systems for Automotive Applications*, Habilitationsschrift an der TU Graz, April 2016, S. 157.
- [36] All About Batteries, Part 12: Lithium Titanate (LTO), https://www.eetimes.com/author.asp?section_id=36&doc_id=1325358#, access 23.3.2019.

- [37] GKN Hybrid Power Gyrodrive Flywheel Schwungradenergiespeichersystem, <u>http://www.gkngroup.com/gkn-cti/technology-and-</u> <u>solutions/future/Documents/Flywheel%20Mk6%20de.pdf</u>, access 4.2.2018.
- [38] Appendix C of the "Energy Information Administration/Household Vehicles Energy Use: latest data & trends, the GREET Model", access 5.6.2009.
- [39] Prof. St. Hausberger, ZU Graz, Artemis-CADC Test Messergebnisse Pkw, 19.3.2018
- [40] Martin Beermann et-al, Treibausgasemissionen der Stromerzeugung und Transportdienstleistung von E-Fahrzeugen in Österreich, Symposium Energieinnovation, Graz, 16.2.2012, <u>https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2012/files/pr/PR_Beermann_2.pdf</u>, access 20.3.2018.
- [41] Paul Scherrer Institut, Treibhausgasemissionen der zukünftigen europäischen Stromerzeugung, Bern, 2002: <u>http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/006/43006752.pdf</u>, Seite 22, access 31.3.18.
- [42] Amt der Vorarlberger Landesregierung, *Energie- und Monitoringbericht Vorarlberg 2017*, <u>https://www.vorarlberg.at/pdf/eav_monitoringbericht2017.pdf</u>, access 2.4.2018.
- [43] RWE, CO2 Emissionen der Stromerzeugung, BKE Bd. 59 (2007) Nr.10, <u>https://m.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/geu_dateien/FB4/CO2-missionen%20der%20Stromerzeugung_01.pdf</u>, access 26.3.2018.
- [44] Elektrotechnikblog, Das Phantom Strom: Wieviel CO2 Emissionen entstehen beim Verbrauch von einer kWh Strom? <u>https://elektrotechnikblog.at/das-phantom-strom-wieviel-cO2-emissionen-entstehen-beim-verbrauch-von-einer-kwh-strom/</u>, access 3.4.2018.
- [45] Helms, H. et al: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Umweltbundesamt D, Texte 27/2016.
 <u>https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_20</u> <u>16_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf</u>, access 24.3.2019, Seite 164.
- [46] Icha, P. und G. Kuhs (2017). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2016. Dessau Roßlau Umwelt Bundesamt D. <u>https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-05-</u> 22 climate-change 15-2017 strommix.pdf, access 7.9.2018, Seite 21.
- [47] Umweltbundesamt A, Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger, August 2018, <u>http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.html</u>, access 30.9.2018
- [48] Moro, A., Transportation Research Part D (2017), <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.012</u>, access 1.10.2018.
- [49] Thinkstep AG, Greenhouse Gas Intensity of Natural Gas, 5.5.2017, <u>http://gasnam.es/wp-content/uploads/2017/11/NGVA-thinkstep_GHG_Intensity_of_NG_Final_Report_v1.0.pdf</u>, access 1.10.2018.
- [50] IEA, Electricity generation by source, Europe 1990-2017, <u>https://www.iea.org/regions/europe</u>, access 1.1.2020.
- [51] INRIX Global Traffic Scorecard, INRIX Research Graham Cookson, Februar 2018, <u>https://www.rbb24.de/panorama/beitrag/2018/02/berlin-verkehr-stau-traffic-scorecard-inrix-2017.file.html/180206%20Traffic%20Scorecard.pdf</u>, access 1.1.2020.
- [52] KIT, DI J. Kunkelmann, Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen, Brandschutzforschung der Bundesländer, Forschungsbericht 175, Dez. 2016, <u>https://www.ffb.kit.edu/download/IMK%20Ber.%20Nr.%20175%20Kunkelmann%20Lithium-Ionen-%20und%20Lithium-Metall-Batterien%20-%20Ueberarbeitung%20-%2003.02.2017%20-%202.pdf</u>, access 1.1.2020.
- [53] ATG Kraftstofftanks und Zubehör, <u>https://www.atg-germany.de/kraftstofftanks-und-zubehoer/</u>, access 1.1.2020.