

02.02.2020

Das ideale Hybridauto Teil 1: **Minimalauslegung**

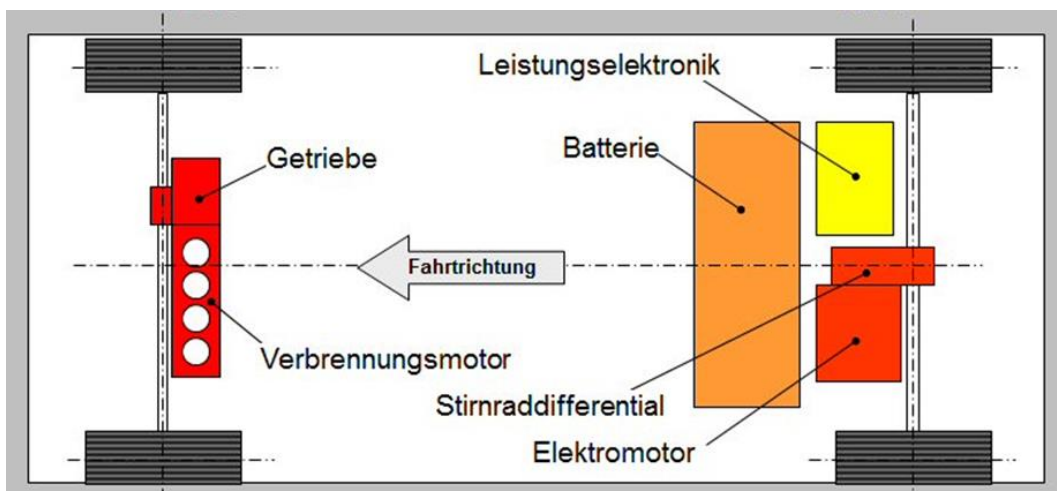
Jetzt kommt die Stunde der Wahrheit. Schaffen wir es, die anspruchsvollen Vorgaben aus den Anforderungen in die Tat umzusetzen, oder haben wir uns zu weit aus dem Fenster gelehnt? Vielleicht sollten wir nicht gleich die volle Breitseite an Maßnahmen abfeuern, um dann festzustellen, dass uns die Kosten davon galoppieren.

1. Machen wir erst einmal einen bescheidenen ersten Schritt und definieren eine **Minimalkonfiguration**, um zu sehen, wie weit wir damit kommen.
2. Im zweiten Schritt nehmen wir weitere Maßnahmen hinzu, in dem Bestreben, damit ein **Standardkonzept** zu definieren.
3. Im dritten und letzten Schritt werfen wir alles an Ideen in die Waagschale, was den PHEV insgesamt noch verbessert. Das Ergebnis wäre dann eine **High-End-Auslegung**.

Weniger ist mehr

Das Hauptproblem der meisten Hybriden sind die Kosten. Logisch, denn in ein bestehendes Fahrzeug einen zweiten Antrieb zu implementieren, ohne Abstriche am Rest des Fahrzeugs vorzunehmen, muss nach Adam Riese teurer sein. Ergo gilt unser Hauptaugenmerk den Einsparpotentialen an Verbrennungsmotor und Getriebe.

Der grundsätzliche Aufbau ist den Lesern dieser Seiten bereits bekannt. Vorne Verbrennungsmotor auf die Vorderräder wirkend - hinten Elektromotor mit Antrieb der Hinterräder. Die räumliche Trennung der beiden Antriebe bringt eine Reihe von Vorteilen, wie wir später noch sehen werden. Seine Bewährungsprobe hat dieser Ansatz bereits hinter sich. Einen 100.000 Kilometer Dauertest absolvierte ein BMW 225xe Active Tourer ohne Probleme.



Wenn etwas Kostspieliges hinzukommt, und die Kosten in der Summe gleich bleiben sollen, muss woanders etwas wegfallen. Aus dem Prinzipschaubild wird deutlich, wie das

gehen muss: hinten kommt etwas dazu, also muss vorne etwas weg - am Verbrennungsmotor und dem Getriebe.

Gedanken zur Motorauslegung

Heutige Benzinmotoren sind fast ausschließlich mit Abgasturbolader aufgeladen. Nur noch wenige Exoten frönen dem Saugprinzip.

Eine weitere Gemeinsamkeit moderner Verbrennungstriebwerke ist der unabdingbare Einsatz von Ventil- und Nocken-Verstellsystemen. Sie verbessern den Wirkungsgrad im Teillastbereich. Das ist auch dringend geboten, denn die meiste Zeit laufen die Motoren nur mit einem Bruchteil ihrer installierten Leistung, meilenweit vom Punkt des optimalen Wirkungsgrads entfernt.

Hat man aber - so wie wir - einen zweiten Motor an Bord, der die Bereiche niedriger Leistung mit einem guten Wirkungsgrad abdeckt, kann man auf diese kostspieligen Zusatzaggregate verzichten. Anstatt den Wirkungsgrad im **Teillastbereich** zu verbessern, optimieren wir den Wirkungsgrad im **Bestpunkt**. Anschließend versuchen wir sooft es geht, den Verbrennungsmotor in der Nähe des Bestpunktes zu betreiben.

Als erstes eliminieren wir den Abgasturbolader ATL. So sinnvoll der ATL bei Dieselmotoren auch ist, in Benzinern hat er prinzipiell nichts verloren. Sein größter Vorteil ist die weitgehende Übereinstimmung mit den Dieselmotoren in Fragen der Einbauverhältnisse, der Drehmomente, der Ladeluftkühlung usw. Außerdem kann man aus gegebenem Hubraum wesentlich mehr Leistung rausholen, was für alle Fahrzeuge mit Quermotor und Frontantrieb wichtig ist.

Für den Wirkungsgrad ist der ATL kontraproduktiv, vergrößert er doch den Widerstand im Abgasstrang über den gesamten Betriebsbereich. Außerdem muss man die Verdichtung etwas zurücknehmen, der Lader heizt den Motorraum unnötig auf, und der zusätzliche Ladeluftkühler erfordert eine größere durchströmte Fahrzeugfront und verschlechtert den Luftwiderstand. Wir ersetzen deshalb einen mit allerlei Verstellsystemen garnierten, hochaufgeladenen ATL-Motor durch einen Saugmotor ohne Verstellbrimborium.

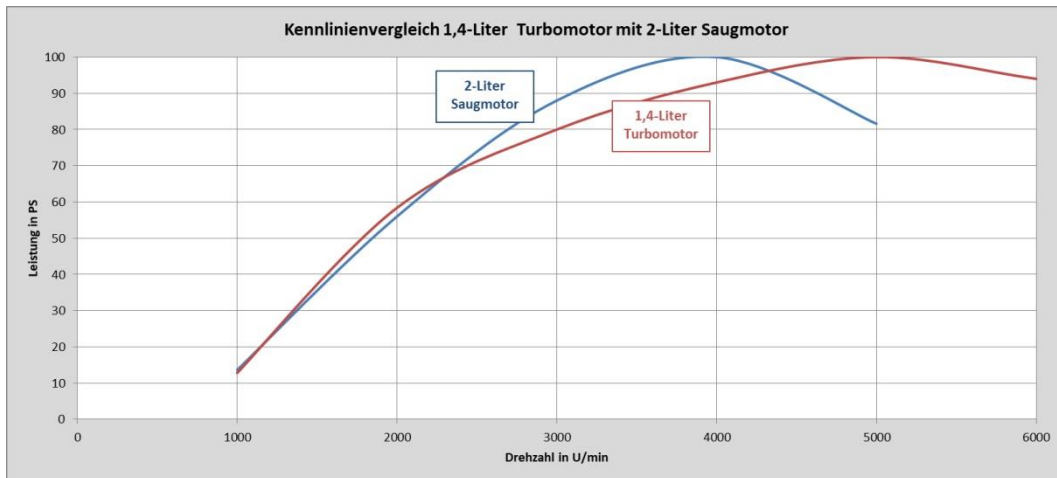
Als nächstes stellt sich die Frage nach der Leistung. Diese ist eng verknüpft mit der gewünschten Höchstgeschwindigkeit. Die Elektromaschine kann uns bei hoher Geschwindigkeit nicht helfen, die muss der Benziner alleine stemmen. Eine Vmax von 200 km/h erreicht der BMW mit Hilfe eines Dreizylinders mit 1.600 ccm und 136 PS. Wir begnügen uns mit 160 km/h und entsprechend weniger Leistung. 100 PS dürften dafür mehr als ausreichen.

Eine niedrige Leistung verbessert den Verbrauch schon allein dadurch, dass der Motor häufiger im Bereich des besten Wirkungsgrades läuft. Eine weitere Verbesserung erzielt man durch eine Auslegung mit niedriger Literleistung und niedrigen Drehzahlen. Unser Saugmotor braucht deshalb einen großen Hubraum.

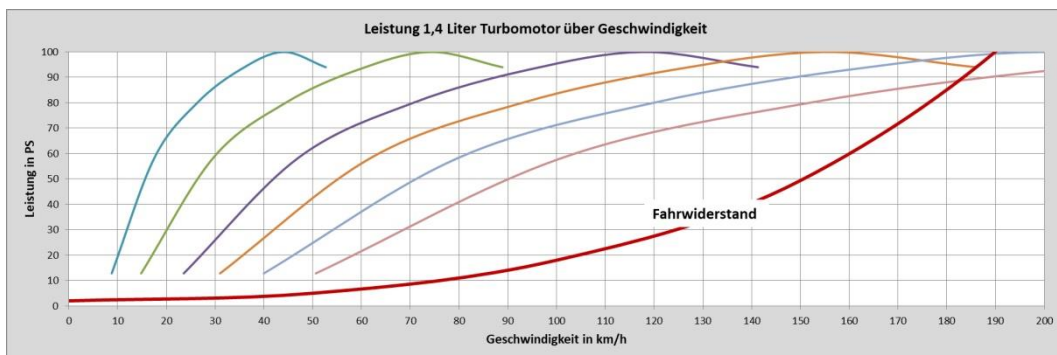
Die größten, für Quereinbau an der Vorderachse geeigneten Motoren sind Zweiliter-Vierzylinder. Diese Größe ist für uns bindend, denn wir wollen die vorhandenen Einbauräume der Frontantriebsfahrzeuge nutzen. 2 Liter Hubraum und 100 PS ergibt die mäßige Literleistung von 50 PS/L. Die schüttelt ein Saugmotor auch ohne teure Verstellmechanismen an Nockenwelle und Ventilen locker aus dem Ärmel.

Vergleiche:

Als Beweis vergleichen wir den 2-Liter Saugmotor mit 100 PS mit einem leistungsgleichen Turbomotor mit einem Hubraum von 1,4 Litern, einem typischen Vertreter des Downsizings.



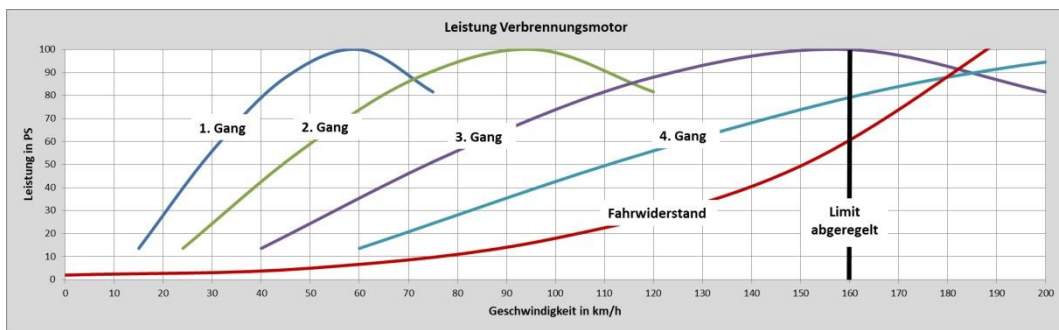
Der Turbomotor deckt einen größeren Drehzahlbereich ab als der großvolumige Saugmotor. Das spielt für uns keine Rolle, denn wir beschränken uns beim PHEV ganz bewusst auf einen kleineren Geschwindigkeitsbereich. Um diesen Vorteil in belastbare Zahlen zu fassen, eignet sich das Diagramm der Leistung über der Geschwindigkeit in den einzelnen Gängen.



Trägt man noch den Fahrwiderstand in das Diagramm ein, kann man direkt die erzielbare Höchstgeschwindigkeit ablesen. In diesem Fall erreicht das Fahrzeug im fünften Gang eine Endgeschwindigkeit von 190 km/h. Im sechsten Gang würde die Geschwindigkeit auf etwa 180 km/h zurückfallen. Diese Übersetzungsstufe bildet somit eine Art Overdrive, und dient hauptsächlich der Drehzahlab senkung zur Verbrauchsreduzierung. Man erkennt, sechs Gänge sind in diesem Fall kein Luxus.

Reduzierungen am Getriebe:

Brauchen wir beim PHEV unbedingt sechs Gänge? Wenn wir die Elektromaschine so auslegen, dass sie den unteren Geschwindigkeitsbereich abdeckt, kann man den ersten Gang getrost entfallen lassen. Die Beschränkung auf eine Vmax von 160 km/h liefert eine weitere Streichoption, den sechsten Gang.

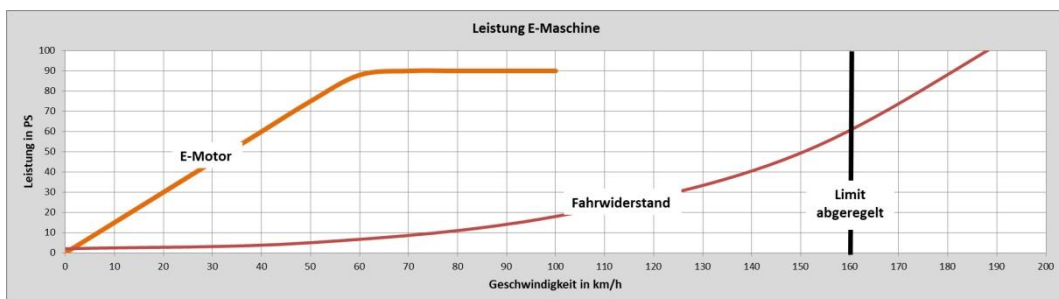


So könnte die Auslegung des Vierganggetriebes aussehen. Auch hier ist der höchste Gang, in dem Fall der vierte, recht hoch übersetzt, um bei niedriger Drehzahl und hohem Moment im Geschwindigkeitsbereich oberhalb 100 km/h verbrauchsschonend unterwegs zu sein. Gemäß dem Diagramm wäre eine Höchstgeschwindigkeit von 180 km/h erreichbar – eine theoretische Option für bestimmte Fälle.

Selbstredend kann man nicht nur das Anfahren, sondern auch das Rückwärtsfahren dem Elektromotor überlassen – wieder ein Zahnradpaar weniger und eine weitere Kostenreduzierung.

Auslegung Elektromaschine:

Ein Elektroantrieb ist eigentlich für den Stadtverkehr prädestiniert. Spontanes Ansprechen, guter Wirkungsgrad im Teillastbereich, keine Abgase, geringe Laufgeräusche, gute Regelbarkeit, systembedingt kostenlose Start-Stopp-Automatik, Möglichkeit der Rekuperation – das sind die wesentlichen Vorteile. Der Nachteil zeigt sich spätestens dann, wenn bei einem BEV die Elektromaschine ganz auf sich allein gestellt den gesamten Geschwindigkeitsbereich abdecken muss. Verschiedentlich wird diesem Umstand mit Hilfe von Getrieben, mehreren Motoren oder einfach hoher Leistung abgeholfen – allesamt reichlich kostspielige Lösungen. Oder die Höchstgeschwindigkeit wird drastisch auf beispielsweise 130 km/h reduziert, und das Vehikel zum Verkehrshindernis degradiert.



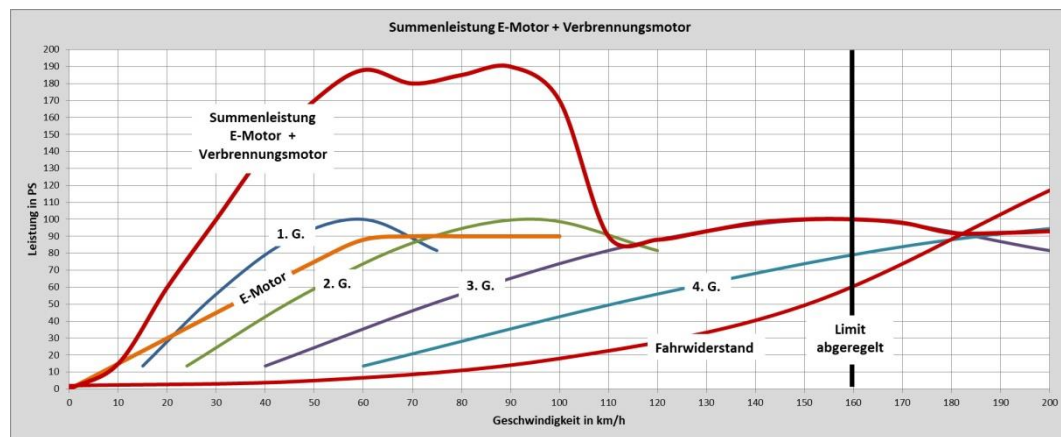
Zum Glück verfügen wir über die Kraft der zwei Herzen, und müssen uns weder teuren noch fahrspaßreduzierenden „Kunstgriffen“ bedienen. Jede der beiden Antriebsarten kommt genau dort zu ihrem Recht, wo die spezifischen Stärken liegen. Bei der Elektromaschine ist das ganz klar der Bereich niedriger Geschwindigkeit. Wir legen also den Elektromotor auf maximal 100 km/h aus.

Würden nicht 60 oder 70 km/h reichen? Prinzipiell schon, aber wir wollen die Elektromaschine bei dem wichtigen Beschleunigungswert bis 100 km/h dabei haben.

Müssen es unbedingt 90 PS sein, würden nicht 50 oder 60 PS reichen? Schon, aber wir wollen in geschlossenen Ortschaften auch ohne Mithilfe des Verbrennungsmotors zu den leistungsfähigsten Fahrzeugen gehören.

Die Kombination:

Hat man es besonders eilig und tritt das Fahrpedal bis zum Bodenblech durch, arbeiten die beiden Treibwerke zusammen. Es entsteht die sog. Systemleistung. Sie kann sich von der simplen Addition der Höchstleistungen deutlich unterscheiden. Am einfachsten ist sie grafisch zu ermitteln.

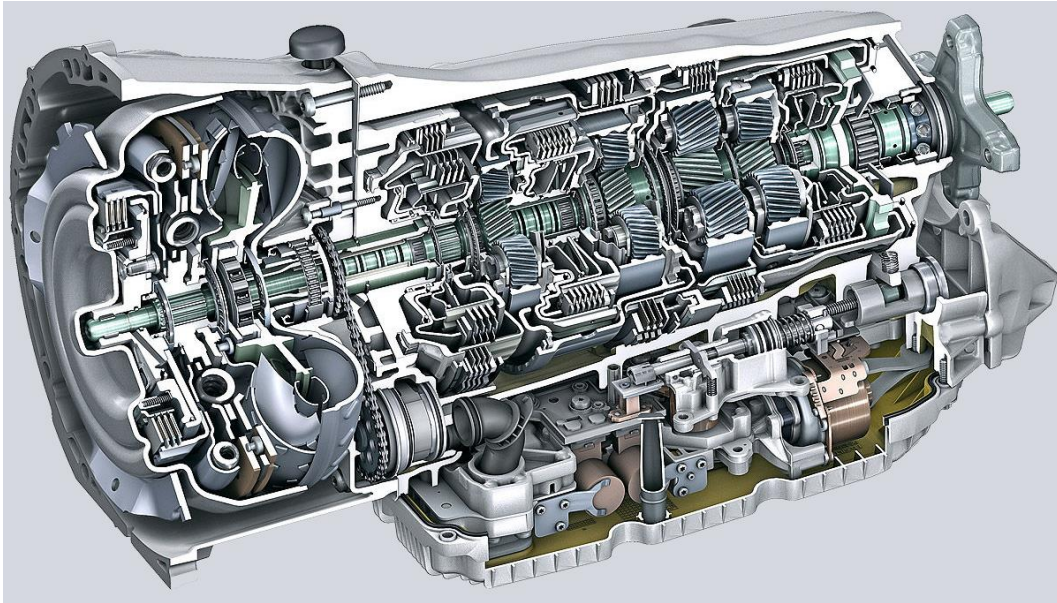


Bei 60 km/h erreicht die Leistung ihren Höhepunkt von 190 PS und bleibt bis 100 km/h auf hohem Niveau. Das reicht locker für eine Beschleunigungszeit von acht Sekunden bis 100 km/h. Dass es anschließend bis 160 km/h deutlich beschaulicher zugeht, das ist der Preis, den wir für diese Auslegung bezahlen. Dennoch ist das Fahrzeug auch auf der Autobahn weit davon entfernt, ein Verkehrshindernis zu sein, besteht doch bis 160 km/h im dritten Gang ein deutlicher Leistungsüberschuss.

Kupplung und Getriebe:

Wollen wir rein elektrisch fahren, müssen wir den Verbrennungsmotor vom Antriebsstrang trennen. Dazu braucht man eine automatische Kupplung. Diese Kupplung kann uns auch die Arbeit des manuellen (peduellen?) Kuppelns beim Schalten abnehmen. Durch die Eignung zum Segeln, also dem lastfreien Rollen, erhält die Kupplung einen weiteren Bonuspunkt. Auch Doppelkupplungsgetriebe (DKG oder DSG) und sequentielle automatische Schaltgetriebe (SMG) sind auf solche Kupplungen angewiesen.

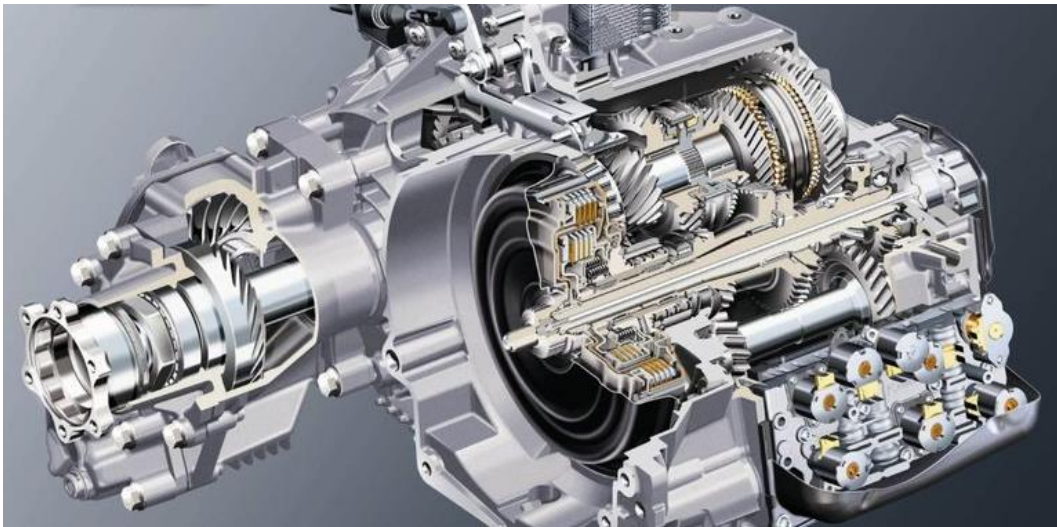
Eines steht von vornherein fest, ein **Wandler-Automatikgetriebe** kommt nicht in Frage. Es sprengt schlicht und ergreifend unser Budget.



9-Gang-Wandlerautomatik: SOO NICHT!

Wer soll dieses Wunderwerk der Technik bezahlen? Führt daran wirklich kein Weg vorbei? Ist das der Vorsprung der deutschen Automobiltechnik? Dann Gute Nacht!

Was dann? Ein DKG?



Doppelkupplungsgetriebe: Auch nicht so!

Auch das ist aufwändig und teuer. Außerdem ist der ruckfreie Übergang von einer Kupplung zur anderen nicht immer zu 100 Prozent gewährleistet. Für unsere Zwecke nicht brauchbar.

Die Lösung: SMG

Wie wäre es mit einem SMG? Diese Getriebe sind von Motorrädern und aus dem Rennsport bestens bekannt. Leider konnte es sich außer in einigen Supersportwagen bei keinem Serienfahrzeug durchsetzen. Warum? Dazu sind ein paar Erklärungen erforderlich.



Sequentielles Motorradgetriebe

Zunächst eine Beschreibung aus dem AutoBild-Lexikon:

Beim Sequentziellen Schaltgetriebe handelt es sich um ein aus dem Motorsport stammendes und in der Bedienung vereinfachtes Schaltgetriebe: Statt der üblichen H-Schaltung (nach dem Schaltmuster auf dem Schaltknauf für den ersten, zweiten, dritten, vierten und fünften Gang) liegen alle Vorwärtsgänge wie beim Motorrad in einer Schaltebene.

Um die Gänge zu wechseln, muss der Schalthebel zum Herunterschalten nur nach vorn gedrückt oder zum Heraufschalten nach hinten gezogen gedrückt werden. Die Schaltvorgänge können auch wie in der Formel 1 durch Schaltwippen am Lenkrad ausgelöst werden.

Der größte Nachteil des SMG ist die Zugkraftunterbrechung beim Gangwechsel. Besonders krass tritt dieser Effekt auf beim Fahren im Automatik-Modus, und hier vor allem beim Wechsel vom ersten in den zweiten Gang, mit Abstrichen auch vom zweiten in den dritten. Die Unterbrechung kommt fast immer unangekündigt, und führt bei den Insassen zu einem heftigen Kopfnicken. Solange man die Gänge von Hand wechselt, ist die Unterbrechung nicht störender als bei einem Handschaltgetriebe. Mit etwas Routine lässt sich der Gangwechsel sogar ausgesprochen sanft gestalten. Trotzdem kann man ein solches Verhalten dem Otto-Normalfahrer nicht zumuten. Marketing-Leute glauben das, und sie bestimmen schließlich, was in unseren Autos drin ist, nicht die Ingenieure. Die sogar als allerletztes.

Auch das Anfahren aus dem Stand ist nicht unbedingt die Stärke dieses Getriebes. Das Dosieren beim Losfahren und beim Rangieren gestaltet sich manchmal recht gewöhnungsbedürftig. Außerdem fehlt ihm die von der Wandlerautomatik gewohnte Drehmomentüberhöhung für einen spurtstarken Ampelstart.

Treffen diese Nachteile auf unseren PHEV zu? Nein! Alle Probleme treten in dem Geschwindigkeitsbereich auf, in dem der Elektroantrieb das Sagen hat. Das heißt, sie treten eben nicht auf. Anfahren und Beschleunigen aus dem Stand und Rangieren

erledigt unser Elektromotor sogar besser als jede Wandlerautomatik. Nicht einmal die Zugkraftunterbrechungen bei den Gangwechseln treten in Erscheinung, denn die kann der Elektromotor ausbügeln.

Was hindert uns demzufolge daran, dieses Getriebe einzusetzen? Eigentlich nichts. Höchstens die Tatsache, dass ein derartiges Getriebe mit vier Gängen und ohne Rückwärtsgang noch nirgends in Serie ist.

Wie ist es um den Wirkungsgrad bestellt? Die simple Regel lautet, je mehr Zahnräder sich im Einsatz befinden, desto schlechter. In dieser Hinsicht schneidet das 4-Gang SMG konkurrenzlos günstig ab.

Batteriegröße:

7,7 kWh beträgt die theoretische Kapazität des Akkus im BMW 225xe Active Tourer aus dem ams-Dauertest. In der Praxis konnte der Akku 6,8 kWh Ladeenergie einschließlich Ladeverlusten aufnehmen. Im Durchschnitt reichte das für 26 Kilometer - für unsere Zwecke entschieden zu wenig. BMW verbaut mittlerweile einen leistungsfähigeren Akku mit 8,8 kWh. Der reicht in der Praxis für durchschnittlich 30 Kilometer. Auch nicht üppig.

Ursprünglich strebten wir eine rein elektrische Reichweite von 100 Kilometern an. Schließlich soll der Elektroantrieb die geschlossenen Ortschaften ganz alleine bewältigen, seien sie auch noch so groß. Den Erfahrungen aus der Praxis zufolge müssen wir uns aus Kostengründen von diesem ehrgeizigen Ziel verabschieden. Wir beschränken uns deshalb auf die doppelte Kapazität des BMW PHEVs, also theoretische 17,5 kWh, entsprechend einer elektrischen Reichweite von 60 Kilometern.

Die gesteigerte Energiemenge benötigen wir als Manövriermasse, um den Akku nicht ständig bis an den Stehkragen aufladen zu müssen, aus Sorge, bei der nächsten Stadtrunde auf die Dienste des Verbrennungsmotors angewiesen zu sein.

Ladestrategien:

Der Elektroantrieb erfüllt mehrere Aufgaben:

1. In geschlossenen Ortschaften bei Geschwindigkeiten bis ca. 60 km/h soll er alleine den Vortrieb sicherstellen. Je nach Wohnlage können schnell 30 bis 40 Kilometer zusammenkommen, bevor der Akku wieder geladen wird. Entweder weil es auf die Landstraße geht, wo der Verbrennungsmotor das Laden übernimmt, oder bis die heimische Steckdose erreicht ist, die sich darum kümmert.
2. Die Elektromaschine soll rekuperieren, d.h. Bremsenergie rückgewinnen. Das kann sie aber nur, wenn Platz im Akku vorhanden ist. Der Akku sollte also immer dann, wenn der Benzinmotor einspringt, nicht ganz bis unters Dach voll sein.

Das hört sich dramatischer an, als es in der Praxis tatsächlich der Fall ist. Angenommen, das Fahrzeug hängt über Nacht an der Steckdose, dann sind die Batterien am Morgen proppenvoll. Ist es draußen kalt, fährt man die ersten Kilometer mit dem Verbrennungsmotor, um das Fahrzeug aufzuheizen. Erst anschließend übernimmt bei Bedarf die Elektromaschine. In diesem Fall hätte man ein Problem mit der Rekuperation.

Besitzt das Fahrzeug aber eine elektrische Vorwärmfunktion, was bei (fast) allen BEVs und PHEVs der Fall ist, kann man sofort mit dem Elektroantrieb starten. Geht es dann

auf die Landstraße, wurde der Akku bereits um ein paar Elektronen erleichtert, und Rekuperation kann stattfinden.

Das Gleiche gilt auch dann, wenn im Sommer die Außentemperaturen ein Vorwärmen überflüssig machen.

Rekuperation bzw. Bremsenergie-Rückgewinnung

Bremsenergie-Rückgewinnung, das hört sich im ersten Moment ziemlich beeindruckend an. Aber nur solange, bis man genauer hinschaut und sich überlegt, wie oft und wie lange man wirklich auf der Bremse steht und Energie über das Bremspedal abbaut. Die meiste Energie wird aber über das Gaspedal/Strompedal abgebaut. Beim herkömmlichen Antrieb übernimmt der Verbrennungsmotor die Vernichtung von kinetischer Energie, und zwar immer dann, wenn das Fahrpedal auf null steht. Außer man verfügt über die Möglichkeit des Segelns. Dann wird der Motor wirksam daran gehindert, kinetische Energie in warme Luft zu verwandeln. Das bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass das Fahrzeug ohne wesentliche Verzögerung rollt und rollt, bis der Fahrer gezwungen ist, auf die Bremse zu steigen – sehr unkomfortabel. Ist jedoch eine leistungsfähige Elektromaschine an Bord, kann sie die Rolle der Motorbremse übernehmen, und gleichzeitig die Energie in der Batterie speichern.

Beim Tritt auf das Bremspedal spricht man von Bremsenergie, bei der Fahrpedalnullstellung von Schleppenergie. Das Verhältnis der vernichteten Energien durch Bremsen oder Schleppen beträgt ca. 1 zu 10. D.h. der Verbrennungsmotor vernichtet in Summe wesentlich mehr Energie als die Bremse. Das hängt damit zusammen, dass man sich die überwiegende Zeit in der Kolonne befindet, mit permanent leichten Geschwindigkeitsanpassungen. Es ist nicht möglich, längere Zeit mit konstanter Geschwindigkeit zu fahren, sondern man spielt ständig mit dem Fahrpedal, um den Abstand zum Vordermann zu regeln.

Die erfolgversprechendste Strategie für Hybridfahrzeuge lautet, immer wenn das Fahrzeug langsamer werden soll, die Elektromaschine zur Verzögerung zu nutzen. Fährt man mit Verbrennungsmotor, muss dieser sofort, wenn der Fahrer Gas wegnimmt, vom Antriebsstrang getrennt werden. Das führt zunächst zum Zustand des Segelns, bis der Fahrer das Fahrpedal weiter zurücknimmt und die Elektromaschine das gewohnte Schleppmoment erzeugt.

Wohin anschließend mit der gespeicherten Energie? Am besten, man steckt sie sofort in den nächsten Beschleunigungsvorgang, bevor der Akku überläuft. Auf die Art kann man den Verbrennungsmotor am besten bei seiner Arbeit unterstützen. Die Kehrseite der Medaille: Befindet sich der Akku schon im unteren Drittel seiner Kapazität, wird man selbstverständlich die gewonnene Energie speichern.

Betriebsmodi:

Damit kommen wir zu den verschiedenen Betriebsmodi für einen PHEV. Der **Standardbetriebsmodus** ist immer beim Start automatisch aktiv. Er ist folgendermaßen definiert:

- Im Stadtbetrieb bis 60 km/h wird ausschließlich die Elektromaschine genutzt. Der Verbrenner schaltet sich nur dazu, wenn der Fahrer über das Fahrpedal so viel Leistung abrufen will, dass die Elektromaschine allein die Aufgabe nicht mehr bewältigen kann.
- Auf der Landstraße, also im Bereich von 60 bis 100 km/h, leistet der Verbrennungsmotor die Hauptarbeit. Der Elektroantrieb springt lediglich zur Unterstützung bei, falls dem Verbrenner die Luft ausgeht. Außerdem obliegt ihm die wichtige Aufgabe der Rekuperation.
- Oberhalb 100 km/h, also im Wesentlichen auf der Autobahn ist der Verbrennungsmotor auf sich allein gestellt.

Damit sind aber die Möglichkeiten noch nicht erschöpft.

- **Batterie-voll-Modus:** Bestimmte Situationen können es erforderlich machen, die Batterie in einem guten Ladezustand zu halten. Z.B. weil man beabsichtigt, längere Zeit in der Stadt ohne Verbrenner und ohne Nachlademöglichkeit rein elektrisch zu fahren.
- **Batterie-leer-Modus:** Umgekehrt will man vielleicht daheim an der Steckdose den Akku aufladen, z.B. weil der Strom günstiger ist als der Kraftstoff. Dann sollte bis zur heimischen Garage möglichst viel aus dem Akku entnommen werden, damit sich das Laden lohnt.

Damit sind die Wahlmöglichkeiten immer noch nicht ausgereizt.

- **Verbrennungsmodus:** Natürlich sollte es möglich sein, ausschließlich mit dem Verbrennungsmotor zu fahren, mit allen Nachteilen, die dieser Betrieb mit sich bringt. Trotzdem sollte dem Fahrer diese Option zur Verfügung stehen.
- **Elektromodus:** Auch dieser Modus sollte verfügbar sein. Stadt und Landstraße lassen sich damit problemlos bewältigen, Autobahn vorwiegend in der LKW-Kolonnen.
- **Sportmodus:** Elektro- und Verbrennungsmotor arbeiten im gesamten Geschwindigkeitsbereich immer zusammen. In diesem Betrieb spielt der Energieverbrauch keine Rolle.

Der Energieverbrauch:

Die meisten Tester von PHEVs tun sich verdammt schwer mit einer Empfehlung.

Meistens heißt es lapidar:

„Der Strom- und Kraftstoffverbrauch richtet sich vornehmlich nach dem persönlichen Umgang mit diesem Instrument.“

Der Anspruch von seriösen Medien sollte sein, dem Kaufinteressenten ein bisschen mehr Information an die Hand zu geben. Versuchen wir, es besser zu machen. Teilen wir die Menge der Autofahrer in drei Kategorien ein.

- Am linken Ende der Skala befinden sich die reinen Stadtfahrer. Die sind mit einem kleinen, wendigen BEV bestens bedient.
- Am rechten Ende die Geschäftsreisenden, die viele Tausend Kilometer mit ihrem Firmenwagen auf Autobahnen unterwegs sind. Für die gibt es nichts Besseres als ein Mittelklassefahrzeug mit Dieselmotor, vorzugsweise als Kombi.

- In der Mitte der Normalfahrer. Er fährt viel Kurzstrecke, selten Langstrecke. Er fährt in der Stadt, viel auf Landstraßen und auf Autobahnen.

Dieser „Normalfahrer“ ist unsere Zielgruppe. Aus welchen Anteilen an Stadt, Landstraße und Autobahn sich seine Strecke zusammensetzt, das zeigt uns die Statistik.

Strecke	Prozentualer Anteil	Anteil pro 100 km	Durchschnitts-Geschwindigkeit	Fahrzeit
Stadt	26 %	26 km	30 km/h	0,87 h
Landstraße	50 %	50 km	75 km/h	0,67 h
Autobahn	24 %	24 km	120 km/h	0,20 h
gesamt	100 %	100 km	56 km/h	1,74 h

Wem die Durchschnittsgeschwindigkeit zu hoch vorkommt, sollte mal den Bordcomputer über ein Jahr ohne Reset durchlaufen lassen. Der Aha-Effekt lässt nicht lange auf sich warten.

Wie kommen wir von diesen Daten zum Verbrauch? Wir kennen die Durchschnittsgeschwindigkeit der jeweiligen Strecke und können daraus die erforderliche Leistung ermitteln. Hier zeigt sich der Vorteil der strikten Arbeitsteilung. In der Stadt arbeitet nur die Elektromaschine, auf Landstraße und Autobahn nur der Verbrenner (lediglich unterstützt durch die Elektrik). Die Multiplikation der Leistung mit dem jeweiligen Zeitanteil ergibt die Arbeit. Jetzt müssen wir nur noch den Wirkungsgrad kennen, mit dem der jeweilige Antrieb seine Arbeit verrichtet, und schon haben wir den Verbrauch in kWh. Die Umrechnung in Liter pro 100 Kilometer ist eine simple Rechnung, ebenso daraus die Berechnung des CO₂ in kg/100 km.

Strecke	Leistung	Arbeit	η			CO ₂ kg/100km
Stadt	3 kW	2,6 kWh	100 %	2,6 kWh	2,6 kWh	1,3
Landstraße	7,5 kW	4,9 kWh	25 %	19,6 kWh	2,3 L	5,5
Autobahn	22 kW	4,4 kWh	35 %	12,6 kWh	1,5 L	3,6
gesamt				33,8 kWh		10,4

Genauigkeitsabschätzung:

Unsicherheit Lastkollektiv: Die erste Unsicherheit ergibt sich aus der Annahme des Lastkollektivs. Man kann aber davon ausgehen, dass sich das Gros der Fahrzeuge in der Nähe dieser Durchschnittswerte bewegt, denn die Fahrer mit stark abweichenden Profilen suchen sich andere Fahrzeuge aus – siehe oben.

Unsicherheitsfaktor Wirkungsgrad: Der schlechte Wirkungsgrad von 25 Prozent für die Landstraße wurde deshalb gewählt, weil man sich bei der niedrigen Leistung schon deutlich vom Optimum entfernt. Auf der Autobahn hingegen liegt man recht nah am Optimum, deshalb die optimistische Annahme von 35 Prozent für diesen Abschnitt.

Risikofaktor Dynamik: Den Leistungs- und Arbeitswerten liegt eine konstante Geschwindigkeit zugrunde. Besonders stark schwankt natürlich die Geschwindigkeit in

der Stadt. Dort hilft uns der Elektroantrieb, der in diesem Bereich seine Stärken ausspielen kann: Besserer Wirkungsgrad im Teillastbereich, Rekuperation und Start-Stopp-Automatik. Die Schwankungen auf der Landstraße kompensiert zum Teil ebenfalls die Elektromaschine durch Rekuperation.

Zielerreichung:

	Dimension	BMW 225xe Active Tourer	Ziel	Prognose Minimalkonzept
Test-Verbrauch elektrisch Verbrennung	kWh/100 km L/ 100 km	12,2 4,0	4,0	2,6 3,8
Test-CO2	kg/100 km	(6,1 + 9,4) = 15,5	9,4	(1,3 + 8,9) = 10,2
Reichweite elektrisch Reichweite Benzin	km	30 500	100 800	60 800
Leergewicht	kg	1.750	1.600	1.800
Leistung elektrisch Leistung Verbrenner Leistung gesamt	kW/PS kW/PS kW/PS	65/88 100/136 165/224	150	90 100 190
Beschleunigung bis 100 km/h	s	7,0	≤ 8	~ 7
Höchstgeschwindigkeit	km/h	202	160	160
Basispreis	€	54.000	40.000	45.000

Rot hinterlegt: Defizite gegenüber Ziel

Kommentar zu den Prognosewerten:

Leergewicht:

- Positiv ggü. BMW 225xe: Entfall ATL; Entfall Ventilverstellung; leichteres Getriebe;
- Negativ ggü. BMW 225xe: Größere Batterie; Vier- statt Dreizylinder;
- Saldo (geschätzt): + 50 kg

Basispreis:

- Positiv ggü. BMW 225xe: Entfall ATL; Entfall Ventilverstellung; einfaches Getriebe
- Negativ ggü. BMW 225xe: Größere Batterie;
- Saldo (geschätzt): - 9.000 Euro

Verbesserungspotential:

Wo kann man den Hebel ansetzen, um noch weiter runterzukommen im Verbrauch, im Gewicht und in den Kosten?

Gewichts- und Kostenpotentiale: Die Zeit arbeitet für uns. Akkus werden immer leistungsfähiger und billiger.

Verbrauchs- und CO2-Potentiale: Am Elektroantrieb lässt sich noch die eine oder andere Wattsekunde einsparen. Die Frage ist, lohnt sich der Aufwand. Mehr Potential

bietet der Verbrennungsmotor mit seinen Wirkungsgraden im Teillastbereich. Im nächsten Kapitel, in der Konfiguration der sog. Standardauslegung, wird gezeigt, wie es geht.

Abschließende Bewertung des Minimalkonzepts:

Durch radikales Abspecken des Verbrennungsmotors ist es uns gelungen, die Herstellkosten zu senken. Die eingesparten Kosten stecken wir umgehend in eine leistungsfähige Batterie mit der doppelten Kapazität wie bisherige Plug-In-Hybride. Das ursprüngliche Ziel, eine elektrische Reichweite von 100 Kilometern unter allen Betriebsbedingungen, wurde leider nicht erreicht, dazu müsste man noch mehr in den Akku investieren.

Verbesserung Elektroantrieb im Winter: Einer der Vorteile des Hybridkonzepts ist jedoch, dass man im Winter nicht mit kalter Batterie und schlechtem elektrischem Wirkungsgrad auf die Piste gehen, oder die wertvollen Elektronen in der Fahrzeugheizung verbraten muss – so wie die BEVs. Hier hilft uns der Verbrennungsmotor unentgeltlich mit seiner Abwärme. Die extrem niedrigen Reichweiten von Elektroantrieben im Winter können wir auf diese Weise geschickt umgehen.

80 Prozent elektrisch: Die verhältnismäßig große Batterie katapultiert das Fahrzeug fast schon in die Regionen von BEVs. Rein elektrisches Fahren ist dann für mindestens 80 Prozent aller Fahrten möglich. Der Vorteil des PHEVs gegenüber dem BEV in dieser Disziplin ist, dass man die elektrische Reichweite bis zum letzten Elektron ausschöpfen kann, ohne Gefahr des Liegenbleibens. Fahrer eines BEVs sollten schlauerweise immer ein gehöriges Polster im Akku übrig lassen.

Nur noch 20 Prozent Kaltstarts: Übernimmt der Elektroantrieb 80 Prozent, bleiben für den Verbrenner nur noch 20 Prozent übrig. D.h. es entfallen viele Kaltstarts mit ihrem Ausstoß von ungereinigten Abgasen und hohem Verschleiß.

Hohe Flexibilität für den Fahrer: Eine große Batterie in Plug-In-Hybriden eröffnet dem Fahrer völlig neue Möglichkeiten der Nutzung, z.B. kostenorientiert. Er kann den Schwerpunkt auf elektrisches Fahren legen, wenn der Strom billig ist oder sich eine kostenlose Zapfsäule in Reichweite befindet. Oder er fährt mehr verbrennungsmotorisch in Zeiten von billigem Benzin.

Kostenlose Parkplätze: Die Kommunen und bestimmte Einkaufszentren überbieten sich förmlich in der Bereitstellung von Stromzapfsäulen. Damit verbunden ist natürlich immer ein kostenloser Parkplatz, der dann den armen Nutzern von fossiler Energie fehlt. Selten sieht man dort ein Elektromobil Strom saugen, zu 95 Prozent stehen die Parkplätze leer. Der Besitzer eines PHEV kann diese Parkplätze nutzen, er muss nur als Alibi-Funktion sein Vehikel mit der Säule verbinden. Sollte die Säule defekt sein oder der Parkplatz belegt – für PHEV kein Problem, für den BEV schon.

Die Zukunft:

Zulieferfirmen, egal ob für Einspritzpumpen, Abgasanlagen oder anderen Bauteilen des Verbrennungsmotors sehen schwarz für die Zukunft. Kein Wunder, wenn man sieht, mit

welcher Wucht die BEVs in den Markt gedrückt werden. Dazu kommt noch ein allgemeiner Rückgang der Stückzahlen, und schon stehen viele mit dem Rücken zur Wand. Entlassungen und Kurzarbeit, damit kann man kurzfristige Einbrüche abfedern, aber langfristig nicht überleben.

Was brauchen die Firmen, die jetzt bedingungslos am Tropf des Verbrennungsmotors hängen? Entweder ein zweites Standbein im Elektrogeschäft, oder eine Perspektive für die Verbrennung von fossilen Energien, wenn auch auf deutlich niedrigerem Niveau. Kann unser PHEV diese Perspektive bieten? Theoretisch schon, aber gut gemacht muss er sein, nicht nur gut gemeint.

Es gab einmal die Direktive, ausgegeben von der Bundesregierung, die Technologieführerschaft beim Elektroantrieb zu übernehmen. Davon kann heute keine Rede mehr sein, obwohl viele, viele Millionen in Forschung und Entwicklung investiert wurden.

Wie wär's? Vielleicht sollte sich die deutsche Autoindustrie auf den PHEV konzentrieren, und hier in gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen das Optimum herausholen. Dann hätte auch die Zulieferindustrie wieder eine Daseinsberechtigung.

Ein entscheidender Schachzug zugunsten des PHEV könnte auch sein, ihn bei den Kaufprämien gegenüber dem BEV zu bevorzugen. Natürlich nur diejenigen, die mehr als 50 Kilometer elektrisch zurücklegen und nicht die, die damit nur ihre CO₂-Werte im Flottenverbrauch schönen.

Ist die deutsche Autoindustrie lernfähig und wendig genug? Die Erfahrungen der Vergangenheit mit der deutschen Industrie sprechen dagegen. Wie sagte bereits Nietzsche:

„Viele sind hartnäckig in Bezug auf den einmal eingeschlagenen Weg, wenige in Bezug auf das Ziel.“

Jacob Jacobson

www.der-autokritiker.de