

Hybridfahrzeuge, Energiespeicher und Betriebsstrategien in der modernen Mobilität

Eine technologische Bewertung und Hinterfragung der Praxisrelevanz aus Kundensicht im Zuge einer interdisziplinären Systembetrachtung

Dipl.-Ing. Armin Buchroithner und Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader

Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, TU Graz, Inffeldgasse 21b/II,
8010 Graz, Austria, Telefon: +43 (316) 873 - 7363, armin.buchroithner@tugraz.at

Kurzfassung:

Aufgrund des noch immer steil nach oben zeigenden Globalisierungs- und Mobilisierungstrends kann eine Verbrauchs- und Emissionsreduktion im Transportsektor nur durch eine Kombination unterschiedlicher weitreichender Maßnahmen erreicht werden. Die über Jahrzehnte von Leistungssteigerung geprägte, oft isolierte technische und komponentenbezogene Entwicklung der Fahrzeuge muss durch eine systemische und interdisziplinäre Optimierung abgelöst werden. Das Verbesserungspotential des konventionellen Antriebsstranges wird immer geringer, da sich die dabei eingesetzten Technologien asymptotisch ihrem theoretisch erreichbaren Optimum nähern. Das bedeutet, dass zunehmend äußere Parameter, vom zu erwartenden Verkehrsaufkommen über die geographischen Gegebenheiten bis hin zur Psychologie des Endkunden – also Aspekte eines *Supersystems* – beachtet werden müssen, um die maschinenbaulich-technischen Elemente des Fahrzeuges – das *Subsystem* – adäquat gestalten zu können.

Das erste Kapitel repräsentiert eine ausführliche Situationsanalyse und skizziert Europa im Zeichen der Energiewende. Statistische Betrachtungen auf Basis von Datensätzen der *Europäischen Kommission* weisen auf die Bedeutung des Transportsektors bei der Energieeinsparung hin. Mit der Erörterung der Frage, wie die zukünftige Mobilität aussehen kann, wird auf einen von nun an überwiegend technischen Diskurs übergeleitet.

Die durch Hybridisierung des Antriebsstranges gewonnenen Freiheitsgrade bedingen ein komplexes Optimierungsproblem des Gesamtfahrzeuges. Eine absolut kritische Schlüsselkomponente stellen hier nachhaltige, mobile Energiespeicher dar, welche einem übersichtlichen Technologievergleich unterzogen werden. *Kapitel 2* beschreibt des Weiteren die Systemabhängigkeit der energietechnisch relevanten Komponenten im modernen Hybridfahrzeug und weist auf das große Optimierungspotential im Zusammenhang mit meist unbeachteten Einflussgrößen, wie zum Beispiel der psychisch-intuitiven Energiewahrnehmung des Kunden hin.

Kapitel 3 und 4 beschäftigen sich mit der energetischen Optimierung von Nutzfahrzeug und PKW respektive. Dabei wird, unter stetiger Hinterfragung der Praxisrelevanz, vor allem auf die Wahl von Energiespeicher und Betriebsstrategie eingegangen.

Keywords: Hybridfahrzeug, Energiespeicher, Betriebsstrategie, Mobilitätskonzept, Verbrauchsoptimierung, Schwungradspeicher, Energiepsychologie, Elektrofahrzeug

1. Einleitung

1.1. Ausgangssituation – Europa in der Energiewende

Das wirtschaftlich und politisch bedingte Streben Mitteleuropas nach der Unabhängigkeit vom Importgut Öl bewirkte einen Boom im Bereich der erneuerbaren, vor allem auch *volatilen Energiequellen*, wie Wind und Sonnenenergie. Hier liegt eine der wesentlichen Herausforderungen in der Versorgungs- und Bedarfsglättung durch Speicherung von (vorwiegend elektrischer) Energie. Die fehlende Speicherbarkeit wird nicht umsonst als eine der sieben Paradigmen der Energiewirtschaft bezeichnet [1]. Darüber hinaus gilt es – um vor allem die CO₂-Emissionen in einem vertretbaren Rahmen zu halten, den Primärenergiebedarf weiter zu senken.

Betrachtet man Abbildung 1 links, so erkennt man, welche Energiesektoren das größte Einsparungspotential bieten. Das Erreichen niedriger Emissionsgrenzwerte kann jedoch weder durch eine politische Reglementierung alleine, noch durch bloße Effizienzsteigerung der Fahrzeuge erfolgen, sondern ist vor allem auf das Bewusstsein und den Willen engagierter Bürger angewiesen. [2] Eine intensive Zusammenarbeit zwischen Politik, Gesetzgeber, Industrie und Kunden kann aber nur dann erfolgen, wenn eine kohärente Auffassung des Begriffs Energie gegeben ist. Umfragen des *Instituts für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation* der TU Graz haben ergeben, dass Energie eine physikalische Größe ist, welche wir Menschen nur äußerst schlecht wahrnehmen und einschätzen können [3]. Dieser *energiepsychologische Umstand*, welcher in Abschnitt 2.3 noch genauer erläutert wird, führt unweigerlich zu einem teilweisen Fehlverhalten der Bevölkerung im Umgang mit unseren energetischen Ressourcen.

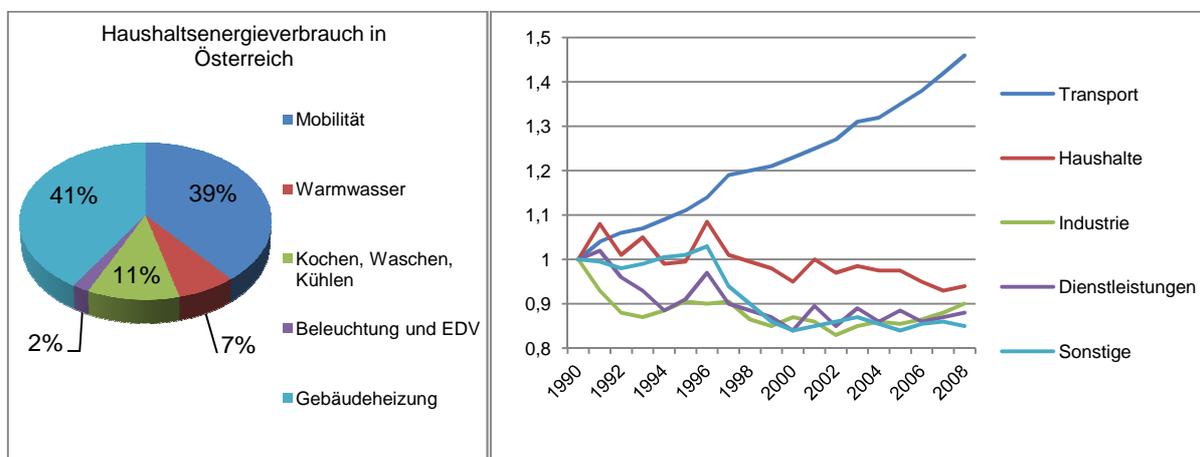


Abbildung 1: Links: Durchschnittlicher Energieverbrauch pro Haushalt in Österreich inkl. Mobilität [4]
Rechts: Relative CO₂-Emissionen der verschiedenen Sparten in der EU-27 normiert auf den Verbrauchswert von 1990 [5]

1.2. Die Rolle des Transportsektors

Nirgendwo sonst wirkt sich die schwierige Speicherbarkeit von Energie so eklatant aus, wie bei mobilen Anwendungen. Der Schlüssel zur Fahrzeughybridisierung, -elektrifizierung oder zum „Zero Emission Vehicle“ im Allgemeinen, liegt daher nicht wie man laienhaft annehmen könnte in der Verbesserung der elektrischen Antriebsmaschine, sondern in der Entwicklung effizienter, mobiler Energiespeicher.

Aber das Thema „nachhaltige Mobilität“ ist längst kein rein technologisches mehr. Viel eher ist es eine Frage der Interaktion äußerer Parameter wie Politik, Marketing, Wirtschaft und auch Psychologie des Kunden geworden. Würde man die Effizienz der Mobilität strikt aus einem technisch-energetischen Blickwinkel betrachten, so erscheint eine Verlagerung des LKW-Transits auf die Schiene als eine naheliegende, erste Lösung [6]. Theoretisch könnte man die bestehende Infrastruktur nutzen und hätte somit auf einen Schlag den Anteil der reinen „E-Mobility“ im Verkehr vervielfacht. Dazu kommt noch, dass durch eine überwiegende Netzgebundenheit der Schienenfahrzeuge in Mitteleuropa der aus erneuerbaren Energien gewonnene Strom direkt genutzt werden und rekuperierte Bremsenergie (z.B. in Pump-Speicherkraftwerken) gespeichert werden kann. Paradoxerweise ist der Anteil des Schienenverkehrs in Europa seit den Siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts aber konsequent zurückgegangen. Im Jahr 1970 lag der Anteil des Energiebedarfs für den Transport von Personen und Gütern auf der Schiene bei 22%, im Jahr 2010 bei etwa 5%. Er ist also auf ca. 1/4 des ursprünglichen Wertes gesunken. Dazu kommt noch, dass der Transportsektor – verglichen zu den restlichen Energieverbrauchern in der EU - das stärkste Wachstum verzeichnet. (Siehe Abbildung 1, rechts.)

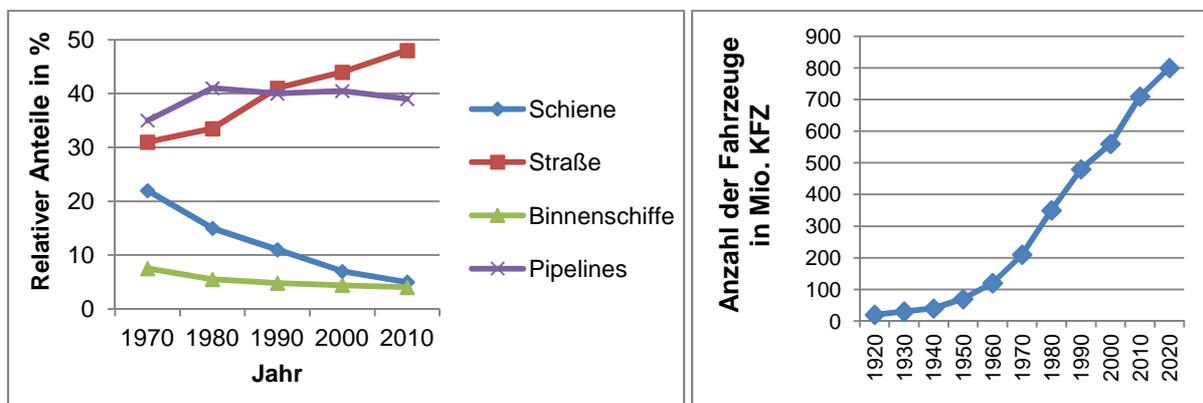


Abbildung 2: Links: Anteile des Energieverbrauchs nach Transportsektor in der EU basierend [2] und [7] Rechts: Verlauf des weltweiten Fahrzeugbestandes, erstellt auf Basis der Daten von [8]

Der Anteil der Elektrofahrzeuge an den Gesamtzulassungen fällt jedoch bescheiden aus. Im Jahr 2010 waren im *EU-Durchschnitt* nur 0,07% der Fahrzeuge elektrisch angetrieben, wobei Norwegen mit 1,23% als Spitzenreiter hervorging. [9]

Daraus lassen sich drei wesentliche Aussagen ableiten:

1. Es ist offensichtlich, dass die Entwicklung von nachhaltigen Technologien alleine nicht genügt, da diese ja zum Teil schon bestehen (Beispiel Schienenverkehr), aber entweder nicht, oder nicht ausreichend genutzt werden.
2. Will man sich nicht auf eine Bewusstseinsänderung der Bevölkerung verlassen, so müssen Technologien entwickelt werden, welche *nachhaltiges Handeln* für den Menschen übernehmen ohne ihn in seiner Freiheit bzw. seinem Komfort merklich einzuschränken.
3. Um die Nutzung und Akzeptanz effizienter Fahrzeuge und nachhaltiger Mobilitätskonzepte zu steigern, reichen wirtschaftliche Motive alleine nicht aus. Neben politischen und legislativen Maßnahmen muss vor allem der Kundennutzen durch einen Mehrwert (Zeiteinsparung, Komfort, Image, etc.) maximiert werden.

1.3. Die Zukunft der Mobilität

Die in 1.1 und 1.2 beschriebenen Szenarien verdeutlichen, dass Worte wie „Energiewende“, „Elektrifizierung“ und „Nachhaltigkeit“ nicht ohne Grund immer öfter auf den Titelblättern der Tageszeitungen zu finden sind. Während im Gebäudesektor Wärmeisolierung, Kraft-Wärme-Koppelung und alternative Heizsysteme wie die in Österreich erfundene Wärmepumpe auf dem Vormarsch sind, scheint sich die Automobilindustrie auf keine einheitliche Lösung einigen zu können oder wollen. Der einstige gemeinsame Nenner und Hoffnungsträger der großen Fahrzeugkonzerne, die Elektromobilität, scheint sich in einer Krise zu befinden. Wie so oft in einem Produktzyklus folgt der ersten Euphorie das „Tal der Tränen“. Dies spiegelt nicht nur die sich in Grenzen haltenden Verkaufszahlen (wie bereits in 1.2 beschrieben) und die mangelnde Kundenzufriedenheit¹ bei den reinen Elektrofahrzeugen wieder, sondern auch das unisonore Echo der Fahrzeugingenieure, beispielsweise am *VDI-Kongress für Innovative Fahrzeugantriebe 2012*. Im Rahmen dieser Veranstaltung bezeichnete *Prof. Günter Hohenberg* den E-Mobility Hype als „in einer Phase der Ernüchterung“ angelangt [10].

Wie sieht also die Zukunft der modernen Mobilität aus? Wie sieht sie die Fahrzeugindustrie und wie der Kunde? Werden neue Batteriekonzepte wie die Zink-Luft-Batterie dem Elektrofahrzeug zur raschen Wiedererlangung seiner einstigen Popularität verhelfen, oder wird ein Hybridfahrzeug das Rennen machen? Und wenn ja, welches? *Mild*, *Micro* oder *Full*? Oder behält *Daimler* Recht, und die Brennstoffzelle setzt sich durch? Wenn man den aktuellen Ergebnissen der ökonomischen Transformationsforschung Glauben schenkt, so reichen nachhaltige Technologien nicht aus, sondern es bedarf eines völlig neuen Mobilitätskonzeptes, basierend auf sogenannter „voluntary simplicity“ (freiwillige Einfachheit) [11].

Die verschiedenen Ansätze und Zielsetzungen der Automobilgiganten und das Bestreben, einen eignen Standard zu etablieren, resultiert in einer stark divergenten und isolierten Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf dem Sektor der emissionsarmen und emissionsfreien Mobilität. Daraus lässt sich ableiten, warum manche Technologien, wie zum Beispiel der Schwungrad- oder Druckluftspeicher, bis dato ein entsprechendes Schattendasein führten. Demgegenüber klingt die Vorstellung, dass die Fahrzeugindustrie „mit vereinten Kräften“ ein Ziel verfolgt, verlockend, birgt aber die Gefahr des Übersehens der wahrlich revolutionären Technologien mit sich. Der bekannte Finanzmathematiker und Philosoph *Nassim Nicholas Taleb* bezeichnet selten auftretende, aber wahrlich bahnbrechende Erneuerungen als „*Black Swans*“. [12] Basierend auf Talebs Werken verfasste der US-amerikanische Geschäftsmann und Investor im Bereich der Umwelttechnologie, *Vinod Khosla* die „*Black Swan Thesis of Energy Transformation*“ [13]. *Khosla* ist der Ansicht, dass inkrementelle Verbesserungen nicht zielführend sind, um monumentale, lebensverändernde Fortschritte im Bereich der Energietechnik zu erlangen. Eine sukzessive Effizienzsteigerung, vor Allem bei der Energieerzeugung, kann durch die damit verbundene Preissenkung sogar zu einem steigenden Verbrauch durch die Bevölkerung führen. Sinken die Betriebskosten der Fahrzeuge, so können sich mehr Menschen einen PKW leisten, und die CO₂-Bilanz verschlechtert sich trotz des geringeren spezifischen Verbrauchs. Dieses Phänomen wird als *Rebound Effect* bezeichnet. [14]

¹ Probleme wie die deutlich verkürzte Reichweite der EVs im Winter sowie die Gewährleistungs- und Entsorgungsfrage der Batterien konnten bis dato nicht vollends gelöst werden.

Aber egal, auf welchen Lösungen die zukünftige Mobilität aufbauen wird, es gilt die uns zu Verfügung stehenden Technologien nicht nur zu beherrschen und zu erzeugen, sondern auch effizient einzusetzen. Und gerade im Automobilsektor spielen äußere Faktoren, wie Fahrzyklus oder Verkehr, und nicht zuletzt der Kunde eine entscheidende Rolle.

2. Komplexität, Bedeutung und Gesamtsystemabhängigkeit der Fahrzeugbetriebsstrategie

2.1. Systembetrachtung – Fahrzeug, Fahrer und Umwelt

Besonders seit der Etablierung genormter Testzyklen, wie z.B. des *New European Driving Cycle (NEDC)*, herrscht landläufig die Meinung, dass die Verantwortung einer Verbrauchsreduktion der Fahrzeuge in erster Linie bei den Fahrzeugentwicklern liegt, und daher einer rein technische Frage ist. Eine Optimierung der Verbrennungskraftmaschine (VKM), Leichtbau und ein smartes Energiemanagement können zweifellos zur Reduktion des Energieverbrauchs beitragen, aber oftmals bergen äußere Einflüsse, wie die Wahl des Fahrzeuges an sich und dessen Einsatzprofil ein erheblich größeres Potential. Da in manchen Fällen eine exakte Quantifizierung und Ermittlung des wichtigsten Einflussparameters nicht möglich ist, gilt es fortan das Fahrzeug als ganzheitliches, systemabhängiges Optimierungsproblem zu betrachten. Dies bedeutet gleichermaßen, dass all jene Parteien, welche das *Supersystem* des Fahrzeuges gestalten, in einen interdisziplinären Prozess involviert sind und Verantwortung für dessen Entwicklung übernehmen müssen. Abbildung 3 zeigt die Wechselwirkung zwischen Hybridfahrzeug, *Subsystem* (bestehend aus den wesentlichen technischen Komponenten des Fahrzeuges) und *Supersystem*, welches jene äußeren Einflüsse beschreibt, die auf Fahrzeugtopologie, Betriebsstrategie und letzten Endes Energieverbrauch Einfluss haben.

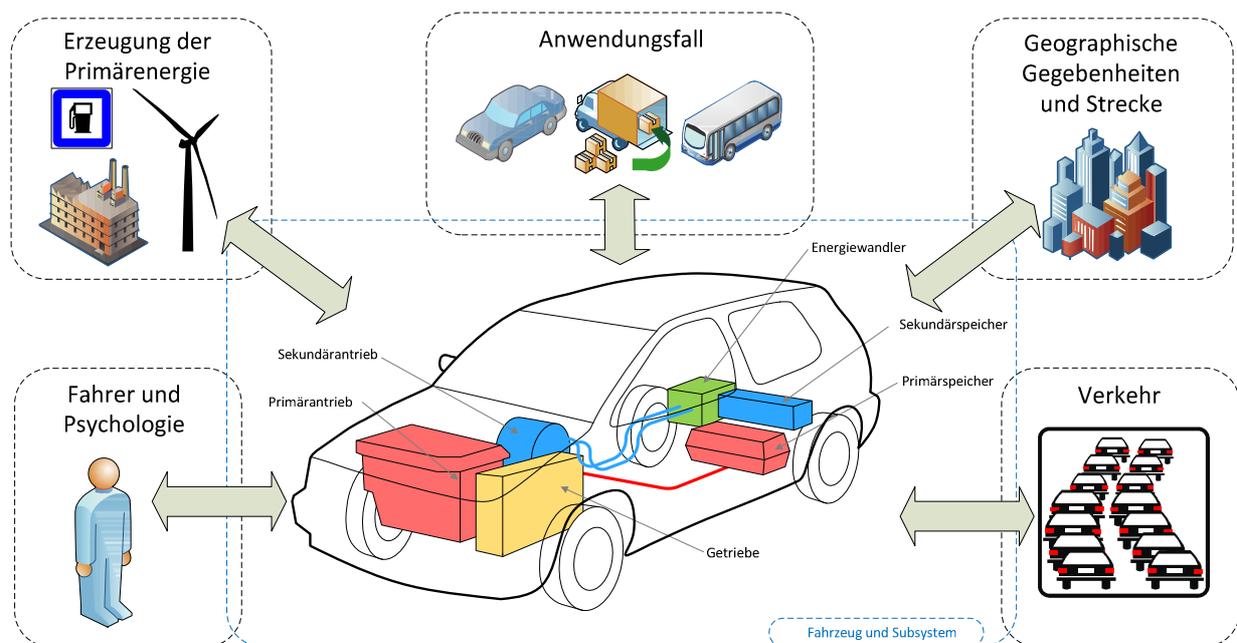


Abbildung 3: Wechselwirkung zwischen Hybridfahrzeug, Sub- und Supersystem

2.2. Subsystem

2.2.1 Fahrzeugtopologie

Seit einigen Jahren stehen dem Kunden immer mehr Antriebskonzepte und Fahrzeugtopologien zu Verfügung. Dabei geht es nicht nur um die Wahl zwischen konventionellem oder elektrischem Antrieb, da besonders die diversen „Zwischenstufen“ ,also Hybridvarianten (Seriell vs. Parallel, Micro vs. Full Hybrid) verschiedenste Eigenschaften aufweisen. Nur selten gelingt es dem PKW-Kunden, sein eigenes Anforderungsprofil ausreichend und objektiv zu definieren und ein dementsprechend optimales Antriebskonzept zu wählen. Abgesehen davon sind beim PKW-Kauf meist keine wirtschaftlich-energetischen Kriterien ausschlaggebend, wie in Abschnitt 2.3.3 noch genauer beschrieben wird. Im Nutzfahrzeugsektor (vergleiche Abschnitt 3) hingegen entscheidet in erster Linie die monetäre Amortisationsdauer über die Fahrzeugtopologie.

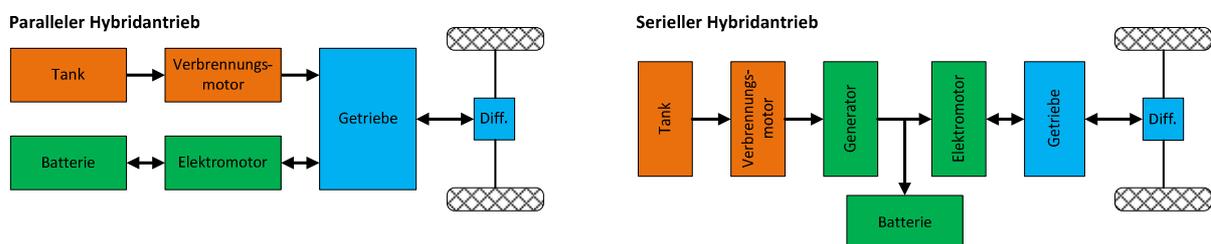


Abbildung 4: Topologie eines *Parallelen* und *Seriellen Hybrides* (hauptsächlich schwere NFZ) [15]

Fahrzyklus (in Abschnitt 3.1 und 4.1 noch genauer analysiert) und Fahrzeugtopologie beeinflussen das energetische Rekuperationspotential. Umgekehrt beeinflussen die technischen Eigenschaften der Nutzbremse auch die Fahrweise. Als Beispiel sei hier der *Volvo S60 Flywheel KERS Hybrid* kurz diskutiert. Wie Abbildung 5 zeigt, wirkt ein mechanischer Schwungradspeicher auf die Hinterachse des Fahrzeuges, während die Vorderachse mit einem konventionellen Antriebsstrang verbunden ist. Wird das Fahrzeug verzögert, so wird die kinetische Energie auf das Flywheel übertragen und dessen Drehzahl erhöht. Bei Bedarf kann die Energie des Schwungrades dann wieder genutzt werden, um das Fahrzeug zu beschleunigen.

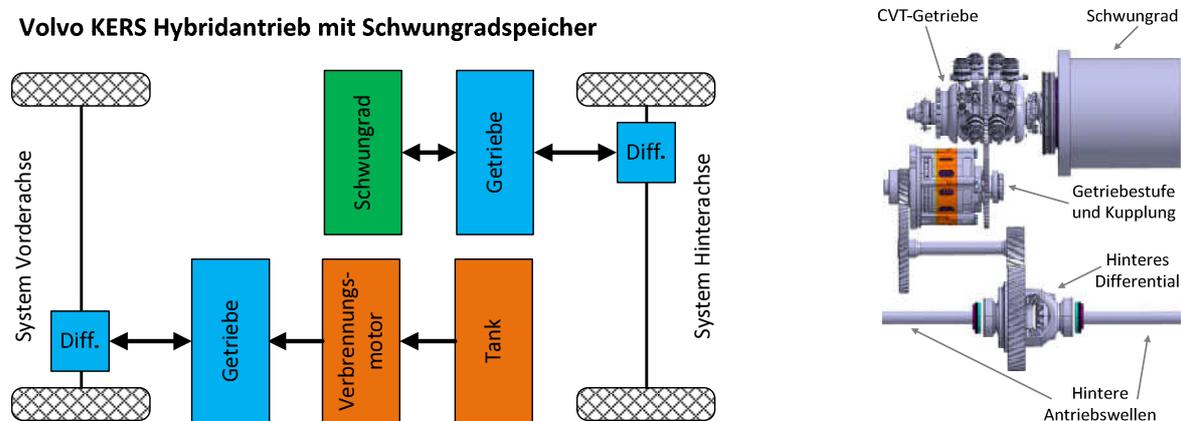


Abbildung 5: Konzept des *Volvo S60 Flywheel KERS* und Detail des Hinterachsantriebs [16]

Aufgrund der dynamischen Achslastverteilung muss die Bremsleistung der Hinterräder jedoch erheblich niedriger sein als die der Vorderräder (übliche Bremskraftverteilung vorne

zu hinten: 80/20 bis 60/40), wodurch nur ein Teil der theoretisch nutzbaren Energie rekuperiert werden kann. Würde die Nutzbremmung auf die Vorderachse wirken, wäre das bereits ein Vorteil. Optimal wären hingegen vier Radnabenmotoren, welche generatorischen Betrieb erlauben. Allerdings würde sich in diesem Fall nicht nur die ungefederte Masse des Fahrzeuges erhöhen, sondern es wäre auch ein elektrischer Energiespeicher mit entsprechend hoher Leistung sowie entsprechendem Energieinhalt erforderlich.

2.2.2 Eigenschaften des Primärtriebs

Prinzipbedingt erreicht die ideale, *vollkommene VKM*² einen Wirkungsgrad von 67%; in der Praxis schwankt dieser zwischen 0% (Leerlauf) und 40% (Bestpunkt). [17] Generell kann davon ausgegangen werden, dass sich der durchschnittliche Wirkungsgrad einer VKM bei überwiegendem Transientbetrieb (*Stop-and-Go* Verkehr) markant verschlechtert. Abbildung 6 links zeigt, dass der höchste Wirkungsgrad (hier $\eta = 0,29$) nur in einem relativ schmalen Drehzahlbereich in Kombination mit hoher Last erreicht wird. Die durch Hybridisierung des Antriebsstrangs ermöglichte Lastpunktverschiebung wirkt diesem Phänomen entgegen, bringt jedoch das Problem mit sich, dass Motorakustik und Fahrdynamik von einander entkoppelt werden und ein für den Fahrer ungewöhnliches bis unangenehmes Verhalten an den Tag legen. Diese *psychoakustischen Aspekte* verhindern meist auch den effizienten Betrieb des herkömmlichen PKWs durch extrem niedertouriges Fahren. Diese so genannte *Overdrive*-Charakteristik wird vom Fahrer abgelehnt, da er das Brummen des Antriebsstranges als „schlecht für den Motor“ interpretiert [18]. (Vergleiche auch Kapitel 2.3.3.)

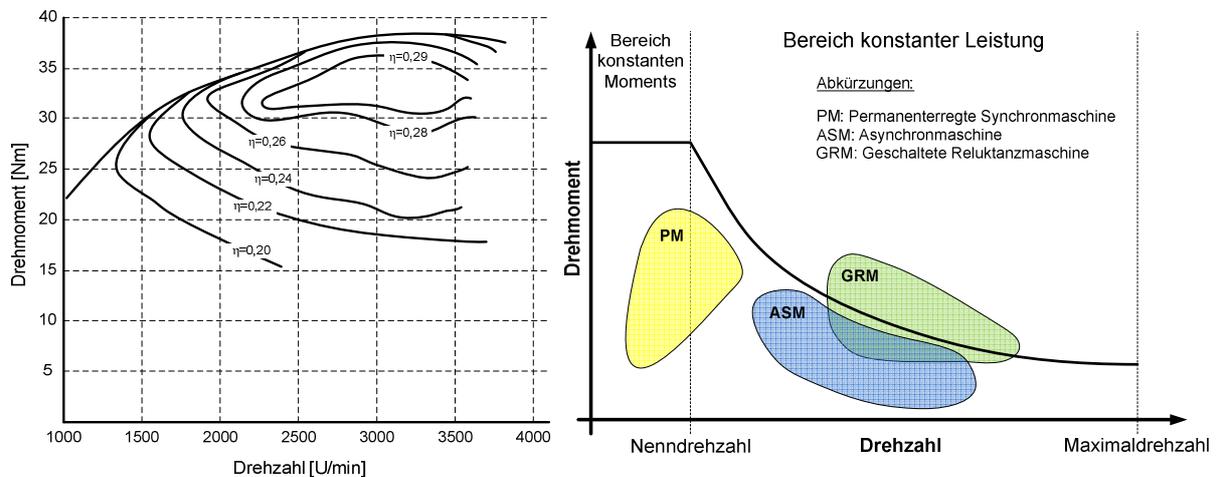


Abbildung 6: Links: Muscheldiagramm eines typischen Otto-Verbrennungsmotors (*Renault Clio*) [19] Rechts: Betriebsbereiche der unterschiedlichen E-Maschinen, aus den Daten von [15]

Ein Elektromotor hingegen weist ein vorwiegend last- und drehzahlabhängiges akustisches Verhalten sowie einen eklatant besseren Teillastwirkungsgrad auf. Im Vergleich zur VKM bieten ASM und GRM einen relativ großen Drehzahlbereich konstanter Leistung, während PM sehr hohe Anfahrmomente abgeben (vergleiche Abbildung 6, rechts). Aber diese und weitere Vorteile, wie seine Wartungsfreiheit, können nur dann vollends ausgeschöpft werden, wenn entsprechende elektrische Energiespeicher verfügbar sind.

² VKM unter Annahme eines reibungsfreien und adiabaten Verbrennungsprozesses.

2.2.3 Eigenschaften des Energiespeichers

Neben der bereits in Abschnitt 1 beschriebenen wichtigen Aufgabe der Sicherung einer netzgebundenen Energieversorgung durch volatile Quellen, gewinnen Energiespeicher auch im Automobilsektor zunehmend an Bedeutung. Funktionen wie Rekuperation und Lastpunktverschiebung als Produkt der Hybridisierung des Antriebsstranges stehen in enger Wechselwirkung mit den energetischen Eigenschaften der Speicherkonzepte. Die exakte Auslegung eines Energiespeichers für Hybridfahrzeuge kann nur auf Basis eines vorgegebenen Fahrzyklus erfolgen. Generell herrscht ein Streben nach hoher Energie- und Leistungsdichte bei gleichzeitig geringen Kosten und guter Umweltverträglichkeit vor. Leider stehen diese Eigenschaften oft in einem unumgänglichen, physikalischen Widerspruch.

Tabelle 1: Eigenschaften gängiger Energiespeicher für Hybridfahrzeuge und qualitative Bewertung

	Li-Ion Batterie	PB- Batterie	Ni-Cd Batterie	Super-/ UltraCap	Druckluft- speicher	Hydraulik Speicher	Schwungrad -speicher
Energiedichte	***	**	***	*	*	*	*
Leistungsdichte	**	**	**	***	***	***	***
Lebensdauer	*	**	*	**	***	***	***
Kosten	**	**	**	*	***	**	*
Wirkungsgrad	***	***	***	***	*	*	**
Ladedauer	*	*	**	***	**	**	***
Recycling	*	**	*	*	***	***	***
Herstellungsaufwand	*	**	*	*	***	***	**

Tabelle 1 vergleicht einige mobile Energiespeicher im Zuge einer ungefähren, qualitativen Bewertung. Es ist deutlich zu erkennen, dass chemische und elektrische Energiespeicher zwar hohe Energiedichten aufweisen, aber in Punkto Rezyklierbarkeit und Herstellungsaufwand schlechter abschneiden als die mechanischen Alternativen.

Traditioneller Weise setzt die technische Forschungs- und Entwicklungsarbeit bei den unter 2.2.1 bis 2.2.3 diskutierten Punkten (also den Elementen des Fahrzeug-*Subsystems*) an. Der Einfluss auf das Gesamtsystem bzw. das physikalisch mögliche Entwicklungspotential sind aber durch Naturgesetze begrenzt.

2.3. Supersystem

2.3.1 Geographie und Infrastruktur

Es muss unbedingt festgehalten werden, dass der Einfluss des Supersystems auf die Gestaltung des Fahrzeuges, und folglich dessen Subsystem, stärker ist als umgekehrt. Das ist auch historisch bedingt, da das Automobil um ein vielfaches jünger ist als die Umgebung in der es sich bewegt. Das Layout vieler mitteleuropäischer Städte wurde im Mittelalter oder bereits davor auf Basis strategischer, militärischer oder agrar- und versorgungstechnischer Überlegungen definiert. Verkehrswege und Energieversorgung spielten damals quasi keine Rolle und konsequenter Weise sind manche Straßenzüge, Bezirke oder gar ganze Regionen aus heutiger, energetischer Sicht nicht optimal für den Einsatz von Fahrzeugen geeignet. Die Umgehung dieses Problems durch Anlegen z.B. eines U-Bahnnetzes ist nicht immer ein gangbarer Weg. Jüngere Städte, wie wir sie vielerorts in den USA finden, verfügen bereits

über ein Straßennetz, welches für die Nutzung mit dem PKW „optimiert“ ist. Dies betrifft aber meist nur räumliche Aspekte (z.B. Parken), und Probleme wie die Anpassung des Energieversorgungsnetzes auf alternative Fahrzeugantriebe bleiben auch in diesem Fall bis dato ungelöst. In wie weit Geographie und Infrastruktur in direkter Wechselwirkung mit dem Fahrzeug und dessen Energiespeicher stehen, veranschaulichen die folgenden Beispiele:

- Die Anzahl der Start-Stop-Zyklen durch Ampeln oder Kreuzungen sowie geodätische Höhendifferenz und Kurvenreichheit einer Strecke bestimmen das Rekuperationspotential und in weiterer Folge Energieeinsparungspotential für Hybridfahrzeuge. Grundsätzlich gilt, je dynamischer der Fahrzyklus, desto eher lassen sich die Vorteile eines Hybridfahrzeuges mit Nutzbremmung ausnutzen. (Vergleiche Abbildung 13)
- Plug-in Hybride sowie reine EVs sind auf die Verfügbarkeit eines Hochleistungs-Stromnetzes angewiesen. Während ein gut ausgebautes Tankstellennetz den reibungsfreien Betrieb eines konventionelleren PKWs sichert, müssen EVs – selbst wenn die Batterietechnik eine Schnellladung zuließe – oftmals mit bescheidenen Ladeleistung von wenigen kW auskommen, um das Netz nicht lokal zu überlasten. Sogar bei einem 400V/100A (40kW) Anschluss ergäben sich bei einer Batteriekapazität von 20 kWh, also einer Reichweite von 100~200 km, Ladezeiten von 30 Minuten. [20] Das viel zitierte *Battery-Swapping* könnte zwar die Ladedauer auf Raststationen verringern, bedingt aber, dass sich alle Hersteller auf ein einheitliches Batteriesystem einigen.
- Auch wenn das Wasserstoffauto aufgrund der Fortschritte in der Batterietechnik in den letzten Jahren etwas in den Hintergrund gedrängt wurde, so könnte der Aufbau einer flächendeckenden Wasserstoffversorgung durch Nutzung des bestehenden Gasnetzes für zusätzliche Attraktivität sorgen. Dennoch werden die Investitionskosten für die Errichtung der erforderlichen Wasserstofftankstellen alleine in Deutschland auf mindestens 300 Millionen Euro geschätzt [21]. Aktuell stellt die Betankung eines Wasserstoffautos für den Privatkunden jedenfalls ein Problem dar.
- Auch Konzepte wie das „Luftauto“, welches ausschließlich durch komprimierte Luft angetrieben wird, scheitern an fehlenden Tankstellen und sind daher höchstens für kommerzielle Fahrzeugflotten mit einer eigenen Betankungsanlage bzw. Ladestation von Interesse.



Abbildung 7: PKWs ohne Ladeinfrastruktur: „Luftauto“ [22], Wasserstoffauto [23] und Elektroauto [24]

2.3.2 Verwendungszweck

Neben der Dynamik des Fahrzyklus (im Detail noch unter 3.1 und 4.1 analysiert) ist es vor Allem die *Vorhersagbarkeit* des Zyklus bzw. des Anwendungsprofils, welche für eine exakte Auslegung des Energiespeichers und der Antriebsstrategie eines Hybridfahrzeuges ausschlaggebend ist [25]. Während Nutzfahrzeuge – besonders im öffentlichen Nahverkehr – eine sehr gute Vorhersagbarkeit des Fahrzyklus aufweisen, kann dies von PKWs im

Allgemeinen nicht behauptet werden. Grund hierfür ist nicht nur das sehr individuelle Verhalten des Fahrers, sondern oftmals auch eine „Zweckentfremdung“ des PKW-Typs. Besonders auffällig konnte dieses Phänomen in den letzten Jahren im Segment der SUVs beobachtet werden. Obwohl diese Fahrzeuge für den leichten Geländeeinsatz und das Ziehen/Transportieren schwerer Lasten konzipiert sind, verlassen sie die asphaltierten Verkehrswege nur selten. Besonders in den USA, wo der Anteil dieser Fahrzeuge bereits fast 30% erreicht hat und weiter steigt, wird dieser Fahrzeugtyp oftmals als reines Stadtauto eingesetzt. Hier spielen vor allem psychologische Phänomene, wie in 2.3.3 beschrieben, eine wichtige Rolle. Einen Überblick über Marktanteile und Trends gibt Abbildung 8.

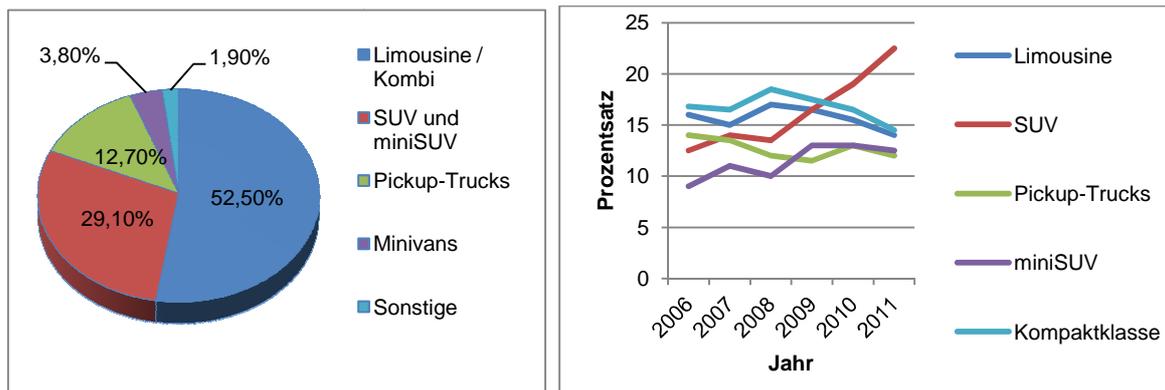


Abbildung 8: Anteile der PKW-Typen in den USA 2011 [26] und Verkaufstrends von 2006 bis 2011 [27]

2.3.3 Fahrer und Energiepsychologie

Aufgrund der hohen technischen Komplexität der modernen Transportmittel kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Bevölkerung ein aus energetischer Sicht „richtiges“ Mobilitätserhalten an den Tag legt. Untersuchungen des *Institutes für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation* der TU Graz haben wie eingangs erwähnt gezeigt, dass Energie eine hochgradig nichtintuitive, schwer fassbare physikalische Größe ist. Unter den Befragten, welche abschätzen sollten „was man mit 1 kWh Energie machen könne“ waren auch Absolventen von (u.a. technischen) Universitäten. (Vergleiche Abbildung 9.) Aber nicht nur die Fehleinschätzung des energetischen Aufwandes für die Bereitstellung von thermischer und mechanischer Energie, sondern auch andere sozio-psychologische Effekte beeinflussen das Mobilitäts- und Fahrverhalten des Kunden und in weiterer Folge die Architektur des Antriebsstranges.

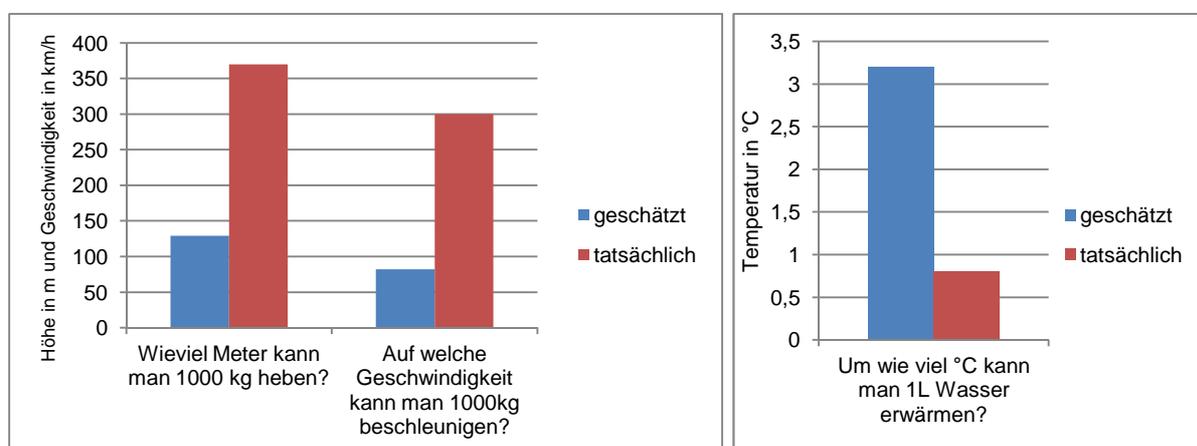


Abbildung 9: Antworten der österreichischen Bevölkerung auf die „1-kWh-Frage“ [3]

Mobilität wird mit folgenden symbolischen Attributen verbunden [28]:

- **Autonomie:** Selbstbestimmung und ein hoher Mobilitätsgrad können beinahe als Grundbedürfnis des modernen Menschen betrachtet werden. Ein Fahrzeug vermittelt dem Eigentümer Freiheit und soll diese auf keinen Fall einschränken.
- **Status:** Mit der Wahl eines Fahrzeuges kann nicht nur sozialer Status demonstriert werden, sondern auch die Bereitschaft in „grüne“ Technologien zu investieren. Nicht selten werden übermotorisierte, schwere Oberklassefahrzeuge auch als Hybrid angeboten (BMW X6, Porsche Cayenne, VW Touareg etc.), beruhigen somit lediglich das Gewissen des Käufers und tragen in keiner Weise zur nachhaltigen Mobilität bei.
- **Fahrerlebnis:** Beschleunigung, Geschwindigkeit, Straßenlage, Reichweite und Geräuschentwicklung sind einige der Fahrzeugeigenschaften, welche die Wahl des Fahrzeuges oder Verkehrsmittels im Allgemeinen erheblich beeinflussen. Unter anderem deshalb war die historische Entwicklung des Automobils bislang vorwiegend von Leistungssteigerung geprägt.

Ein weiterer Punkt, welcher mit der Elektrifizierung des Antriebsstranges zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist die *Psychoakustik*. Wie unter Punkt 2.2.2 bereits erwähnt, werden so genannte *Overdrive*-Getriebe aufgrund der niedrigen Motordrehzahl und dem somit niederfrequenten, „brummenden“ Geräusch trotz ihrer Effizienz vom Kunden kaum akzeptiert. [18]. Ein ähnliches Schicksal widerfuhr bislang auch dem CVT-Getriebe, welches mit seiner kontinuierlich variierbaren Übersetzung den Betrieb der VKM vorwiegend im Bestpunkt (ohne diskrete Schaltpunkte) erlaubt. Der Kunde erwartet bei Betätigung des Gaspedals aber eine Drehzahlsteigerung sowie direkte Proportionalität zur Geschwindigkeit. Als drittes Beispiel kann das derzeit hoch im Kurs stehende *Downsizing* der Antriebsmaschinen genannt werden. Zwar senkt die Reduktion der Zylinderzahl von 4 auf 2 den spezifischen Verbrauch tatsächlich, aber das dadurch veränderte Verbrennungsgeräusch veranlasst den Kunden zu einer höhertourigen, ineffizienteren Fahrweise.

3. Öffentlicher Nahverkehr und kommerzielle Fahrzeuge

Die Wahl der Betriebsstrategie und des Energiespeichers ist hierbei in erster Linie durch die Streckenführung und wirtschaftliche Aspekte bestimmt. Will sich eine Technologie im Bereich der Nutzfahrzeuge etablieren, so muss diese eine rasche monetäre Amortisation ermöglichen. Dabei sind nicht nur die direkte Reduktion der Betriebskosten (z.B. durch Kraftstoffeinsparung oder staatliche Förderungen) zu beachten, sondern auch sekundäre Effekte. Zu diesen gehört auch die Imagepflege des Verkehrsbetreibers oder der Fahrzeugflotte. Ein „grünes Image“ kann dazu beitragen, Kundenzahlen zu erhöhen, auch wenn tatsächlich keine direkte Reduktion der CO₂-Emissionen möglich ist.

3.1 Fahrzyklus und energetische Betrachtung

Für den Energetisch optimalen Betrieb eines konventionellen Antriebsstranges schlägt *Prof. Ernst Fiala* in [29] einen so genannten *Sägezahn-Zyklus* (vergleiche Abbildung 13) vor. Das Fahrzeug wird im Bestpunkt der VKM, also bei optimalem Wirkungsgrad bis zu einer Maximalgeschwindigkeit beschleunigt und rollt danach bis zur nächsten Haltestelle aus, ohne kinetische Energie durch die Reibungsbremse zu vernichten. Zwar wird dadurch der Kraftstoffbedarf für den entsprechenden Streckenverlauf auf den physikalisch kleinstmöglichen Betrag reduziert, aber in der Praxis ergeben sich folgende Probleme:

1. Es ist eine eigene Fahrspur von Nöten, da diese Strategie nicht in den bestehenden Verkehr integrierbar ist.
2. Die Fahrgäste würden keine extrem niedrigen Ausrollgeschwindigkeiten tolerieren und das Gefühl bekommen, mit einem anderen Verkehrsmittel „besser“ unterwegs zu sein.

Abhilfe können die durch Hybridisierung gewonnenen Freiheitsgrade schaffen. Sie ermöglichen folgende Betriebsstrategien und erleichtern die Integration des Fahrzeuges in die bestehende Verkehrslandschaft. Den soeben genannten Vorteilen stehen ein größerer technischer Aufwand, sowie eine längere Wirkungskradkette gegenüber.

1. **Lastpunktverschiebung:** Das Fahrzeug kann selbst bei optimalem Betrieb der VKM mit beliebiger Geschwindigkeit beschleunigt werden.
2. **Nutzbremmung:** Anstatt das Fahrzeug ausrollen zu lassen, kann die Bremsenergie zwischengespeichert und zur erneuten Beschleunigung genutzt werden.

Um diese Maßnahmen möglichst effizient umzusetzen, ist eine fahrzeugspezifische Schulung, welche mit professionellen Fahrern durchgeführt werden kann, von Vorteil. Zusammenfassend lässt sich aus den obigen Betrachtungen ableiten, dass Hybridisierung als sinnvolle, vor Allem kurzfristige Lösung für Fahrzeuge im urbanen Nahverkehr bzw. für Nutzfahrzeuge mit dynamischem Fahrzyklus im Allgemeinen angesehen werden kann.

3.2 Anforderungen an den mobilen Energiespeicher

Lastpunktverschiebung und Bremsenergieerückgewinnung bei Nutzfahrzeugen erfordern einen sekundären Energiespeicher mit folgenden Eigenschaften:

- Hohe Zyklenzahlen
- Hohe Leistungen bei mittlerem Energieinhalt
- Hohe Zuverlässigkeit (Kein Altern, Temperaturunabhängigkeit)
- Geringe Wartungs- und Betriebskosten.

Bei genauerer Betrachtung von

Tabelle 1 kann man feststellen, dass Schwungradspeicher diese Kriterien durchwegs erfüllen und eine gute Alternative zu den aktuell extrem populären Li-Ion-Batterien darstellen. Aufgrund der bis dato wesentlich geringeren Stückzahlen dieser *Flywheels* (üblicherweise Prototypen) sind jedoch die Anschaffungskosten noch relativ hoch.

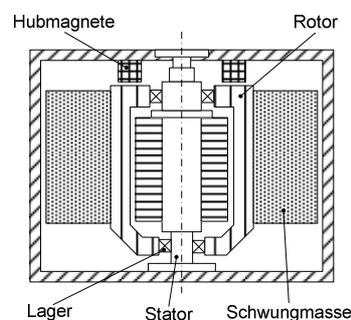


Abbildung 10: Schwungradspeicher für den Nahverkehr (Prototyp der TU Graz)

Die wirtschaftliche Rentabilität eines Umstiegs auf Hybridfahrzeuge für den Betreiber eines Verkehrs- und Transportunternehmens hängt aber auch von der momentanen

Förderlandschaft sowie der Preispolitik der Energieträger ab. Sie wurde im Detail in [30] untersucht.

4. Individualverkehr und PKW

Wie bereits in Abschnitt 1.3 erwähnt, sehen Skeptiker des Automobils eine reine Effizienzsteigerung des Antriebsstranges als ungenügend, da die damit verbundene Senkung der Betriebskosten einen *Rebound Effekt* mit sich bringen kann. Viel mehr braucht es den Umstieg von der PKW-orientierten Einstellung in Mitteleuropa zu einem ganzheitlichen Mobilitätskonzept, in welchem vor Allem der öffentliche Verkehr eine wesentliche Rolle spielt. Aber selbst wenn es gelingt, die *First-Mile/Last-Mile* Problematik³ in den Griff zu bekommen, ist aus heutiger Sicht nicht mit uneingeschränkter Kundenakzeptanz der öffentlichen Verkehrsmittel zu rechnen, wie Abbildung 11 zeigt.

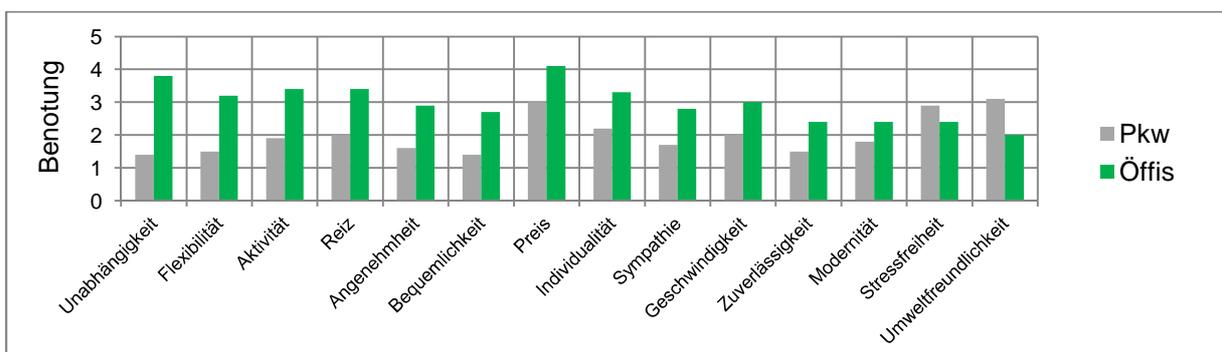


Abbildung 11: Bewertung (nach Schulnoten) von PKW und öffentlichem Verkehr aus Kundensicht [28]

Es ist also weiterhin mit einem hohen Anteil an PKWs im Verkehr zu rechnen. Die Entscheidungsparameter für den Kauf und Betrieb eines PKW sind jedoch um ein Vielfaches komplexer als bei Nutzfahrzeugen. Die unter 2.3.3 erörterten energiepsychologischen Überlegungen lassen sich im Wesentlichen in zwei Einflussbereiche gliedern:

1. **Kaufverhalten:** Obwohl aus rational technischer Sicht *Zweck und Fahrzyklus* die Kaufentscheidung beeinflussen sollten, so sind es in Realität meist die unter 2.3.3 (Seite 12) diskutierten symbolisch/psychologischen Attribute, welche den Kauf entscheiden.
2. **Fahrverhalten:** Ein PKW ist ein Symbol für Autonomie. Der Fahrer lässt sich nicht „bevormunden“ und möchte keine fahrzeugspezifische Schulung. Um das Fahrverhalten bei den PKWs zu beeinflussen gibt es zwei grundlegenden Möglichkeiten:
 - a) Motivation schaffen: Die zunehmende Veränderung des Fahrzeuges zu einem mit Bluetooth, Internetzugang und anderen Schnittstellen ausgestatteten, „rollenden Büro“ erlaubt den Vergleich der Fahreffizienz auf persönlicher Ebene oder gar in soziale Netzwerken (*Market Pull Innovation*). Der Fahrer erfährt persönliche Genugtuung oder Anerkennung in der Community Dank einer effizienten Fahrweise. Beispiel: *Next-generation SmartGauge* von *Ford*. CO₂-Einsparung wird in Form von grünen Blättern am Armaturenbrett angezeigt. (Siehe Abbildung 12, links.)

³ *First-Mile/Last-Mile* bezieht sich auf die Schwierigkeit, vom Ausgangspunkt der Reise zu einem Knotenpunkt des öffentlichen Verkehrs zu gelangen und von dessen Endstation zum eigentlichen Reiseziel.

b) Technologie übernimmt effiziente Fahrweise: und tut dies, ohne dass der Kunde es bemerkt bzw. sich eingeschränkt fühlt (*Technology Push Innovation*).

Als langfristige Ideallösung können intelligente, vernetzte Systeme, welche unter Anderem ampelloses Fahren und automatische Konvoy-Bildung ermöglichen, angesehen werden. Als Beispiel kann hier das *EO Smart Connecting Car* des *Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz (DFKI)* genannt werden (Siehe Abbildung 12, Mitte).

Als Zwischenschritt zu diesem Ziel müssen bestehende Technologien *effizient verknüpft* werden! Energiespeicher, welche wie das Schwungrad einen exakt bestimmbaren Energieinhalt haben, lassen sich optimal mit einem GPS-gestützten Energiemanagement verknüpfen. Durch Eingabe des Reiseziels in das Navigationssystem ist es nicht nur möglich den Energiebedarf durch Beachtung von Einflussgrößen wie Verkehrsdichte, Kurvenradien und geodätischem Höhenunterschied exakt zu bestimmen, sondern es lassen sich auch im Vorfeld die Energieströme von und zum Sekundärspeicher simulieren. Dadurch übernimmt das Fahrzeug (im Rahmen der technischen Möglichkeiten und der Vorhersagbarkeit der Ereignisse) effizientes „Handeln“, ohne den Fahrer spürbar einzuschränken. Um in gewissen, hochbelasteten, urbanen Regionen lokale Emissionsfreiheit zu erlangen, können durch virtuelle Grenzen (*Geofencing*) Zonen definiert werden, in welchen die VKM automatisch abschalten und das Fahrzeug den Vortrieb nur mehr durch den (elektrischen) Sekundärtrieb erfährt. (Siehe Abbildung 12, rechts).



Abbildung 12: Links: *Next-generation SmartGauge* von Ford [31], Mitte: Konvoy des *EO Smart Connecting Car* [32], Rechts: Emissionsfreie Zone durch *Geofencing*

4.1 Anforderungen an den mobilen Energiespeicher / Wirtschaftliche Betrachtung

Die reine Steigerung der Wirtschaftlichkeit eines PKWs durch Hybridisierung und Hinzufügen eines sekundären Energiespeichers reicht für eine gute Marktdurchdringung nicht aus. Vielmehr muss der Energiespeicher einen Mehrwert mit sich bringen, welcher die unter 2.3.3 gelisteten, psychologischen Attribute des Käufers anspricht. Neben einem dynamischen Fahrverhalten („Boost-Funktion“ durch KERS) legt der PKW-Kunde aber vor allem Wert auf die Individualisierung seines Fahrzeuges durch Zukauf von Sonderausstattung. Der Psychologe *Alfred Hermann* betont in [33], dass der Kunde zwar ein Serienprodukt kauft, aber möchte, dass es etwas ganz Besonderes ist. Der durchschnittliche Käufer eines *Mini Cooper* investiert 20% des Kaufpreises in Extras [33]. Die Platzierung nachhaltiger Fahrzeugtechnologie im Segment der individuellen Zusatzausstattung bietet eine Möglichkeit, den sanften Übergang zum *Zero Emission Vehicle* zu beschleunigen, definiert aber auch den preislichen Rahmen für den Energiespeicher und die erforderlichen

Komponenten im Antriebsstrang. Daraus lassen sich folgende Anforderungen an einen Sekundärspeicher im PKW ableiten:

- Hohe Leistungsdichte (positiver Einfluss auf die Fahrdynamik)
- Leichte Bedienbarkeit
- Einfache Integrierbarkeit in die bestehende Fahrzeugarchitektur
- Geringe oder besser keine Wartungskosten
- Gutes Image der Sekundärenergie (wie z.B. Strom)
- Gute Rezyklierbarkeit des Speichers (wie z.B. Schwungrad)
- Geringe Entwicklungs- und Herstellkosten

Es ist also nicht nur das teilweise irrationale und von Marketing-Mechanismen beeinflusste Kaufverhalten, sondern auch die beinahe unmögliche Vorhersagbarkeit des Fahrzyklus, welche die Speicherdimensionierung im PKW zu einer schwierigen Aufgabe machen.

Bislang war es der genormte *NEDC*, der für die energetische Optimierung der meisten Fahrzeuge herangezogen wurde. Der Antriebsstrang und die Betriebsstrategie wurden also bis dato an einen gesetzlich vorgegeben, synthetischen Fahrzyklus angepasst. Es ist müßig zu erwähnen, dass eine stark vom Normzyklus abweichende Verwendung des Fahrzeuges deshalb erheblich schlechtere Verbrauchswerte mit sich bringt. Abbildung 13 vergleicht verschiedene Fahrzyklen und beschreibt deren energetische Charakteristika bzw. Implikationen für die Gestaltung des Antriebsstranges.

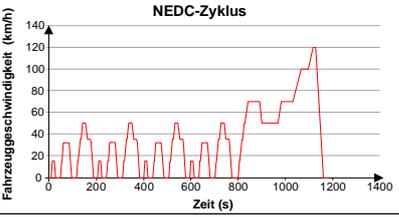
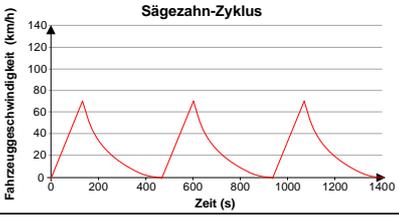
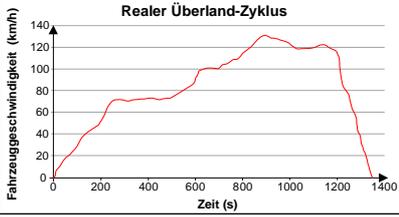
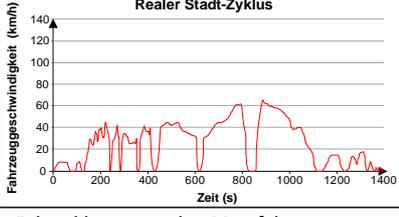
Normzyklus	Optimierter, synthetischer Zyklus	Reale Zyklen
 <p>NEDC-Zyklus</p>	 <p>Sägezahn-Zyklus</p>	 <p>Realer Überland-Zyklus</p>
<p>Antriebsstrang an Fahrzyklus angepasst</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vom Gesetzgeber definiert • Oft beschränkte Aussagekraft und Übereinstimmung mit der Realität • Wirtschaftlicher Faktor für Fahrzeughersteller • Bestimmt Forschung und Entwicklung im Bereich des Antriebsstranges • Geringer mittlerer Leistungsbedarf • Sehr geringe, dem realen Fahrbetrieb nicht entsprechende, Dynamik 	<p>Fahrzyklus an Antriebsstrang angepasst</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zyklus für Hybrid- und konventionellen Antrieb optimierbar • Oft schwer und nicht in den Verkehr integrierbar • Praxisrelevanz zu hinterfragen • Für PKW generell irrelevant • Geringe Kunden-/Nutzerakzeptanz 	 <p>Realer Stadt-Zyklus</p> <p>Fahrzyklus aus realen Messfahrten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Oft stark divergierende Charakteristika • Keine einheitlichen Optimierungskriterien ableitbar • Ein einziges Fahrzeug unterliegt oftmals einer großen Bandbreite an Zyklen • Stark schwankender Leistungsbedarf

Abbildung 13: Verschiedene Fahrzyklen und deren energetische Charakteristika

Es ist offensichtlich, dass die Ablöse des *NEDC* durch die so genannte "Worldwide Harmonized Test Procedure" (*WLTP*), also einem aus realen Testfahrten generierten Zyklus, der ab 2017 in Europa Standard werden soll, ein Schritt in die richtige Richtung ist. Zwei wesentliche Punkte bleiben in diesem Zusammenhang jedoch ungelöst:

1. Es wird unvermeidbar bleiben, dass viele PKW-Anwender ihr Fahrzeug auch stark von der *WLTP* abweichend einsetzen. Somit kann zwar eine geringfügige, durchschnittliche Verringerung des CO₂-Ausstoßes erreicht werden, die Problematik der „Nichtvorhersagbarkeit“ des Fahrverhaltens des individuellen Anwenders bleibt aber bestehen.
2. Der Umstieg auf einen neueren „schärferen“ Testzyklus bringt voraussichtlich wieder „nur“ inkrementelle Verbesserungen und eine sukzessive Verbrauchsreduktion mit sich.⁴ Die Entwicklung einer völlig neuen Fahrzeugstruktur oder gar eines neuen Mobilitätskonzeptes wird dadurch nicht in die Wege geleitet.

5. Fazit

Die Zerlegung des Hybridfahrzeuges in ein *Subsystem*, bestehend aus den Komponenten des Antriebsstranges und eines *Supersystems*, welches Umgebungseinflüsse wie Verkehrsinfrastruktur und Fahrer beinhaltet, ermöglicht eine kritische holistische Analyse moderner Fahrzeugtopologien. Mobile Energiespeicher spielen dabei eine entscheidende Rolle, wobei sie in starker Wechselwirkung mit Fahrverhalten und Fahrzyklus stehen.

Während Hybridisierung und der Umstieg zu anderen (auch rein elektrischen) Antriebskonzepten im Bereich der kommerziellen und vor allem Nutzfahrzeuge für den innerstädtischen Einsatz eine kurzfristige und vielversprechende Alternative darstellt, so weisen diese Maßnahmen im PKW-Segment ein deutlich geringeres Potential zur Verbrauchsreduktion auf. Grund hierfür sind hauptsächlich sozio-psychologische Aspekte, woraus geschlossen werden kann, dass das größte Optimierungspotential in den Einflussgrößen des Supersystems liegt. Es ist daher unabdingbar, den Übergang von der bislang rein technischen Entwicklung der Fahrzeuge zu einer interdisziplinären Systemoptimierung, welche unterschiedliche Segmente wie Technik, Psychologie, Politik, Gesetzgebung und Marketing vereint, zu wagen. Somit kann auch ein weiterer Schritt in Richtung ganzheitlichem Mobilitätskonzept als Alternative zum „Auslaufmodell“ des konventionellen PKWs mit Verbrennungskraftmaschine getätigt werden.

6. Literaturverzeichnis

- [1] H. Stiegler, Rahmen, Methoden und Instrumente für die Energieplanung in der neuen Wirtschaftsorganisation der Elektrizitätswirtschaft, Graz: TU Graz, 1999.
- [2] P. L. Schiller, E. C. Brunn und J. R. Kenworthy, An Introduction to Sustainable Transportation - Policy, Planning and Implementation, Washington DC: EARTHSCAN, 2010.
- [3] L. Piskernik, Energieinnovation und energiebezogenes Verhalten aus energietechnischer und energiepsychologischer Sicht: Möglichkeiten der Beeinflussung

⁴ Experten rechnen mit einem flottenspezifischen CO₂-Ausstoß von ca. 95g/km bei Anwendung der WLTP gegenüber 80 – 85 g/km im NEDC [36].

- und Nutzen, Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, TU Graz, 2003.
- [4] W. Pölz, Kohlendioxid-Reduktionspotentiale der Klimabündnisgemeinde Mistelbach, Wien: Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik, der Universität für Bodenkultur, 2001.
- [5] C. Sessa and R. Enei (ISIS), „EU transport demand: Trends and drivers,“ Europäische Kommission, 2010.
- [6] J. Pluy, „Energieeffiziente und kostengünstige Elektromobilität mit der Bahn,“ EnInnov 2012 - 12. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 2012.
- [7] European Commission, Transport in Figures - Statistical Pocketbook 2012, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.
- [8] M. Fish, „Where Global Warming Comes From,“ 2006. [Online]. Available: http://www.globaltrees.co.uk/facts_.php. [Zugriff am 12. April 2011].
- [9] J. Bates, „Incentives Fail to Stimulate European Electric Vehicle Sales,“ JATO Dynamics GmbH, Limburg, Deutschland, 2011.
- [10] G. Hohenberg et. al., „Range Extended E-Mobility,“ *VDI-Berichte 2183: 8. VDI-Tagung mit Fachausstellung - Innovative Fahrzeugantriebe*, pp. 129-143, November 2012.
- [11] S. Alexander und S. Ussher, „The Voluntary Simplicity Movement: A Multi-National Survey Analysis in Theoretical Context,“ 2011.
- [12] N. N. Taleb, *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable.*, Penguin, 2008.
- [13] V. Khosla, *The Black Swan Thesis of Energy Transformation.*
- [14] J. Jenkins, T. Nordhaus und M. Shellenberger, *Energy Emergence - Rebound & Backfire As Emergent Phenomena*, Oakland, Kalifornien: Breakthrough Institute, 2011.
- [15] D. Naunin, *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge*, Renningen, Deutschland: Espert Verlag, 4. Auflagen 2007.
- [16] Volvo Cars, „Flywheel KERS Component Details - Press Release,“ 2011.
- [17] H. Eichelseder und J. Blassnegger, „Der zukünftige Ottomotor – Überlegener Wettbewerber zum Dieselmotor?,“ Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik / TU Graz, AT, Graz, 2006.
- [18] G. Jürgens, „Rekuperation – eine „ewige“ Herausforderung,“ TU Graz, 1996.
- [19] H. Schreck, *Konzeptuntersuchung, Realisierung und Vergleich eines Hybrid-Antriebes mit Schwungrad mit einem konventionellen Antrieb*, Aachen: Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, 1977.
- [20] Si-Yeon Kim et. al., „A study on the construction of EV charging infrastructures in highway rest area,“ *IEEE Transactions*, Istanbul, 2013.
- [21] J. Kohler, M. Wietschel, L. Whitmarsh, D. Keles, W. Schade, „Infrastructure investment for a transition to hydrogen road vehicles,“ *IEEE Transactions*, Rotterdam, 2008.
- [22] L. Yvkoff, „Tata commercializing an air-powered car,“ CBS Interactive Inc, 17 05 2012. [Online]. Available: http://reviews.cnet.com/8301-13746_7-57436639-48/tata-commercializing-an-air-powered-car/. [Zugriff am 2014].

- [23] D. S. Leichsenring, „Mercedes B-Klasse F-Cell: Brennstoffzellen mit mehr Power,“ Auto News Medien GmbH, 28 08 2009. [Online]. Available: http://www.auto-news.de/auto/news/anzeige_Mercedes-B-Klasse-F-Cell-Neues-Brennstoffzellenauto_id_25084. [Zugriff am 2014].
- [24] e-via - electric rally performance, „Ein Überblick der E-Cars 2012,“ media event pr- und veranstaltungsagentur e.u., 2012. [Online]. Available: <http://www.e-via24.eu/gallery/2012/eCars2012/38>. [Zugriff am 2014].
- [25] M. Bader, A. Buchroithner, I. Andrasec, A. Brandstätter, „Schwungradhybride als mögliche Alternative für den urbanen Individual- und Nahverkehr,“ 12. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 2012.
- [26] T. Cain, „Auto Sales By Segment In The USA And Canada - May 2011,“ GoodCarBadCar.net, 23 06 2011. [Online]. Available: <http://www.goodcarbadcar.net/2011/06/auto-sales-by-segment-in-usa-and-canada.html>. [Zugriff am 2014].
- [27] M. Bland, „Long Live the SUV - The Light Vehicle Leader,“ IHS Automotive, 11 05 2011. [Online]. Available: <http://blog.polk.com/blog/blog-posts-by-marc-bland/long-live-the-suv-the-light-vehicle-leader>. [Zugriff am 2014].
- [28] H. Stiegler und U. Bachhiesl, „Grundlagen der Energieinnovation,“ TU Graz, 2013.
- [29] E. Fiala, „Effektive Hybridstrategien,“ ATZ, pp. 148-153, 02 2012.
- [30] M. Emes, A. Smith, N. A. Tyler, R. Bucknall, P. A. Westcott and S. Broatch, „Modelling the costs and benefits of hybrid buses from a 'whole-life' perspective,“ 7th Annual Conference on Systems Engineering Research 2009 (CSER 2009), Loughborough University – 20th - 23rd April 2009, 2009.
- [31] Ford Motor Company, „Fusion Energi Plug-In Hybrid Technology,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.ford.com/cars/fusion/trim/titaniumenergi/>. [Zugriff am 2014].
- [32] Anmiation Labs für DFKI GmbH, „EO smart connecting car - Innovative Fahrzeugkonzepte,“ 2012. [Online]. Available: <http://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/projekte/item.html>. [Zugriff am 2014].
- [33] K. Kalowitz und S. Anker, „Geschäft mit dem gewissen Extra,“ *Die Welt*, Nr. Welt am Sonntag 15./16. Dezember 2012, p. 1, 2012.
- [34] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, „Freight Transportation: The European Market,“ 2002. [Online]. Available: <http://international.fhwa.dot.gov/eurofreight.cfm>.
- [35] Deutsches Umweltsbundesamt, „Wege zur Transformation,“ in *Fachkongress Nachhaltige Ökonomie*, Berlin, 2013.
- [36] P. Trechow, „Neuer Fahrzyklus bringt deutsche Hersteller in die Bredouille,“ *Handelsblatt*, Nr. 08. Juli 2013, 2013.