

Ausgangssituation und Ziel

Das weltweite Wachstum der Ballungszentren lässt den Verkehrssektor in diesen Gebieten immer mehr an Bedeutung gewinnen. Die Zunahme der Verkehrsleistung und der Fahrzeugneuzulassungen stellen mehrere Bereiche vor Herausforderungen. Die fortschreitende Motorisierung bedingt beispielsweise nicht nur den Ausbau der Infrastruktur, sondern fordert vor allem neue Ansätze hinsichtlich der Reduktion von Ressourcen- und Energieverbrauch sowie der Emissionen. Es ist zu klären, welche Arten der Fortbewegung einerseits die effizientesten hinsichtlich Ressourcenverbrauch (ob Platzbedarf, Material- oder Energieeinsatz) und Umweltverträglichkeit sind und andererseits von der Bevölkerung auch angenommen werden [1].

Seit einigen Jahren wächst das Angebot an alternativ angetriebenen Fahrzeugen am Markt, vor allem rein elektrisch und hybrid betriebene Konzepte stehen dabei im Vordergrund. Bezüglich der Effizienz verschiedener Konzepte finden sich viele Diskussionen, doch wird oft der Unterschied zwischen der Vielzahl an Nutzungsmustern außer Acht gelassen. Anlass der vorliegenden Arbeit ist deshalb der Vergleich mehrerer am Markt befindlicher Fahrzeugkonzepte auf verschiedenen Fahrtstrecken, welche den Mustern von verschiedenen realen Nutzungsszenarien entsprechen. Die Auswahl der Fahrzeugkonzepte konzentriert sich nicht nur auf die Art des Antriebs sondern auch auf weitere Kriterien wie z.B. Fahrzeuggröße und -masse.

In einer vorab durchgeführten Erhebung von Nutzungsprofilen wurden von etwa 100 Probanden sämtliche unternommene Wege in einem Zeitraum von einer Woche in speziell dafür vorbereiteten Wegetagebüchern aufgezeichnet. Aus dieser Erhebung konnten verschiedene Nutzergruppen identifiziert werden, die sich sowohl in ihrer Fahrleistung als auch in der Zusammensetzung der Strecken nach vier verschiedenen Typen – urbaner Verkehr, suburbaner Verkehr, Überlandverkehr, Autobahn – unterscheiden (Folien 6-8). Die Muster werden im Folgenden kurz vorgestellt.

- Nutzungsmuster A – seltene Nutzung: bei 19% der Probanden wurde eine seltene Nutzung (maximal zwei Mal in der Woche mit einer Tageskilometerleistung von unter 50 km) festgestellt. Die Strecken wurden fast ausschließlich in urbanen und suburbanen Gebieten absolviert.
- Nutzungsmuster B – seltene Nutzung mit weiteren Strecken: bei 13% der Probanden wurde eine Nutzung von maximal 3 Tagen pro Woche festgestellt. Die Tageskilometerleistung kann dabei weit über 50 km betragen.
- Nutzungsmuster C – Wochenpendler: Diese Gruppe ist von zwei längeren Fahrten mit einem hohen Anteil an Überland- und Autobahnverkehr zu Beginn und Ende des Wochenendes mit verhältnismäßig geringer Kilometerleistung während der Arbeitswoche geprägt. Klassische Vertreter sind Studenten, welche in der Erhebung überproportional hoch vertreten waren. Die Größe dieser Gruppe musste mit statistischen Mitteln auf einen Anteil von 5% angepasst werden.
- Nutzungsmuster D – Tagespendler (Kurzstrecken): 30% der Teilnehmer nutzten ihren PKW zum täglichen Pendeln. Die tägliche Kilometerleistung lag dabei unter 50 km, zum größten Teil wurde in urbanen und suburbanen Gebieten gefahren. An Wochenenden wurde das Fahrzeug seltener benutzt.
- Nutzungsmuster E – Tagespendler mit Wochenendnutzung (mittlere Reichweitenanforderung): 11% der teilnehmenden Personen nutzten ihr Fahrzeug an allen bzw. nahezu allen Tagen, die weiteren Strecken lagen in einem Bereich zwischen 50 und 100 km.

- Nutzungsmuster F – Tagespendler mit Wochenendnutzung (höhere Reichweitenanforderung): 17% nutzten ihren PKW an allen bzw. nahezu allen Tagen der Woche, die weiteren Strecken lagen in einem Bereich über 100 km.
- Nutzungsmuster G – Vielfahrer: Bei 2% wurde eine tägliche Fahrstrecke im Bereich von 100 km festgestellt. Über 90% der Kilometerleistung wurden auf Überland- und Autobahnstrecken absolviert.

Zusammenfassend können etwa 60% der teilnehmenden Probanden als Pendler mit täglicher Nutzung ihres PKW vor allem während der Arbeitswoche angesehen werden. Die meisten – vor allem periodischen – Fahrten (zur Arbeit, Einkauf ...) werden in urbanen und suburbanen Gebieten gefahren. 42% der Fahrleistung aller Probanden (km) werden in urbanen und suburbanen Gebieten geleistet (FO 7).

Ziel

Das Ziel des vorliegenden Projekts ist, einen prinzipiellen Vergleich des Energieverbrauchs verschiedener Antriebskonzepte auf Basis der verschiedenen identifizierten Nutzungsmuster zu erarbeiten. Die wichtigsten in den Untersuchungen berücksichtigten Aspekte sind:

- der spezifische Energieverbrauch (kWh/100km)
- die spezifischen Emissionen klimarelevanter Gase (g CO₂/km)
- die Gewichtung mit der Größe der Nutzergruppe.

Für die Durchführung des Vergleichs werden die dafür notwendigen Werte von verschiedenen, im Folgenden kurz vorgestellten, Fahrzeugen entlang der vier Streckenprofile

- "URBAN" (reiner Innenstadtverkehr mit hohem Stop 'n' Go-Anteil)
- "SUBURBAN" (Stadtperipherie – leicht flüssiger Verkehr)
- "ÜBERLAND" (Verkehr auf Freilandstraßen) und
- "AUTOBAHN"

gemessen.

Untersuchte Fahrzeuge

Am Beginn der Untersuchung wurde eine Marktanalyse vorgenommen, um geeignete Fahrzeuge für den Vergleich zu erheben. Bei der Auswahl der Fahrzeuge wurde besonders darauf geachtet, verschiedene Fahrzeuggrößen abzudecken. Weiters richtete sich die Auswahl nach Verfügbarkeit der Fahrzeuge im näheren Umfeld. Im Folgenden werden die ausgewählten Fahrzeuge kurz vorgestellt. Die angegebenen Werte beziehen sich dabei auf Herstellerangaben gemäß den entnommenen Quellen.

Fiat Punto (Benzin) und VW Polo (Diesel)

Die beiden Kompaktwagen gelten in dieser Untersuchung als Vertreter für übliche in der Stadt gerne verwendete relativ kostengünstige konventionelle Fahrzeuge.

Link zum Hersteller: http://fiat.at/cgi-bin/pbrand.dll/FIAT_AUSTRIA/showroom/showroomModel.jsp?BV_SessionID=@@@@2121469511.1366617747@@@@&BV_EngineID=cccjadfjimmkidcefecejgdfkhdfji.0&modelKey=199BB

Link zum Hersteller: <http://www.volkswagen.at/modelle/polo>

Toyota Prius

Die erste Generation des Prius Hybrid startete 1997. Der Antriebsstrang Hybrid Synergy Drive (HSD) besteht aus einem Benzinmotor, einem elektrischen Traktionsmotor und einem elektrischen Generator, welche über ein Planetengetriebe miteinander gekoppelt sind.

Link zum Hersteller: http://www.toyota.at/cars/new_cars/prius/index.tmex [6]

Opel Ampera

Das in den USA gefertigte und seit 2012 in Europa erhältliche Plug In-Hybridfahrzeug der Mittelklasse ist baugleich mit dem Chevrolet VOLT von GM und dem Vauxhall Ampera. Der Antriebstrang besteht aus einem Verbrennungsmotor, der einen Generator antreibt und einer elektrischen Antriebseinheit. Das Fahrzeug kann eine Distanz von ca. 60 km rein elektrisch zurücklegen. Ist die Batterie leer, liefert der Verbrennungsmotor die für den Antrieb notwendige elektrische Energie durch Betreiben eines Generators.

Link zum Hersteller: <http://www.opel.at/fahrzeuge/opel-modelluebersicht/personenwagen/ampera/spezifikationen/technische-daten.html> [5]

Mitsubishi iMiev

Der elektrisch betriebene Kleinwagen für vier Personen aus Japan wird seit 2009 produziert.

Link zum Hersteller: <http://www.mitsubishi-motors.at/TechnicalSpecification.aspx?PMID=98&BTID=2627&VID1=4793&VID2=0&LangType=3079> [4]

Renault Twizy

Das seit 2011 in Serienproduktion befindliche Leichtkraftfahrzeug der Fahrzeugklasse L7e [3] entspricht keinem vollwertigen PKW und ist speziell für urbane Gegebenheiten konzipiert. Speziell die schmale Form und der kleine Wendekreis wie auch der geringe Platzbedarf beim Abstellen des Fahrzeugs sprechen hierfür.

Link zum Hersteller: <http://www.renault-twizy-blog.de/twizy-technische-daten.html> [2]

Durchführung der Messfahrten

Die Fahrt wurde jeweils mit vollständig aufgeladener Batterie bzw. vollem Tank am Institut für Fahrzeugtechnik (Inffeldgasse 11) gestartet. Die Messfahrten mit den hybrid- und elektrisch angetriebenen Fahrzeugen wurden im Zeitraum zwischen 26. September und 12. Oktober 2012 durchgeführt. In dieser Zeit lag die Tagestemperatur zwischen 15 und 24°C, morgens zwischen 6 und 15°C. Die Wetterverhältnisse waren großteils sonnig oder bewölkt, jedoch trocken und nur während einer Fahrt regnerisch. Die Messung des Energieverbrauchs der elektrisch betriebenen Fahrzeuge erfolgte durch Aufzeichnung der aufgenommenen Energiemenge während des Aufladens nach Beendigung der jeweiligen Fahrt. Dies erfolgte mittels eines Stromzählers.

Die aufgenommene elektrische Energie bis zum vollen Ladezustand ist somit das Maß für den Energieverbrauch des elektrisch betriebenen Fahrzeugs. Diese Art der Messung beinhaltet weiters den für den Nutzer ebenfalls wichtigen Verlust von elektrischer Energie während des Ladevorgangs. Die Messung des Kraftstoffverbrauchs der verbrennungsmotorisch betriebenen

Fahrzeuge gestaltete sich ungleich schwieriger. Aus mehreren Gründen war es nicht möglich, ein adäquates (genaues) Messsystem in den Fahrzeugen zu installieren. Hierbei musste auf die Verbrauchsanzeige in den Fahrzeugen zurückgegriffen werden. Dies bedeutet jedoch das Risiko einer gewissen Ungenauigkeit [7].

Die Umrechnung auf den Energieverbrauch in kWh wird mittels in folgender Tabelle zusammengefassten Stoffwerten und Gl. 1 durchgeführt.

Stoffwerte für Benzin		
Dichte bei 15°C	$\rho_{K_r,B}$	0,720 kg/dm ³
Unterer Heizwert	$H_{U,B}$	41,0 MJ/kg
		11,389 kWh/kg
Stoffwerte Diesel		
Dichte bei 15°C	$\rho_{K_r,D}$	0,840 kg/m ³
Heizwert	$H_{U,D}$	42,6 MJ/kg
		11,833 kWh/kg

[8]

Die Umrechnung von Megajoule (MJ) auf Kilowattstunde (kWh) erfolgt durch Division durch den Faktor 3,6. Die verbrauchte Energie auf der jeweiligen Strecke errechnet sich somit durch

$$\text{Gl. 1:} \quad E = V_{K_r} \cdot \rho_{K_r} \cdot H_{u,K_r}$$

E	Energiebedarf	[MJ]
V_{K_r}	Volumen des verbrauchten Kraftstoffs	[l]
ρ_{K_r}	Dichte des Kraftstoffs	[kg/l]
H_{u,K_r}	Heizwert des Kraftstoffs	[MJ/kg]

Der Energieverbrauch entlang der einzelnen Strecken wurde auf den Verbrauch pro 100 Kilometer hochgerechnet. Speziell mit kraftstoffbetriebenen Fahrzeugen wurden längere Messfahrten durchgeführt, um einen aussagekräftigen durchschnittlichen Wert für die Messergebnisse zu erhalten.

Messergebnisse und Auswertung

Energieverbrauch

Der Energieverbrauch eines Fahrzeugs resultiert aus der gewünschten Leistung P_{erf} und des zu überwindenden Fahrwiderstands. Dieser setzt sich aus folgenden Elementen zusammen.

$$\text{Gl. 2:} \quad F_A = F_R + F_L + F_{St} + F_B$$

F_R	Rollwiderstand	$F_R = m \cdot g \cdot f_R \cdot \cos(\alpha)$
F_L	Luftwiderstand	$F_L = 1/2 \cdot \rho_L \cdot v^2 \cdot A_F \cdot c_w$
F_{St}	Steigungswiderstand	$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$
F_B	Beschleunigungswiderstand	$F_B = \lambda \cdot m \cdot v$
m	Fahrzeuggesamtmasse	[kg]
g	Erdbeschleunigung	[9,81 [m/s ²]]
f_R	Rollwiderstandsbeiwert	[]
α	Steigungswinkel	[°]

ρ_L Dichte der Luft [kg/m³]
 v Fahrzeuglängsgeschwindigkeit [m/s]
 A_F Anströmfläche [m²]
 c_w Luftwiderstandsbeiwert
 λ Drehmassenzuschlagsfaktor
 [9], [10]

Die erforderliche Leistung gilt als Funktion der gewünschten Geschwindigkeit und des dabei herrschenden Fahrwiderstands unter Einbezug des mechanischen Gesamtwirkungsgrads des Abtriebs.

$$\text{Gl. 3: } P_{\text{erf}}(t) = (F_A \{v(t), v'(t)\} \cdot v(t)) / (\eta_{\text{ges}} \{v(t), v'(t)\})$$

t Zeit [s]
 η_{ges} Gesamtwirkungsgrad

Der Energieverbrauch E_{erf} [kWh] resultiert aus der Integration der jeweiligen Leistungsanforderung über die Zeit.

$$\text{Gl. 4: } E_{\text{erf}} = \int P_{\text{erf}}(t) dt$$

CO₂-Bilanz

Ein wichtiger Aspekt im Vergleich verschiedener Antriebskonzepte ist die Berücksichtigung der CO₂-Bilanz der Bereitstellung der Energie. Für die Bereitstellung von flüssigen Kraftstoffen werden z.B. etwa 15% des Energieinhalts von Rohöl aufgewendet. Der CO₂-Ausstoß eines Fahrzeugs hängt direkt mit dem Kraftstoffverbrauch zusammen. Im Folgenden wird die entstehende Menge CO₂ bei der Verbrennung von 1 Liter Benzin errechnet. Nachfolgende Tabelle zeigt die dafür notwendigen Stoffwerte.

Daten zur Berechnung der entstehenden Menge CO₂ bei Verbrennung von 1 l Benzin oder Diesel			
Stoffanteil des Kohlenstoffs im Kraftstoff (1)	c	0,847	kg C/kg Benzin
Dichte von Benzin (bei 15°C) (2)	ρ	0,73	kg/l
Dichte von Diesel (bei 15°C) (3)	ρ	0,84	kg/l
Molare Masse des Kohlenstoffs	M_C	12	kg C/kmol C
Molare Masse des Sauerstoffs	M_O	16	kg O/kmol O
Molanteil Kohlenstoff in CO ₂	n_c	1	kmol C/kmol CO ₂
Molanteil Sauerstoff in CO ₂	n_o	2	kmol O/kmol CO ₂

(1) Der Wert schwankt nach [10] zwischen 0,83 und 0,87.

(2) Mittelwert aus mehreren Quellen [10]

(3) Der Wert schwankt nach [10] zwischen 0,72 und 0,775.

Bei vollständiger Umsetzung des Kraftstoffs zu CO₂ und H₂O mittels aus der Luft entnommenen Sauerstoffs O₂ entsteht die nach Gl. 5.5 zu errechnende Menge CO₂ pro Liter Benzin.

$$\text{Gl. 5.5: } m_{\text{CO}_2} = V_K \cdot \rho_K [c/M_C \cdot (n_C \cdot M_C + n_O \cdot M_O)]$$

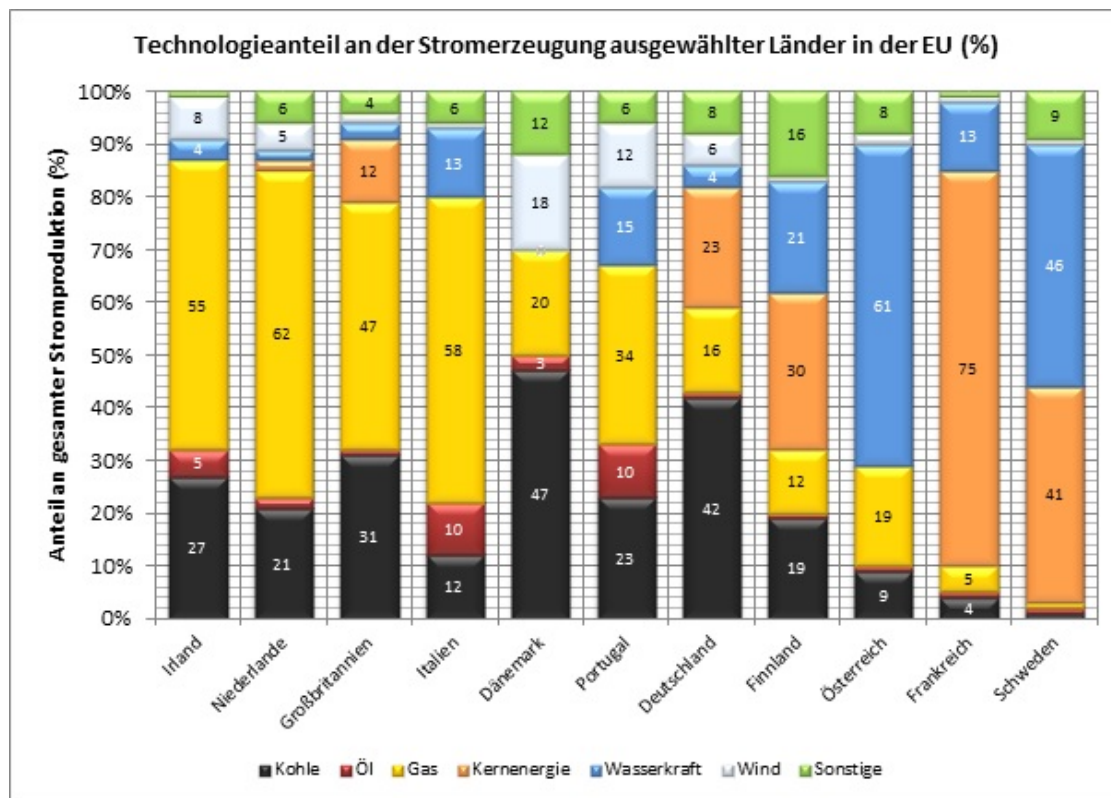
Es entstehen demnach 3,1 kg CO₂ pro kg Benzin. Bei einer Dichte des Kraftstoffs von 0,73 kg/l sind dies 2,28 kg CO₂ pro Liter Benzin. Bei einem Liter Diesel werden bei gleichem Stoffanteil c 2,6 kg CO₂ emittiert.

CO₂-Emission in der Stromproduktion

Die Elektromobilität gilt für viele als vielversprechende Alternative zum konventionellen Antrieb mittels Benzin- oder Dieselmotor. Doch ist es hier wichtig, einen Blick auf die Stromproduktion zu werfen. Die CO₂-Bilanz für die Bereitstellung elektrischer Energie ist wesentlich von der Art des verwendeten Primärenergieträgers abhängig (z.B. Stromgewinnung aus Kohle mit hohen Emissionen versus Stromgewinnung aus Wasserkraft mit geringen Werten).

Nachstehende Tabelle zeigt die CO₂-Faktoren verschiedener Primärenergieträger. Demnach werden für die Gewinnung von 1 Megawattstunde (MWh) Strom aus Kohle rund 800 kg CO₂ emittiert, die Bilanz ist um einiges schlechter als bei der Gewinnung aus Erdöl. Damit zeigt sich die Wichtigkeit des verwendeten Primärenergieträgers für die Stromerzeugung. In Österreich beispielsweise liegt der Anteil der auf Wasserkraft basierenden Stromerzeugung bei etwa 61%, was eine sehr gute Ausgangslage für den umweltfreundlichen Einsatz von Elektromobilität darstellt. In Deutschland, wo etwa 42 % des Strombedarfs mit Kohlekraftwerken gedeckt werden, fällt diese Bilanz deutlich schlechter aus.

Primärenergieträger	CO₂-Faktor f_{CO2}
Erdgas	440
Erdöl	550
Kohle	800
Biomasse	30
Windkraft (an Land)	30
Wasserkraft (Großanlagen)	20
Photovoltaik	100
Atomenergie	15



Quelle: [14]

Die Folien 25 bis 40 zeigen die errechneten Werte für den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen der Fahrzeuge unter verschiedenen Nutzungsszenarien, sowohl unter Berücksichtigung des österreichischen wie auch des europäischen Strommixes.

Im urbanen Verkehr (instationärer Betrieb des Motors) ist der Verbrauch für konventionell kraftstoffbetriebene Fahrzeuge wie der Fiat Punto relativ hoch. Aufgrund des höheren Wirkungsgrads von dieselbetriebenen Fahrzeugen – vor allem im Teillastbereich, welcher im Stadtgebiet vorrangig von Bedeutung ist – ist der Verbrauch geringer in Relation zum Benzinmotor. Mit zunehmendem Grad der Elektrifizierung des Antriebs sinkt auch der Energieverbrauch des Fahrzeugs. Vor allem im Stadtverkehr trägt das Gewicht wesentlich zum Fahrwiderstand bei. Je leichter das Fahrzeug, desto geringer ist hier der Verbrauch. Mit höher werdendem Anteil an Streckenabschnitten mit höherer Durchschnittsgeschwindigkeit (Überland- und Autobahnverkehr) sinkt der Verbrauch der konventionellen Antriebe, da der Motor konstant in einem Bereich mit verhältnismäßig gutem Wirkungsgrad betrieben wird. Somit sinkt das Potenzial von hybridbetriebenen Fahrzeugen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen in Relation zum Benzin- und Dieselmotor. Elektrische Antriebe weisen auf allen Streckenprofilen einen verhältnismäßig geringen Verbrauch auf. Auch die CO₂-Bilanz fällt bei Verwendung von Strom aus regenerativen Quellen günstig aus. Für die vorliegenden Berechnungen wurde der CO₂-Faktor für die Stromgewinnung in Österreich verwendet. Eine Herausforderung ist jedoch die begrenzte Reichweite elektrisch betriebener Fahrzeuge, weshalb für Strecken mit einer Kilometerleistung über 100 km anstatt des Elektrofahrzeugs ein konventioneller Diesel-PKW herangezogen wurde. Somit entsteht ein Mobilitätsszenario, bei dem für Kurzstrecken ein Elektrofahrzeug verwendet wird, während bei Bedarf beispielsweise aus einem Fahrzeugpool ein konventioneller PKW zur Verfügung steht. Die Gesamtemissionen und der Energieverbrauch gelten somit als Kombination von zwei Fahrzeugen.

Mit zunehmendem Grad der Elektrifizierung des Antriebs und größer werdendem Anteil an regenerativen Energiequellen im Strommix sinken sowohl Energieverbrauch als auch die Emissionen klimarelevanter Gase. Bei Einbindung der Größe der einzelnen Nutzergruppen zeigt sich, dass sich vor allem bei täglicher Nutzung (Tagespendler) die höchsten Einsparungspotenziale ergeben. Das Szenario auf Folie 41 zeigt, dass bei Verwendung von alternativen Antrieben gerade in diesen Gruppen eine erhebliche Emissionseinsparung erzielt werden kann.