



Diplomarbeit

Simulation von elektrischen Fahrzeugkonzepten für PKW

Verbesserungspotential der Elektromobilität bei Verbrauch und Emissionen im Lebenszyklus

Von:

Michael Schwingshackl

Eingereicht am:

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Der Technischen Universität Graz

Institutsvorstand:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hausberger Stefan

Graz, 12.05.2009

Simulation von elektrischen Fahrzeugkonzepten für PKW

Verbesserungspotential der Elektromobilität bei Verbrauch und Emissionen im Lebenszyklus

Dieser Bericht darf nur vollinhaltlich, ohne Weglassen und
Hinzufügen, veröffentlicht werden.

Sollte er auszugsweise abgedruckt oder vervielfältigt werden,
so ist vorher die schriftliche Genehmigung der Ersteller einzuholen.

Kontakt Daten Autor:

Michael Schwingshackl

Tel: 06508514666

e-mail: schwings@gmx.at

Kontakt am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hausberger Stefan

Tel.: ++43/316873-7580 Fax 873-8080

e-mail: hausberger@vkmb.tu-graz.ac.at

<http://fvkma.tu-graz.ac.at>

Graz, 12.05.2009

Vorwort

Ein Mensch kann nichts alleine!

Die Kinder können ohne Eltern das Licht der Welt nicht erblicken und könnten nicht versorgt werden ohne das Wissen unserer Vorfahren.

Die Eltern könnten ohne gesellschaftliche Regeln nicht sein, denn wir haben nur wenige Fertigkeiten, die wir durch den verdienten Unterhalt unserer Arbeit in Frieden eintauschen.

Ein gesellschaftliches Gebilde kann ohne alle beteiligten Menschen nicht aufrechterhalten werden, denn es bedarf des Mitwirkens aller Berufe, verschiedener Werte, des Wissens und vieler helfende Hände, damit ein gesellschaftliches Zusammenspiel funktioniert.

Ein Stadtmensch kann ohne die Bauern nicht überleben, die im sorgsamem Umgang mit den Elementen, natürliche Kreisläufe respektieren und für unser Überleben sorgen.

Der Bauer hat ohne Techniker (*Maschinenbauer*) keine landwirtschaftlichen Geräte zur Verfügung, die ihm anstrengende Arbeiten erleichtern und mehr als die Eigenversorgung möglich machen.

Der *Maschinenbauer* kann keinen Computerchip und keine Medikamente herstellen, kann keine Operation durchführen, keine Häuser bauen oder Eisen schmelzen...

Wir Maschinenbauer – ALLEINE – können „nichts“.

Auch ich alleine kann „nichts“ und danke allen die mich Teil haben lassen an dieser „gemeinsamen gesellschaftlichen Leistung“.

Mein besonderer Dank zur Diplomarbeit gilt:

Univ. Prof. Dr. Stefan Hausberger für seine hervorragende fachliche und offenherzige Betreuung, Dipl.-Ing. Michael Zallinger für seine fachliche Unterstützung, allen Bürokollegen und Institutsmitarbeitern für die gute Zusammenarbeit und Hilfe, Dipl.-Ing. Joachim Fritsch für das Korrekturlesen, meinen Freunden, der Familie und meiner treuen Lebenspartnerin die mir während meines gesamten Studiums Kraft und Mut für meinen Weg gaben.

Den Mut das Studium nicht als „Punkt“ sondern als „?“ abzuschließen...

Graz, im Mai 2009

Michael Schwingshackl

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit wird im speziellen die Sachlage der Elektromobilität erarbeitet und auf notwendige zukünftige Entwicklungen im PKW-Sektor des motorisierten Individualverkehrs eingegangen. Technische Eigenschaften für wichtige Komponenten von teil- und vollelektrischen Fahrzeugen wurden aus der Literatur zusammengetragen. Diese Daten dienen der Erstellung von elektrischen Fahrzeugkonzepten, welche für die Anwendung im motorisierten Individualverkehr mit dem Fahrzeuglängsdynamikmodell PHEM der Technischen Universität Graz (Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik) simuliert wurden. Bei der Wahl der Fahrzeugkategorien wurde eine Matrix gewählt, die eine Technologieentwicklung durch die Elektrifizierung und eine ökologische Entwicklung erfasst.

Das Verbesserungspotential bei Verbrauch und Emissionen (CO_2 , NO_x , HC, CO, Partikel) wurde im Typenprüfzyklus (NEDC) und im realen Verkehr (CADC) simuliert. Mittels Daten aus einer Lebenszyklusanalyse vom Programm GEMIS wurden die simulierten Ergebnisse auf den gesamten Lebenszyklus erweitert und für die gewählten Fahrzeugkonzepte übersichtlich dargestellt.

Ein Vergleich mit erneuerbarem Ressourcenpotential, das speziell für den Stromverbrauch im Verkehrsbereich verfügbar sein muss, ergänzt die Auswertung hinsichtlich einer Gesamtlösung.

Visionen für eine „neue Mobilität“ regen an, die Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen.

Einen Beitrag zum Ziel: „*Entwicklung hin zu einer zukunftsfähigen Mobilität, sozial gerecht für alle Menschen*“, soll geleistet werden.

Abstract

In this diploma thesis the state of technology for electrical mobility and its future developments for passenger cars has been worked out. Technical characteristics for important components of part- and full-electric vehicles were gathered from the literature. These data served for the creation of electrical vehicle concepts, which was simulated with the emission model PHEM (Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model) of the Technical University Graz (Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics). A matrix for the vehicle categories was selected, which seizes a technology development by the electrification and an ecological development.

The potential of improvement for consumption and emissions (CO_2 , NO_x , HC, CO, particle) was simulated in the New European Driving Cycle (NEDC) and in the Common Artemis Driving Cycle (CADC). With data from a life cycle analysis of the program GEMIS the simulated results were extended to the entire life cycle.

Comparisons with the potential of renewable resources, which must be available particularly for the current consumption in the traffic sector, complete the analysis regarding to an overall solution.

Visions for a ‘new mobility’ shall inspire to implement the gained knowledge into practice.

A contribution to the goal, ‘Development to a sustainable mobility, with social fairness for all humans’, is to be carried out.

INHALT

1	Definitionen.....	1
2	Abkürzungen	2
	Einleitung	6
3	Analyse heutiger Mobilität in Bezug auf Nachhaltigkeit.....	8
3.1	Umwelteinflüsse moderner Mobilität.....	11
4	Verkehrssituation in Österreich.....	12
4.1	Statistische Daten	12
4.2	Klima- und Emissions-Problematik des Verkehrssektors.....	13
5	Alternative Mobilität im Überblick.....	15
5.1	Elektrifizierung im motorisierten Individualverkehr	16
5.2	Hybridfahrzeug HEV	17
5.3	Plug-in-hybrid-elektrisches Fahrzeug PHEV	21
5.4	Elektrofahrzeug BEV	22
6	Elektrische Antriebstechnik	24
6.1.1	Elektrische Maschinen in Fahrzeugen.....	24
6.1.2	Funktionsweise Elektrischer Antriebe	25
6.1.3	Auswahl eines geeigneten elektrischen Antriebs	27
6.1.4	Drehstrom-Asynchronmaschine D-ASM	28
6.2	Leistungselektronik	31
6.3	Energiespeicherung im Fahrzeug.....	32
6.3.1	Flüssigtreibstoffe.....	33
6.3.2	Batterietechnologie.....	34
6.3.3	Li-Ionen Batterien	36
6.3.4	Doppelschicht-Kondensatoren	43
6.3.5	Batteriesystem	44
6.3.6	Batteriemanagement.....	45
6.3.7	Kühlung.....	46
6.4	Laden/Entladen der Traktionsbatterie	48
6.4.1	Netzladung	49
6.4.2	Rekuperation	52
6.4.3	Laden durch den Verbrennungskraftmotor	54
6.4.4	Entladen der Batterie.....	54
7	Simulation der Fahrzeugkonzepte.....	56

7.1	Methode.....	56
7.1.1	Beschreibung PKW Rollenprüfstand der TU-Graz.....	56
7.1.2	Emissionsmodell PHEM	58
7.1.3	Beschreibung der Testzyklen	59
7.1.4	Erweiterung des Emissionsmodells für Hybrid- und Elektrofahrzeuge.....	61
7.1.5	Beschreibung der Batteriestrategie (Hybridstrategie)	64
7.1.6	Vergleichsergebnis am Rollenprüfstand	68
7.1.7	GEMIS	69
7.2	Beschreibung der simulierten Fahrzeuge	70
7.2.1	Mittelklassewagen	70
7.2.2	Kleinwagen.....	75
7.2.3	Greenwagen.....	76
7.3	Kostenabschätzung der Fahrzeugkategorien.....	79
8	Ergebnisse der Simulation.....	80
8.1	Antriebsarbeit und Verbrauch	80
8.2	CO ₂ Emissionen	83
8.3	NO _x Emissionen	84
8.4	HC Emissionen.....	85
8.5	CO Emissionen.....	86
8.6	Partikel Emissionen.....	87
9	Energieversorgung - Analyse des Sektors Elektromobilität	88
9.1	Potentiale erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung.....	88
9.2	Versorgungssicherheit für die Elektromobilität	93
9.3	Energetische Gesamtbilanzierung am Fahrzeug	93
10	Diskussion	96
10.1	Aspekte einer gesamtheitlichen Betrachtung	97
10.2	Visionen	99
11	Zusammenfassung.....	101
12	Verzeichnisse	103
12.1	Abbildungsverzeichnis	103
12.2	Tabellenverzeichnis.....	106
12.3	Formelverzeichnis	107
12.4	Literaturverzeichnis.....	108
13	Anhang	113

1 Definitionen

Agrotreibstoffe	sind flüssige oder gasförmige Kraftstoffe, die aus Biomasse hergestellt werden; irreführend oft auch als „Biotreibstoffe“ bezeichnet, ohne realen Bezug zur biologischen Landwirtschaft
Benzin Äquivalent.....	ein Liter Benzin Äquivalent entspricht der freiwerdenden Energiemenge bei der Verbrennung von einem Liter Benzin
CO ₂ -Äquivalent.....	auch Kohlendioxid-Äquivalente oder Treibhauspotenzial genannt gibt an, wie viel eine festgelegte Menge eines Treibhausgases zum Treibhauseffekt beiträgt. Als Vergleichswert dient Kohlendioxid
Emissionen	Abgas-Emissionsmenge [g] von limitierten Komponenten (CO, HC, NO _x , Partikel) und nicht limitierten Komponenten (CO ₂ , CH ₄ , usw.)
Energiedichte.....	volumetrische Energiedichte [Ws/m ³] [J/m ³]
Fahrleistung.....	die Summe der von Fahrzeugen zurückgelegten Strecke in Kilometern [km]
Kapazität.....	in der Batterie gespeicherte elektrische Energie [Wh]
Lebenszyklusanalyse	auch Ökobilanz genannt (engl. LCA – Life Cycle Assessment) ist die systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten während des gesamten Lebensweges
Leistungsdichte.....	volumetrische Leistungsdichte [W/m ³]
Leistungsgewicht.....	Quotient aus Gewicht und Leistung [kg/kW], bezogen auf 1kW
Personenkilometer	Maßeinheit für die Beförderung eines Fahrgastes mit einem Verkehrsträger über eine Entfernung von einem Kilometer [Pkm]
Rekuperation	Rückgewinnung elektrischer Energie aus der Bewegungsenergie beim Bremsen
Vehicle to grid.....	„Fahrzeug ans Netz“: ist ein Konzept zur Speicherung und Abgabe von elektrischem Strom im öffentlichen Stromnetz mit Elektrofahrzeugen
Spezifische Energie	massenbezogene Energie [Ws/kg] [J/kg]
Spezifische Leistung	massenbezogene Leistung [W/kg]
Superkondensator	oder Doppelschicht-Kondensatoren DSK, nützt die Polarisierung einer elektrolytischen Lösung für die elektrostatische Energiespeicherung
Tonnenkilometer	Maßeinheit für die Beförderung einer Tonne Güter mit einem Verkehrsträger über eine Entfernung von einem Kilometer [tkm]

Als Dezimaltrennzeichen wird im Text das Komma (,) verwendet, der Punkt als Trennsymbol für z.B. Tausend=1.000,00; In den Tabellen wird aufgrund der Formatierung im Excel der Punkt als Komma beibehalten.

2 Abkürzungen

4 WD	Allradantrieb
A	Querschnittsfläche
ABS	Antiblockiersystem
ASM	Asynchronmaschine
ASR	Antriebsschlupfregelung
B	Magnetische Flussdichte in Tesla [$1\text{T}=1\text{Vs/m}^2$]
BAU	Business as usual (Weitermachen wie bisher)
BEV	Battery-Electric-Vehicle (Elektrofahrzeug)
BMS	Batteriemanagementsystem
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CAN	Controller Area Network (ist ein asynchrones, serielles Bussystem)
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalent (engl.: Global Warming Potential, Greenhouse Warming Potential oder GWP)
cos φ	Leistungsfaktor (gibt den Anteil der Wirkleistung an der Scheinleistung an)
CTL	Coal-to-Liquid (Kohleverflüssigung)
c _w -Wert	Luftwiderstandsbeiwert
D-ASM	Drehstrom-Asynchronmaschine
DSK	Doppelschicht-Kondensatoren
EST	Environmental Sustainable Transport
Eta _{el}	Wirkungsgrad zur Verbrauchsoptimierung
F	Kraft [N]
F _{Lorenz}	Lorenz Kraft [N]
GEMIS	Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme
Gt	Gigatonnen
GTL	Gas-to-Liquid (Gasverflüssigung)
H	Hybridisierungsgrad ($H = P_E / (P_E + P_{VKM}) \times 100 [\%]$)
HC	Kohlenwasserstoff
HEV	Hybrid-Electric-Vehicle (Hybridfahrzeug, hier Kombination aus Verbrennungskraftmaschine und Elektromotor)
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning (Klimaanlage)
I	Wechselstrom [A]

IBS.....	Intelligenter Batteriesensor
ICE	Internal Combustion Engine (Verbrennungskraftmotor)
I_d	Gleichstrom [A]
I_{Lade}	Ladestrom [A]
IPCC	Inter Governmental Panel on Climate Change
ISEA	Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe
Kfz.....	Kraftfahrzeug
kWp	Maßeinheit zur Kennzeichnung einer genormten elektrischen Leistung bei Photovoltaikzellen (Zellentemperatur = 25 °C, Bestrahlungsstärke = 1000W/m ² , Sonnenlichtspektrum gemäß AM = 1,5)
l	Länge des Leiters [m]
M	Moment [Nm]
MIV	Motorisierter Individualverkehr
M_{max}	maximales Moment [Nm]
M_N	Nennmoment [Nm]
n	Motordrehzahl [1/min]
N	Windungszahl
N_2O	Distickstoffmonoxid
NEDC	New European Driving Cycle (Neuer Europäischer Fahrzyklus NEFZ)
NO	Stickstoffmonoxid
NO_2	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickoxide (Summe aus NO und NO_2 angegeben in NO_2 -Masseäquivalenten)
OEM	Original Equipment Manufacturer (Originalausrüstungshersteller)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
$P_{antrieb}$	Antriebsleistung [W]
P_e	effektive Motorleistung [W]
P_{eBat}	effektive Batterieleistung [W]
P_{el}	elektrische Leistung [W]
P_{el_ein}	elektrische Leistung zur E-Maschine [W]
P_{Emot}	Leistung Elektromotor [W]
PHEM.....	Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model
PHEV	Plug-In-Hybrid-Electric-Vehicle (Hybridfahrzeug mit Anschluss zur Batterieladung an externem Stromnetz, „Steckdosen-Hybrid“)
PHEV-RE	Plug-In-Hybrid-Electric-Vehicle mit Range-Extender
PKW	Personenkraftwagen
PKW-VKM	Personenkraftwagen mit Verbrennungskraftmotor

PM.....	National Air Quality Standard for Particulate Matter (PM-Standard)
P_{mech}	mechanische Leistung [W]
$P_{\text{nenn_VKM}}$	Nennleistung des Verbrennungskraftmotors [W]
PV.....	Photovoltaik
P_{verl}	Verlustleistung [W]
P_{VKM}	Leistung Verbrennungskraftmotor [W]
P_{w}	Wirkleistung [W]
q.....	Ladegrad
Q.....	Blindleistung [W]
Q_0	Nennladung (Batteriekapazität) [Ah]
r.....	Radius des Rotors [m]
RE.....	Range-Extender (Reichweitenvergrößerer)
R_{ges}	Gesamtwiderstand [Ohm]
R_i	Innenwiderstand [Ohm]
S.....	Scheinleistung [W]
Sek.	Sekunden
SOC.....	State Of Charge (Ladezustand oder Ladegrad)
SOF.....	State Of Function (in der Batterietechnologie: Fähigkeit des Speichers, eine gewisse Funktion durchzuführen)
SOH.....	State Of Health (Alterung der Batterie)
SUBAT.....	Sustainable Battery Technology
SUV.....	Sport Utility Vehicle
SW.....	Software
T.....	Temperatur
THG.....	Treibhausgas
TP.....	Typenpunkt (definiert durch Nenndrehzahl und Nennmoment bei Elektromotoren)
TTW.....	Tank-to-Wheels („vom Tank bis zu den Rädern“)
U.....	Wechselspannung in Volt [V]
UCTE.....	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity (UCTE) (deutsch: Union für die Koordinierung des Transports von Elektrizität); Mitglieder sind 34 Übertragungsnetzbetreiber aus 22 Ländern
U_d	Gleichspannung [V]
U_{Klemme}	Klemmenspannung [V]
U_o	Leerlauf- oder Quellenspannung [V]
USABC.....	United States Advanced Battery Consortium
v.....	Geschwindigkeit [m/s]

V2G	Vehicle to grid („Fahrzeug ans Netz“)
VKM.....	Verbrennungskraftmotor
WTT	Well-to-Tank („von der Quelle bis in den Tank“)
WTW	Well-to-Wheels („von der Quelle bis zu den Rädern“)
μ	Permeabilität [Vs/Am]
φ	Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom
ω	Winkelgeschwindigkeit mit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60$ [rad /min]
$\omega_{\max}$	maximale Winkelgeschwindigkeit [rad /min]
ω_N	Winkelgeschwindigkeit bei Nennmoment (Nenndrehzahl) [rad /min]
Φ	Magnetischer Fluss in Weber [1 Wb = 1 Vs]

Einleitung

Elektromobilität ist ein besonders aktuelles und integratives Thema, daher müssen Verkehr, Technologie, Energiewirtschaft und ethische Werte vernetzt behandelt werden. Durch Elektromobilität wird ein sorgsamer Umgang mit der Natur (Umweltschutz) in vielen heutigen Lebenssituationen wieder möglich. Diese Diplomarbeit richtet sich an alle Akteure aus Technologie, Energiewirtschaft, Politik und Wissenschaft, die an diesem Thema arbeiten und schließt all jene mit ein, die ihrer Verantwortung als Individuum gerecht werden wollen.

In dieser Diplomarbeit wird im speziellen die Sachlage der Elektromobilität erarbeitet und auf zukünftige Entwicklungen eingegangen. Aufgrund der Aktualität der Emissions- und Klimaproblematik werden vorweg die Rahmenbedingungen abgesteckt, Umwelteinflüsse moderner Mobilität aufgezeigt und im speziellen die heutige Verkehrssituation in Österreich als chancenreiche Ausgangslage für eine „neue Mobilität“ dargestellt; eine politisch einzigartige Situation, aus der zwingend notwendige Entwicklungen bereits jetzt in richtige Bahnen gelenkt werden können. Die Frage nach dem Potential der Elektrifizierung, soweit es im Rahmen einer Diplomarbeit möglich ist, wird ganzheitlich beantwortet und ein ökologisch nachhaltiger Pfad aufgezeigt.

Diese Arbeit bietet, neben Hinweisen für bewusste Mobilität, einen Einblick in wichtige Komponenten die für die Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs und deren Zusammenhänge entscheidend sind. Die Faktenlage dieser „jungen“ Disziplin ist jedoch noch lückenhaft und im technischen Detail der Allgemeinheit nicht zugänglich. Der Entwicklungsstand von Elektromotoren, Leistungselektronik und im speziellen der Batterietechnologie wird aus der Literatur zusammengefasst und deren Zusammenhänge durch eigene Berechnungen ergänzt. Dem Verkehrstechniker wird eine Zusammenfassung von vor allem elektrotechnischem Wissen, für die Konzeptauslegung von voll- und teilelektrifizierten Automobilen, geboten.

Als Methode für die Potentialabschätzung wird die Simulation von Fahrzeugkonzepten herangezogen. Erarbeitete Fahrzeugkonzepte unterschiedlicher Kategorien werden im PHEM („Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model“), einem Fahrzeuglängsdynamikmodell mit Erweiterung zur Simulation von Verbrauch und Emissionen, simuliert. Das Modell PHEM der TU-Graz wurde im Zuge der Arbeit für elektrifizierte Fahrzeuge und deren differenzierten Einsatz verbessert. Bei der Wahl der Fahrzeugkonzepte wird vom „derzeit gängigen“ Bild eines Personenkraftwagens ausgegangen und eine ökologische Entwicklung zeitlich vorgezeichnet, welche ihren Ursprung in einem neuen Mobilitätsbewusstsein hat. Bei der Wahl der Fahrzeugkategorien wird eine Matrix gewählt, die eine Technologieentwicklung durch die Elektrifizierung und eine ökologische Entwicklung erfasst. Die Varianten der Elektrifizierung sind: PKW mit Verbrennungskraftmotor, Hybridfahrzeug, Plug-in-Hybrid (mit und ohne Range-Extender) und ein Elektrofahrzeug. Eine ökologische Entwicklung wird vom Mittelklassewagen ausgehend über den Kleinwagen bis hin zum so genannten „Greenwagen“, der eine ökologische Wagenkategorie repräsentiert, erfasst.

Für die auf ein sinnvolles Markteinführungspotential abgestimmten Konzeptvarianten werden Energieverbrauch und Abgasemissionen im Typenprüfzyklus und im realen Verkehr simuliert. Das Ergebnis wird vergleichend dargestellt und interpretiert.

Durch die Entwicklung hin zu Fahrzeugen mit weniger Verbrauch, werden Gesamtenergiebetrachtungen, die den gesamten Lebenszyklus mit einschließen immer wichtiger. Der Anteil, der z.B. für die Produktionsenergie anfällt, wird, bei einer zu

erwartenden höheren Effizienzsteigerung im Fahrzeugbetrieb als in der Fahrzeugproduktion, zukünftig steigen.

Eine weitere Problematik ergibt sich durch die Verlagerung diverser Emissionen auf die Energieerzeugung. Dadurch gewinnt der Strompfad an Bedeutung und wird mittels Daten aus einer Lebenszyklusanalyse mit dem Programm GEMIS (Globales Emissions Modell Integrierter Systeme) in das Ergebnis mit einbezogen. Es kann eine gesamtheitliche Umwelteffektbetrachtung erfolgen und die Ergebnisinterpretation auch für energiepolitische Fragen vervollständigt werden. Gerade für die Energiebereitstellung zeigt die Arbeit neben Verbesserungspotentialen neue Zukunftsherausforderungen auf. Eine Analyse von vorhandenem erneuerbaren Ressourcenpotential, das speziell für den Stromverbrauch im Verkehrsbereich verfügbar sein muss, wird die Auswertung hinsichtlich einer Gesamtlösung ergänzen.

Ein Ausblick mit Visionen rundet diese Arbeit ab und zeigt zahlreiche Möglichkeiten auf wie wir bereits jetzt lenkend eingreifen können. Mit mehr Wissen über die Elektromobilität können bessere Entscheidungen für das Gemeinwohl getroffen werden.

Daraus leitet sich ein Ziel für uns Verkehrstechniker ab: *„Entwicklung hin zu einer zukunftsfähigen Mobilität, sozial gerecht für alle Menschen“*. Diese Arbeit wird einen Beitrag dazu leisten.

Eine zukunftsfähige Mobilität braucht gerade in der global verflochtenen Verkehrsmobilität und deren Auswirkungen auf soziale, ökologische und ökonomische Wechselwirkungen einen s.g. „Globalverstand“. Dieser schärft unser weltweites Verantwortungsbewusstsein und unterstützt uns um in jeder Handlung gewissenhaft bleiben zu können. Eine österreichweite oder europaweite Lösung ist zu wenig, eine globale Lösung, mit neuem Lebensstil und bedarfsorientierter Mobilität ist das Ziel.

Einen Hauptbeitrag für diese „neue Mobilität“ wird das Bewusstsein leisten müssen. Die konkreten technischen Lösungen werden dieses ergänzen. In Sachen Bewusstsein geht es hauptsächlich um eine Loslösung der beschränkten Argumentation ein Elektrofahrzeug müsse gleiche Reichweite wie ein Fahrzeug mit Verbrennungskraftmotor und dessen fossilen Treibstoffen erreichen. Dabei ist der Großteil unserer Fahrten viel kürzer, als es die maximal mögliche Reichweite erlauben würde. Lösungsansätze für Reichweiten unter 120 Kilometer finden vor allem im ländlichen Raum sinnvolle Anwendungen für Elektrofahrzeuge. Im gut erschlossenen städtischen Bereich können öffentliche Verkehrsmittel ökologisch sinnvoller genutzt werden. Somit geben wir der Elektromobilität vorweg die einzigartige Chance in richtige Bahnen gelenkt zu werden!

Klima, Flächenverbrauch, Lärm und Biodiversität. Wenn man diese Querschnittsthemen betrachtet, stellt man sehr schnell fest, dass man allein mit Technik nicht weiterkommt. Die Politik muss das Verkehrsthema als Gesamtproblem bearbeiten. An dieser Erkenntnis hapert es noch gewaltig. Allein ein paar Elektroautos oder ein paar Tropfen Biosprit lösen keine der genannten Zukunftsaufgaben. Wir müssen Verkehr vermeiden und verlagern.

*Axel Friedrich
langjähriger Abteilungsleiter vom Umweltbundesamt in Deutschland*

3 Analyse heutiger Mobilität in Bezug auf Nachhaltigkeit

Es gibt viele wichtige Gründe warum wir uns mit der eigenen Mobilität bzw. unserem indirekten Einfluss auf Mobilität durch z.B. unserem Konsumverhalten oder Ernährungsverhalten beschäftigen sollten. Ökonomie, Ökologie, Soziologie, Ethik etc. treffen sich in der Mobilität und ringen nach vereinten Lösungen.

Ausgangsbasis für diese Arbeit sind wissenschaftliche Beweise, dass es den Menschen in seiner Existenz treffen wird, wenn er nicht lernt innerhalb der ökologischen Grenzen zu leben. Schwerwiegende Bedenken für unser Überleben liefert z.B. das *Inter-governmental Panel for Climate Change IPCC*.

In dem im Frühjahr 2007 herausgegebenem Bericht „*IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*“ [IPCC 2007a] werden noch vorhandene Zweifel bzgl. Klimaerwärmung aufgehoben und ein signifikanter Anstieg durch anthropogenen Einfluss nachgewiesen. An den übermäßigen Treibhausgasemissionen sind viele Bereiche unserer Gesellschaft beteiligt und alle brauchen ernst gemeinte Verbesserungen.

Dieses Kapitel versucht den dringlichen Handlungsbedarf bzgl. aller Umwelteinflüsse, im speziellen den Einfluss auf das Klima, zu unterstreichen und legt den Fokus im Verkehrssektor allgemein und der Elektromobilität im speziellen.

Verkehr verursacht mehr als CO₂-Emissionen

Neben Verkehrstoten, Verletzungen, Staus, Flächenverbrauch, Abhängigkeit von Rohstoffimporten etc. und deren Folgewirkungen, sind die verkehrsbedingten Emissionen nur ein Teil der Verkehrsproblematik.

Der Verkehrssektor ist lt. [IPCC 2007b] weltweit zu 95% vom Erdöl abhängig. Weiters ist er im Jahr 2004 für 23% der weltweiten energiebezogenen Treibhausgasemissionen verantwortlich, wobei davon 74% auf CO₂ Emissionen der Straßenfahrzeuge zurückzuführen sind.

Der Verkehrssektor verursacht ebenfalls geringe Mengen an CH₄ (etwa 0.1 - 0.3% der Verkehrs-Gesamtemissionen) und N₂O (etwa 2.0 - 2.8%) durch die Verbrennung und Fluorkohlenwasserstoffe von Fahrzeugklimatisierungen (5–10% der Gesamt-Verkehrs-CO₂ Emissionen; umgerechnet aus CO₂e, Daten 2003).

Das Verbesserungspotential für 2030 wird 2007 insofern noch als unsicher eingeschätzt, da es stark vom Erdölangebot, den Rohstoffkosten und den daraus folgenden Chancen für das Aufkommen von Alternativen abhängt.

Die weltweite Finanzkrise könnte 2008 bereits eine entscheidende Veränderung gebracht haben, denn Verkehr und Wirtschaft sind untrennbar miteinander verbunden. Der von einem „Systemfehler“ (Zins- und Zinseszinssystem) ausgehende Zwang nach „ewigem“ Wachstum und seinen ökologischen Folgen (wie Ressourcen- und Flächenverbrauch, Umweltverschmutzung ect.) wird sich auf einem begrenzten Planeten, mit begrenzten Ressourcen und begrenzter Atmosphäre, auch bei der Automobilbranche regulieren. In den Medien [vgl. z.B. Der Standard 2009] wird bereits im Februar 2009 von (hauptsächlich durch die Finanzkrise verursacht) stark zurückgehenden Verkaufszahlen berichtet.

Es fehlt eine Ordnung (in diesem Zusammenhang wird auch von System gesprochen) die diese Ausgangsbedingung der Begrenztheit respektiert. Eine Lösung dazu ist auch nach Auftreten der Finanzkrise nicht gefunden und stellt eine wichtige Randbedingung für zukünftige Mobilität und diese Arbeit dar.

Einsparpotentiale im Straßenverkehr werden vom IPCC wie folgt aufgelistet:

- Reduktion von Gewicht, Luftwiderstand, Rollwiderstand und Nebenaggregate,
- Steigerung der Effizienz bei Energieumwandlungen (Tank-to-Wheel) und Rekuperation von Energieverlusten,
- Wechsel zu Kraftstoffen mit weniger CO₂-Emissionen und
- Reduktion der „nicht CO₂-Emissionen“ von Klimatisierung und Abgas

Eine zukunftsfähige Lösung wird mehr brauchen als Einsparungspotentiale auszuschöpfen. Es braucht einen Systemwechsel im Verkehrsbereich. Denn jedes zusätzlich ausgestoßene CO₂ Molekül (zum im natürlichen Kreislauf befindlichen) trägt zur Klimaerwärmung bei. Ein CO₂ freier Pfad im Mobilitätsbereich muss gefunden werden wie die s.g. "**I=PAT**" Formel von [Ehrlich & Holdren 1971 zitiert nach Doka G. 2003] beweist:

Formel 1: "I=PAT" Formel

Impact = Population * Affluence * Technology

Die jährliche Umweltbelastung einer Region (Impact) ist hier gleich dem Produkt dreier Faktoren: der Bevölkerung in dieser Region (Population), den konsumierten Gütern pro Person und Jahr (Affluence = Konsumintensität), und der Umweltbelastung der konsumierten Güter (Technology = technischer Umweltschutz).

Die Arbeit an der Fahrzeugeffizienz zielt nur auf die Reduktion im letzten Faktor ab (Umweltbelastung pro Fahrzeug-Kilometer), beachtet jedoch nicht die Konsummuster der Konsumenten (Fahrzeugbesitz und Fahrzeuggebrauch) oder den gesamten Einfluss durch die Bevölkerungsanzahl. Auch beinhaltet in der Regel die Frage nach der Fahrzeugeffizienz nicht die Suche nach einem CO₂ freien Pfad.

Verdeutlicht man die Aussage der "**I=PAT**" Formel bzgl. energiebedingter CO₂-Emissionen kann sie auch so angeschrieben werden:

Formel 2: "I=PAT" Formel bzgl. energiebedingter CO₂-Emissionen

$$\text{CO}_2 \text{ anthropogen} = \text{Erdbevölkerung} * \frac{\text{Energiedienstleistung}}{\text{Erdbevölkerung}} * \frac{\text{Energieverbrauch}}{\text{Energiedienstleistung}} * \frac{\text{CO}_2 \text{ Ausstoß}}{\text{Energieverbrauch}}$$


 Pro-Kopf-Bedarf


 spezifischer
Energieverbrauch


 CO₂
Emissionsfaktor

Somit wird klar, dass nur eine technische Lösung deren gesamter Energieverbrauch keinen CO₂ Ausstoß beinhaltet, auch kein zusätzliches CO₂ verursacht. Dabei ist sowohl der gesamte Lebenszyklus eines Produktes sowie die im natürlichen Kreislauf befindliche CO₂ Menge zu berücksichtigen.

Analog kann diese Formel natürlich auch auf CH₄, N₂O und andere Emissionen angewendet werden.

Auf eine Verteilungsgerechtigkeit der Rohstoffe, soziale Missstände beim „erarbeiten“ eines Fahrzeugs, Umwelteinflüsse die durch Infrastruktur und Straßenbau verursacht werden, kann in dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden.

Zeitfaktor

Die globalen Kohlenstoffkreisläufe (Abbildung 1) zeigen die vorhandenen Ressourcen fossiler Energien. Große Öl-, Gas- und Kohlespeicher machen eine Mobilität basierend auf fossiler Energie theoretisch noch lange möglich. Durch CTL oder GTL könnten selbst heutige Fahrzeugtechnologien ohne wesentliche Veränderungen noch lange auf fossiler Basis weitergeführt werden.

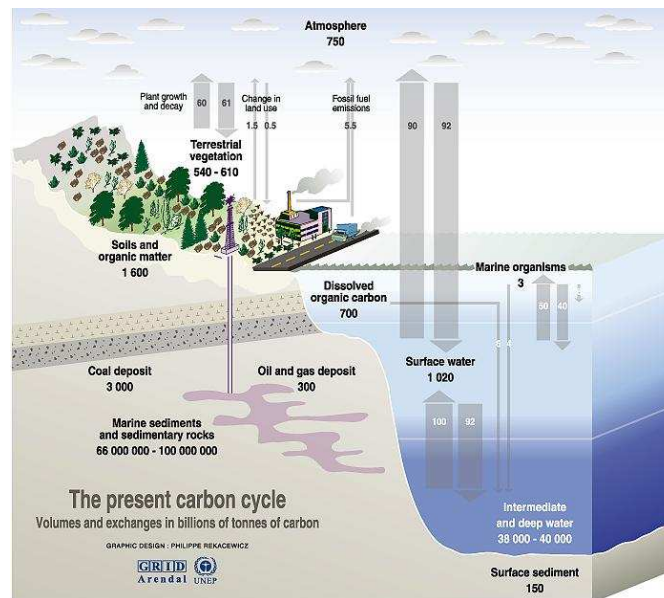


Abbildung 1: Kohlenstoffkreislauf in Milliarden Tonnen Kohlenstoff [UNEP 2009]

Nicht nur im Mobilitätsbereich, muss vor dem Aufbrauchen dieser Ressourcen, ein von fossiler Energie freier Alltag realisiert werden, wenn eine dramatische Klimaänderung vermieden werden soll.

Es bleiben offene Fragen (an unsere Zukunft):

- Wie viel an zusätzlichen Treibhausgasemissionen dürfen wir noch emittieren bevor sich die Atmosphäre so stark verändert, dass menschliches Leben nicht mehr möglich ist? Denn vor der Entwicklung zur heutigen Atmosphäre des Planeten war Leben für uns Menschen nicht möglich [vgl. Wiki_2 2009].
- Schafft die Menschheit diese Veränderung zeitgerecht, wenn die Folgen des eigenen Handelns erst eine Generation später auftreten? D.h. wenn es mehr braucht als die Regulierung durch einen Marktpreis.
- Werden diese Fragen vor oder nach den offenen Fragen der weltweiten sozialen Missstände beantwortet?

Zu warten bis die gesamten fossilen Energien verbrannt sind ist keine Option, schon alleine weil diese wertvollen Rohstoffe sinnvoller „veredelt“ werden können, als durch die Vernichtung mittels Verbrennung.

Der s.g. *Peak Oil* oder globales Ölfördermaximum ist bzgl. seines Zeitpunktes weiterhin umstritten, wird aber von der *Association for the study of Peak Oil&Gas* [ASPO 2004] auf 2010 berechnet (Abbildung 2). Aus den oben ausgeführten Angaben wird klar, dass dieses Maximum mehr für die Veredelungsthematik als die Verbrennung relevant sein wird.

An dieser Stelle soll noch angemerkt werden, dass alle Rohstoffe die im Verkehrsbereich zum Einsatz kommen endlich sind.

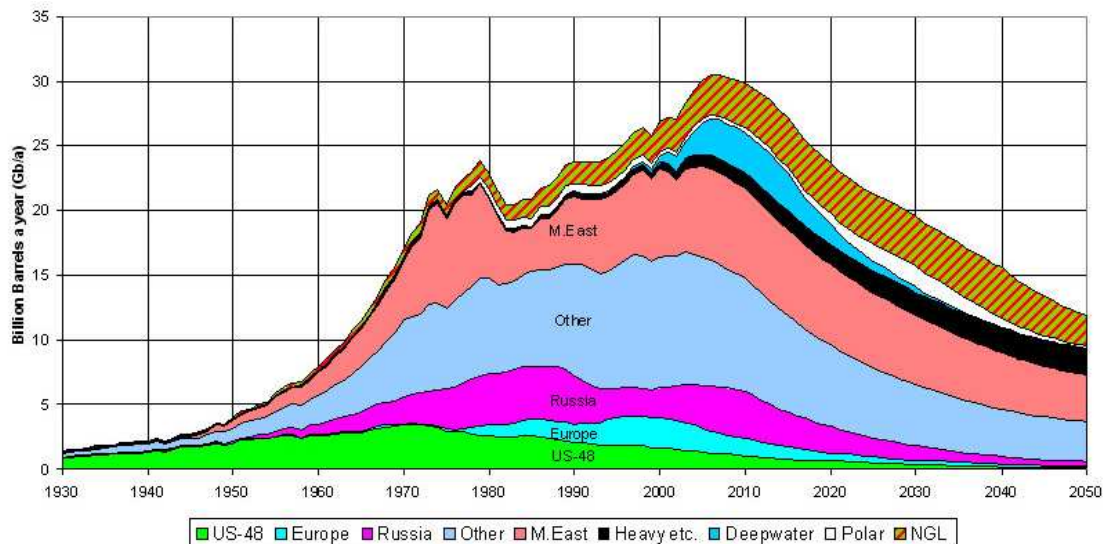


Abbildung 2: Weltölproduktion (Erdöl- und Flüssiggas-Förderung), Szenario 2004 [ASPO 2004]

Damit ist, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, der Argumentation genüge getan, sich um treibhausgasneutralen Energieeinsatz im Verkehrsbereich zu kümmern. Lediglich unbekannte klimatische Phänomene oder mögliche Methoden der sicheren (inkl. erneuerbaren) „CO₂ Absaugung aus der Atmosphäre“ und Speicherung dieser, würden die Ausgangslage gravierend verändern. Derzeit ist dazu keine technische Lösung in Aussicht. Es würden die Probleme der Energieknappheit, Abhängigkeit bzgl. Rohstoffimporte und die nicht CO₂ bedingten Umwelteinflüsse bleiben.

3.1 Umwelteinflüsse moderner Mobilität

Jeder Umwelteinfluss des Menschen kann grundsätzlich positiv, neutral aber auch negativ sein. Die durch den heutigen Verkehr bereitgestellte Mobilität hat oberflächlich betrachtet positive Auswirkung auf den Menschen. Die wesentlichsten Umwelteinflüsse des heutigen Verkehrs sind in dieser Betrachtung jedoch grundsätzlich als negativ auf die natürliche Umgebung des Menschen zu beurteilt. Dabei wird nicht vergessen, dass es einen Nutzen für den Menschen einschließt, wenn er mobil ist sondern berücksichtigt, dass der Mensch nicht nur Teil der Natur sondern selbst Natur ist [Machatscheck 2008]. Die Abhängigkeit des Menschen von der Umwelt wird dadurch genauso schnell deutlich, wie auch der sich selbst schädigende Mechanismus, der nur zeitlich begrenzt ignoriert werden kann.

Die Suche nach einem Mobilitätsnutzen für den Menschen bei geringstem (über die Zeit neutralen) Umwelteinfluss wird somit zur Aufgabe der Überlebenssicherung.

Durch den Verkehr hervorgerufene Umwelteinflüsse sind [BMVIT 2007, S.164]:

- Energieverbrauch
- Schadstoffemissionen (inkl. Feinstaub)
- Lärmemissionen
- Flächenverbrauch
- Oberflächenversiegelung
- Zerschneidungseffekte von Ökosystemen
- Auswirkungen auf das Landschaftsbild

4 Verkehrssituation in Österreich

Dieses Kapitel hält die chancenreiche Ausgangslage für die Elektromobilität in Österreich, v.a. aus statistischen Daten und Berichten aus dem Umweltbundesamt, fest.

4.1 Statistische Daten

Aus statistischen Daten [Hausberger 2008] kann ein guter Einblick in den derzeitigen Fahrzeugbestand in Österreich gegeben werden.

Die geschichtliche Betrachtung ab 1950 (Abbildung 3) gibt eine Übersicht über die auffällige Entwicklung v.a. im Bereich der Personenkraftwagen.

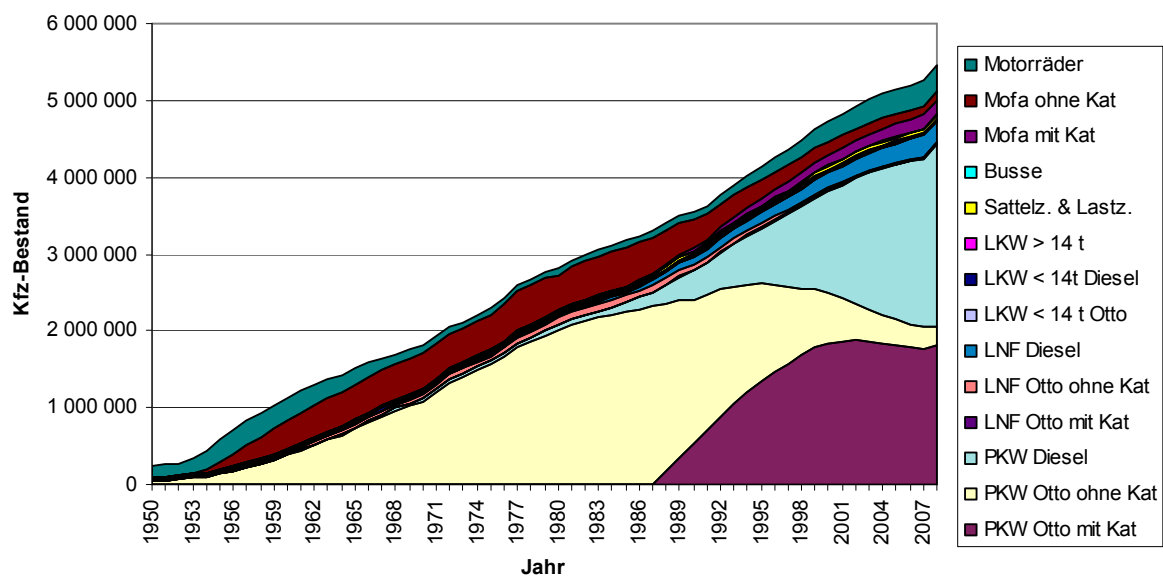


Abbildung 3: Kfz Bestand ab 1950 im Überblick [Hausberger 2008]

Eine Entkopplung von Wirtschafts- und Verkehrswachstum wird seit langem als Ziel gesehen, die Betrachtung von Bruttoinlandsprodukt GDP, Güter- und Personentransport aus [Energy&Transport 2004] zeigt bis 2003 noch keine Wirkung.

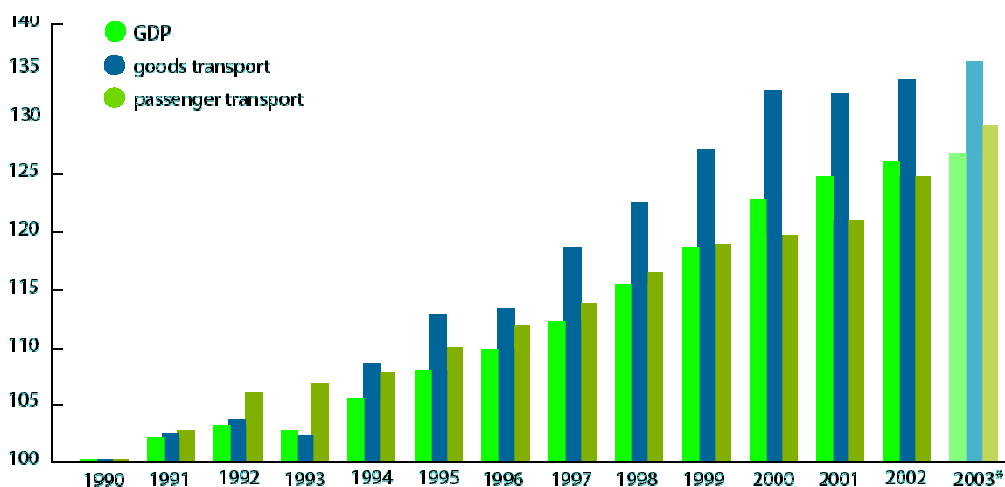


Abbildung 4: Relatives Wachstum des Bruttoinlandsproduktes, Personentransport und Gütertransport der EU-15 Länder [Energy&Transport 2004]

In Tabelle 1 wird ein detaillierter Überblick über den Kfz-Bestand nach Fahrzeugart im Jahr 2008 gegeben. Der Gesamtbestand an Personenkraftwagen liegt 2008 bei 4.284.919 Fahrzeugen. Hauptantriebsarten sind davon Diesel mit 54,2% und Benzin mit 45,7%. Elektrofahrzeuge sind weit abgeschlagen mit nur 146 Fahrzeugen. Insgesamt sind es 5.873.281 Kraftfahrzeuge in Österreich (ohne Berücksichtigung der Anhänger) im Jahr 2008.

Tabelle 1: Kfz-Bestand 2008 nach Fahrzeugarten [Statistik Austria_b 2009]

Fahrzeugarten	Bestand 2008	Anteil in %
Personenkraftwagen Kl. M1	4 284 919	73.0
<i>davon</i>		
<i>Diesel</i>	2 323 016	54.2
<i>Benzin</i>	1 957 751	45.7
<i>Sonstiger Antrieb ¹⁾</i>	4 006	0.1
<i>Elektro</i>	146	0.0
Motorräder Kl. L3e	211 830	3.6
Motorfahrräder Kl. L1e	301 399	5.1
Mehrspurige Kraftfahrzeuge Kl. L5e und L7e ²⁾	11 000	0.2
Mehrspurige Leichtkraftfahrzeuge Kl. L2e und L6e ³⁾	16 539	0.3
Kleinmotorräder Kl. L3e	1 193	0.0
Leichtmotorräder Kl. L3e	149 282	2.5
Omnibusse Kl. M2 und M3	9 368	0.2
Lastkraftwagen Kl. N	362 990	6.2
Zugmaschinen ⁴⁾	423 399	7.2
Sattelzugfahrzeuge	18 348	0.3
Motorkarren	11 808	0.2
Selbstfahrende Arbeitsmaschinen	16 032	0.3
Erntemaschinen	10 645	0.2
Sonstige Kraftfahrzeuge ⁵⁾	44 529	0.8
Kfz insgesamt	5 873 281	100.0

Daraus wird offensichtlich, welche Voraussetzungen die Elektromobilität heute hat: eine sehr hoher Motorisierungsgrad bei keinem signifikanten Anteil an Elektrofahrzeugen.

4.2 Klima- und Emissions-Problematik des Verkehrssektors

Laut Klimaschutzbericht der Umweltbundesamt GmbH [Umweltbundesamt 2008] betrugen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2006 in Österreich 91,1 Mio. Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente (CO₂-Äquivalente). Damit lagen sie um 15,1% über dem Niveau von 1990.

Den stärksten Anstieg der THG-Emissionen seit 1990 verzeichnet der Sektor Verkehr mit einem plus von 10,6 Mio. Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente bzw. 83,0%.

Das Kyoto-Protokoll, welches am 16. Februar 2005 in Kraft trat, sieht eine Verminderung der THG der Europäischen Union um 8% in der Verpflichtungsperiode 2008 bis 2012 gegenüber 1990 vor. Für Österreich gilt aufgrund EU-interner Regelungen ein Reduktionsziel für die Kyoto-Verpflichtungsperiode zwischen 2008 und 2012 von minus 13% bezogen auf die Emissionen des Jahres 1990.

Aus der Betrachtung einzelner Sektoren können die Bereiche mit dem größten Verbesserungspotential festgestellt werden. (Abbildung 5)

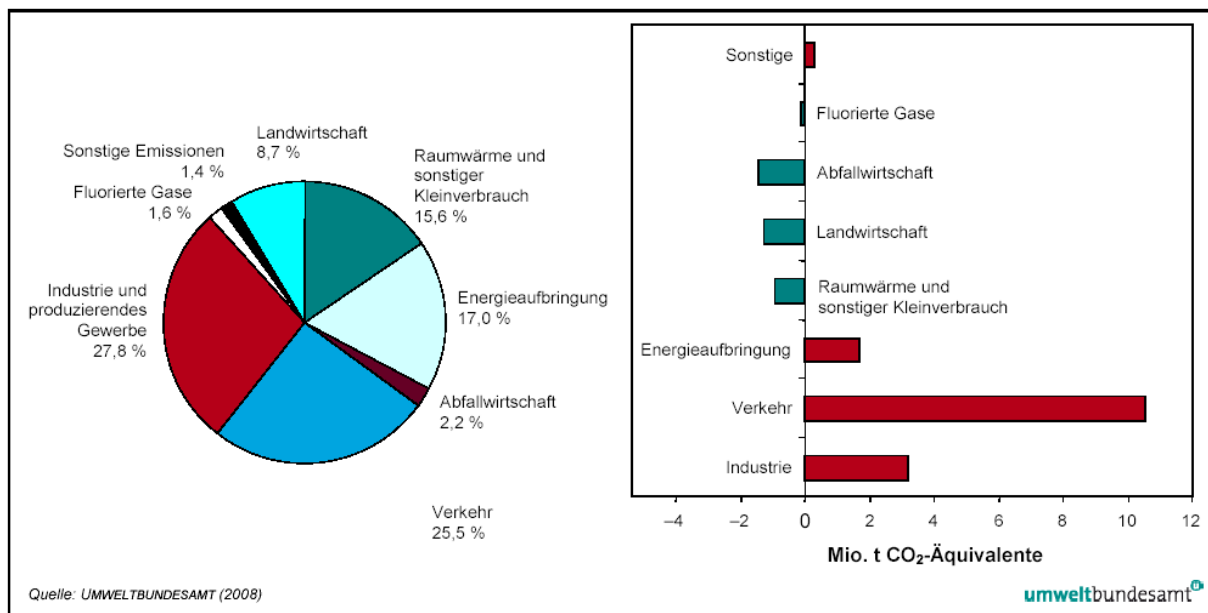


Abbildung 5: Anteil der Sektoren an den gesamten THG-Emissionen 2006 (links) und Änderungen in den Sektoren zwischen 1990 und 2006 (rechts) [Umweltbundesamt 2008]

Die wesentlichen Verursacher der österreichischen Treibhausgasemissionen waren im Jahr 2006 die Sektoren Industrie und produzierendes Gewerbe (27,8%), Verkehr (25,5%), Energieaufbringung (17,0%), Raumwärme und sonstiger Kleinverbrauch (15,6%) sowie Landwirtschaft (8,7%). Diese Sektoren sind für rund 95% der THG-Emissionen verantwortlich.

Als Hauptemittent ist in Österreich der Straßenverkehr mit 94,3% der THG-Emissionen des gesamten Verkehrssektors bedeutend höher als weltweit mit 74%. Davon werden 38,3% vom Güterverkehr und 56,0% vom Personenverkehr verursacht. Die restlichen 5,7% der THG-Emissionen des Verkehrssektors verteilen sich auf Emissionen aus Bahn, Schiff, nationalem Flugverkehr, mobilen militärischen Geräten und Pipelines.

Kohlendioxid ist bei der Treibhausgasbetrachtung das Treibhausgas mit dem größten Anteil (2006: 84,8% an den gesamten Treibhausgasemissionen). CO₂ tritt vorwiegend bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Erdgas, Erdöl und Kohle auf und ist damit in den Sektoren Verkehr, Energieaufbringung und Industrie und produzierendes Gewerbe maßgebend. Im Zeitraum 1990 bis 2006 sind die CO₂ Emissionen um 24,5% gestiegen.

Ergänzend muss zum Sektor Verkehr noch erwähnt werden, dass die THG-Emissionen nicht nur auf die gestiegenen Fahrleistungen zurückzuführen sind, sondern auch der preisbedingte Kraftstoffexport aufgrund vergleichsweise niedriger Treibstoffpreise in Österreich, im Vergleich zu v.a. Italien und Deutschland, verantwortlich ist. Von den insgesamt 23,3 Mio. Tonnen THG-Emissionen des gesamten Verkehrssektors wurden 16,9 Mio. Tonnen durch Verkehr im Inland verursacht. Die Last von 6,4 Mio. Tonnen (~ 27%) tragen weiterhin die Österreicher. Weitere Einflussfaktoren sind: Steigender Anteil des Straßenverkehrs am Personenverkehr, Energieeffizienz (sinkender Energieverbrauch pro Straßenpersonenkilometer), Einsatz von „Agrotreibstoffen“. [Umweltbundesamt 2008]

5 Alternative Mobilität im Überblick

Der Verkehrssektor steht vor der großen Herausforderung die Treibhausgasemissionen zu senken. Der gegenläufige Trend, in dem der gesamte Einflussbereich des Mobilitätssektors berücksichtigt werden muss, wurde bereits oben erläutert.

Mobilität (lat. mobilitas, Beweglichkeit) bezeichnet ganz allgemein die Beweglichkeit oder Bewegung. Mithilfe folgender Attribute kann dieser Begriff genauer spezifiziert werden: geistige, virtuelle, elektrische, räumliche, soziale, nachhaltige, zirkuläre ect. oder eben alternative Mobilität. Im verkehrlichen Kontext wird hier der Begriff Mobilität auf die Beweglichkeit des Menschen außer Haus mit dem Zweck der Überwindung räumlicher Distanzen eingeschränkt.

Alternative Mobilität meint hier die „Fortbewegung“ also eine Art der physischen Beweglichkeit (alternative Verkehrsmobilität). Dabei wird von einer „normalen“ individuellen Mobilität ausgegangen, die geschichtlich gewachsenen auf dem Verbrennungskraftmotor basiert. Zu Fuß gehen, Rad fahren und öffentliche Verkehrsmittel zählen in diesem Zusammenhang ebenfalls zur alternativen Mobilität.

Was den motorisierten Individualverkehr betrifft ergeben sich folgende alternativen Antriebe: Elektro-, Solar-, Hybrid-, Holzvergaser-, Luft-, Brennstoffzellen-, Dampf- und Wasserstoffantrieb die durch deren alternative „Treibstoffe“ wie Strom, Biomasse, Luft, Dampf und Wasserstoff erst möglich werden. Eine sich auf die Elektrifizierung beziehende Übersicht dazu bietet Abbildung 6.

Alternative Mobilität darf sich aus technischer Sicht keinesfalls nur mit alternativen Antrieben, sondern muss sich auch mit den alternativen (erneuerbaren) Energiequellen beschäftigen. Die gesamte Energiekette ist zu betrachten. Diese Entwicklung kann aber ebenso wenig von einem sich weiterentwickelnden Bewusstseinprozess des mobilen Menschen der westlichen Welt losgelöst werden. Gerade ein neues Verständnis von Mobilität wird entscheidend sein um technische Verbesserungen in den Alltag integrieren zu können.

Es wird, um ein Beispiel zu nennen, notwendig v.a. an dem heutigen Verständnis von Reichweite zu arbeiten. Damit ist an dieser Stelle der Vergleich von einem mit Verbrennungskraftmotor betriebenem Fahrzeug und einem Elektrofahrzeug gemeint. Die aus dem Kraftstoff „naturgegebene“ Reichweite, darf für ein „neues“ emissionsfreies Mobilitätsverständnis nicht mehr als gegebene oder notwendige Bedingung hingenommen werden.

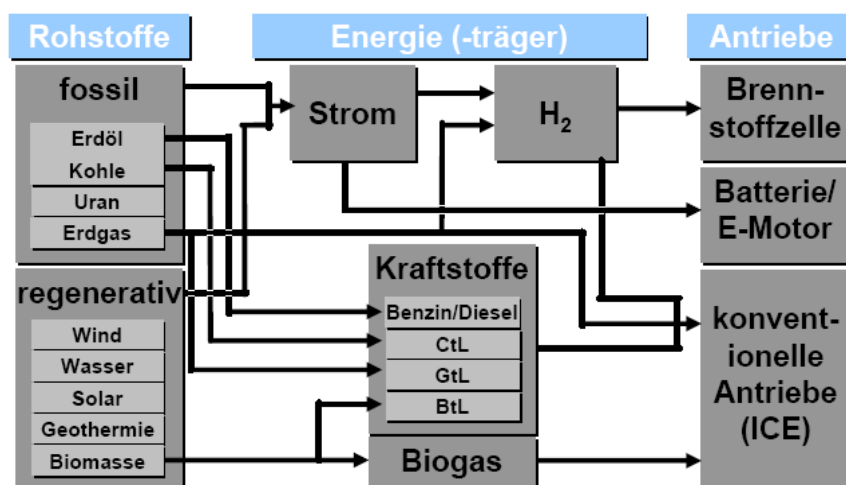


Abbildung 6: Übersicht der Energiebereitstellung von ICE, E-Motor und Brennstoffzelle [Leopold 2008]

Dieses Kapitel soll einen Einblick in die alternativen Antriebskonzepte mit Fokus auf die Elektrifizierung geben.

5.1 Elektrifizierung im motorisierten Individualverkehr

Unter Elektrifizierung wird in dieser Arbeit das Ergänzen oder vollständige Ersetzen des Verbrennungskraftmotors im PKW durch einen Elektromotor verstanden. Der Wirkungsgrad des VKM wird vor allem beim sehr geringen Teillastwirkungsgrad durch den hocheffizienten Elektroantrieb verbessert.

Die Elektrifizierung konventioneller Fahrzeuge senkt somit im elektrischen Fahrbetrieb den Energieverbrauch, wobei die Fahrzeuge zusätzlich vor Ort emissionsfrei und lärmarm sind. Damit entstehen lokal ökologische Vorteile gegenüber einem mit VKM betriebenen Fahrzeug. Zu beachten ist, dass dadurch der Pfad der Stromerzeugung unbedingt berücksichtigt werden muss und bzgl. Emissionen an Bedeutung gewinnt.

Der vorgezeichnete Entwicklungspfad wird, vorweg ohne Simulationsergebnis aus [Abe 2008] in Abbildung 7 hinsichtlich CO_2 und NO_x dargestellt.

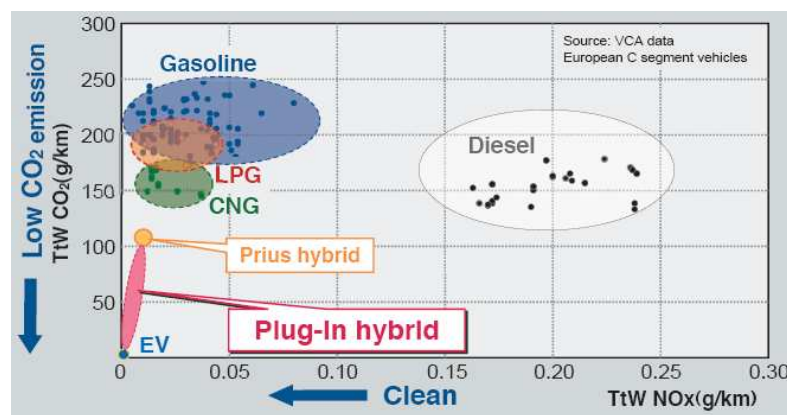


Abbildung 7: CO_2 und NO_x Emissionen im Fahrzeugbetrieb zeigen Entwicklungsmöglichkeiten vom Hybrid- hin zum Elektrofahrzeug [Abe 2008]

Während dem Elektrofahrzeug langfristig das Potenzial zu einer Systemänderung und damit einer deutlichen Verbesserung der Emissionen im Mobilitätsbereich zugetraut wird, gelten vor allem Plug-In-Hybrid und Hybridantriebe als Technologie, mit denen schon kurz- bis mittelfristig eine signifikante Verbrauchsreduktion realisierbar ist.

Die Kombinationsmöglichkeiten (Abbildung 8) von Verbrennungsmotor und Elektromotor sind vielfältig. Auf diese Konzepte wird im Folgenden näher eingegangen.

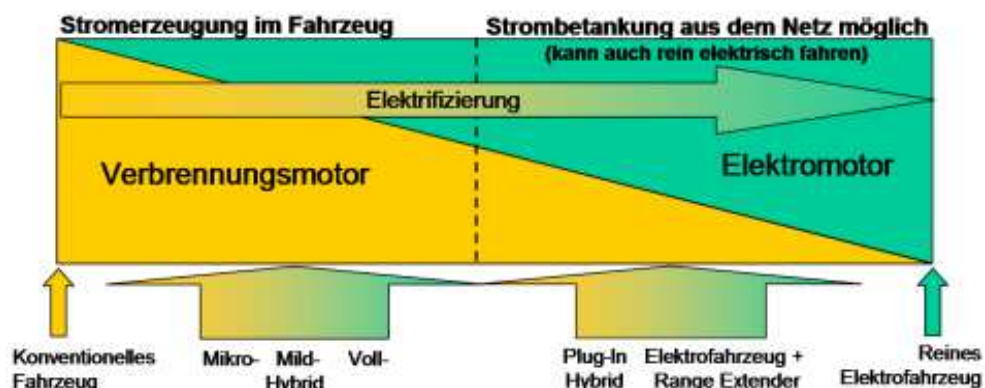


Abbildung 8: Kombinationsmöglichkeiten von Verbrennungsmotor und Elektromotor [IFEU 2009]

Die Anforderung an die Fahrzeugsteuerung steigt mit der Elektrifizierung. Neue Komponenten wie z.B. Elektromotoren, Batterien, Leistungsumrichter, Spannungswandler sowie weitere elektrifizierte Bauteile (Bremse, Lenkung, Klimakompressor, Getriebeaktuatoren, etc.) kommen zum Einsatz. Diese müssen mit den bereits bestehenden Systemen abgestimmt werden.

5.2 Hybridfahrzeug HEV

Das Wort "Hybrid" kommt ursprünglich aus dem Griechischen und bedeutet "gemischt, von zweierlei Herkunft". Ein Hybridfahrzeug ist demzufolge per Definition ein Fahrzeug mit zweierlei Energiearten beziehungsweise Antrieben. Die am weitesten verbreitete Hybridvariante ist die Kombination aus Verbrennungsmotor (also Diesel oder Benzinmotor als Hauptenergiequelle) und elektrischer Maschine mit einem elektrischen Speicher in Form einer Batterie, Brennstoffzelle oder Doppelschichtkondensatoren. [Hybrid-Autos 2009]

Als Vorteile für einen Elektro-Hybrid gelten [vgl. Naunin 2007]:

- wirkungsgradgünstigere Betriebsweise des VKM (wird durch die Strategie möglich),
- möglicher abgasfreier und geräuschreduzierter Fahrbetrieb in sensiblen Gebieten im rein elektrischen Betrieb,
- reduzierter Energieverbrauch durch Rekuperation und
- Reduktion des Kraftstoffverbrauchs speziell im städtischen Betrieb.

Das Kraftstoffeinsparpotential ergibt sich einerseits durch die Kombinationsmöglichkeit der Vorteile unterschiedlicher Antriebe (Strategie) und andererseits durch die Speicherung der Bremsenergien bei Verzögerungen des Fahrzeugs.

Als wesentlichste Nachteile können:

- Zunahme des Fahrzeuggewichts (ca. 5 – 10%),
- Großer Bauraumbedarf für den Antriebstrang,
- Zusätzliche Rohstoffeinsatz und Recyclingaufwand der Hybridkomponenten und
- Komplexität des Antriebstrangs

genannt werden.

Exkurs Verbrennungskraftmotor

Die motorische Verbrennung funktioniert am besten im optimalen Arbeitspunkt, bei konstanter Drehzahl und bei möglichst gleichmäßiger Belastung. Der Bereich des geringsten spezifischen Kraftstoffverbrauchs kann in einer Darstellung der Momentenverläufe (Abbildung 9) gefunden werden. Im realen Verkehr mit Kaltstart, Überholmanöver, Änderungen der Fahrbahnverläufe ect. sind diese stationären Bedingungen selten gegeben.

Bei einer Untersuchung an der TU Graz [Eichlseder et al. 2008] wurde festgestellt: Im ARTEMIS Stadt- bzw. Freiland - Fahrzyklus erreichen die Dieselmotoren Wirkungsgrade von 21% bzw. 27%, die Ottomotoren erzielen in den realen Fahrzyklen Wirkungsgrade von 15% bzw. 20,5%. Im europäischen Zulassungszyklus liegen die Wirkungsgrade im ECE Teil für Dieselmotoren zwischen 11% und 15%, Ottomotoren erzielen 9% bis 14%.

Bei den Dieselmotoren liegt der Wirkungsgrad zu Testbeginn (während des Warmlaufes) um 16% bis 20% niedriger als im betriebswarmen Zustand. Bei den Ottomotoren liegt der Wirkungsgrad zu Testbeginn um 17% bis 37% unter den Werten für betriebswarmen Motor. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die aus Rücksicht auf Emissionen und Komfort notwendige Anpassung der Betriebsparameter.

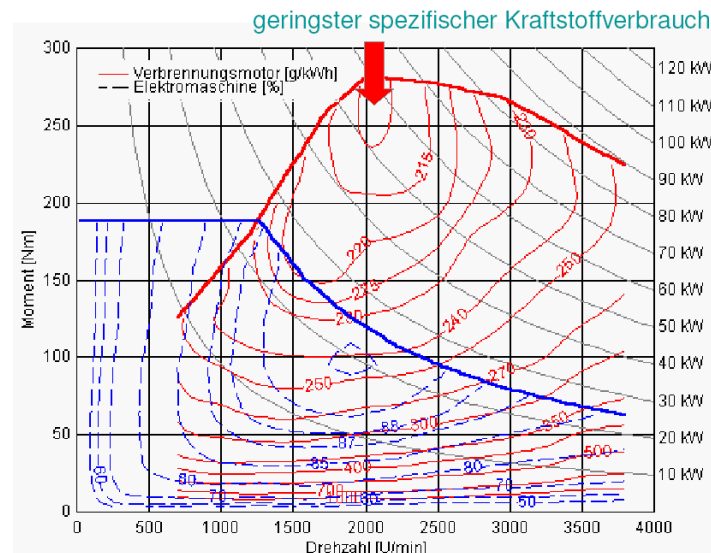


Abbildung 9: Momentenverlauf von Verbrennungskraftmotor und Elektromotor
[Wallentowitz et al. 1999]

Eine Kombination von VKM und Elektromotor erlaubt es, je nach Konfiguration, den VKM für kleinere Leistungen auszulegen, ganz abzuschalten oder wirkungsgradungünstigere Betriebsbereiche (Teillastbereich) durch Lastpunktanhebung zu vermeiden. Eine Reduktion des Verbrauchs durch eine Erhöhung der Motorlast zu besseren Wirkungsgradbereichen führt beim Dieselmotor jedoch zu höheren NO_x -Emissionen. Somit muss für Verbrauch und einzelne Emissionskomponenten eine Kompromisslösung, gefunden werden.

Hybridantriebe werden nach der Antriebsstruktur in drei Grundstrukturen unterteilt: parallel und serielle Konzepte sowie Mischformen dieser [Wallentowitz et al. 1999 zitiert nach Back 2005]:

Beim parallelen Hybrid sind VKM und Elektromotor mechanisch mit den Antriebsrädern gekoppelt. Komponenten eines Parallelhybrids sind: zwei Motoren, ein Kraftstofftank und eine Batterie als Energiespeicher, ein Getriebe und mindestens eine Kupplung. Durch diese Anordnung kann das Fahrzeug entweder rein elektrisch, rein verbrennungsmotorisch oder von beiden Motoren angetrieben werden. Die Leistungsaddition bringt den Vorteil der möglichen kleineren Auslegung, da keiner der beiden Motoren die maximale Antriebsleistung alleine aufbringen muss. Durch einen direkten mechanischen Durchtrieb vom VKM bis zum Rad fallen elektrische Umwandlungsverluste, wie beim seriell Hybrid weg und bietet somit hohes Potential für die Kraftstoffeinsparung. Ein stationärer Betrieb des VKM ist nicht Teil des Konzepts. (Abbildung 10, Abbildung 11 - links)

Beim seriellen Hybrid besteht der Antriebsstrang aus einer seriellen Anordnung von einem VKM, einem Generator und einem Elektromotor. Der VKM treibt den Generator an und dieser erzeugt Strom. Dadurch wird der Betrieb des Elektromotors sichergestellt oder der Strom teilweise in der Batterie zwischengespeichert. Der Elektromotor muss aus diesem Grund so dimensioniert werden, dass er die volle Antriebsleistung leisten kann. Der Hauptvorteil eines seriellen Hybrid liegt darin, dass ein konstanter Betrieb des VKM im besten Wirkungsgrad oder bei geringsten Emissionen realisierbar ist. Ein Nachteil ist jedoch die lange Wirkungsgradkette durch zweifache Energiewandlung (mechanisch - elektrisch - mechanisch) und einer eventuell erforderlichen Zwischenspeicherung in der Batterie. Ist die Batterie voll, muss der VKM auch instationär betrieben werden. (Abbildung 11 - mitte)

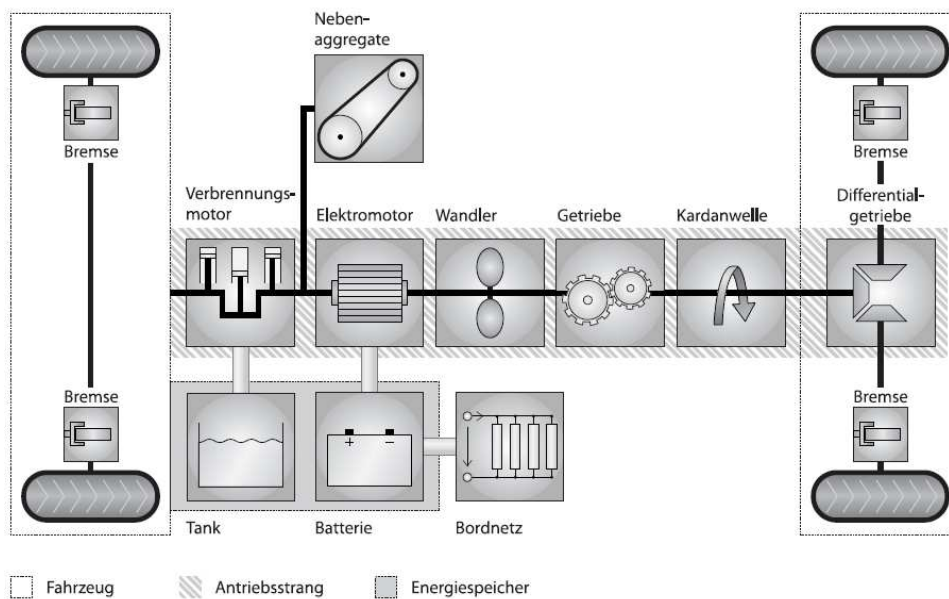


Abbildung 10: Aufbau eines parallelen Hybridfahrzeuges
[Wallentowitz et al. 1999 zitiert nach Back 2005]

Eine mögliche und viel versprechende Mischform stellt ein leistungsverzweigender Hybrid dar, der im Toyota Prius bereits im Serieneinsatz ist. Aufgrund der teilweise direkten Übertragung der mechanischen Leistung ist der Wirkungsgrad besser als bei einem seriellen Hybrid. (Abbildung 11 - rechts)

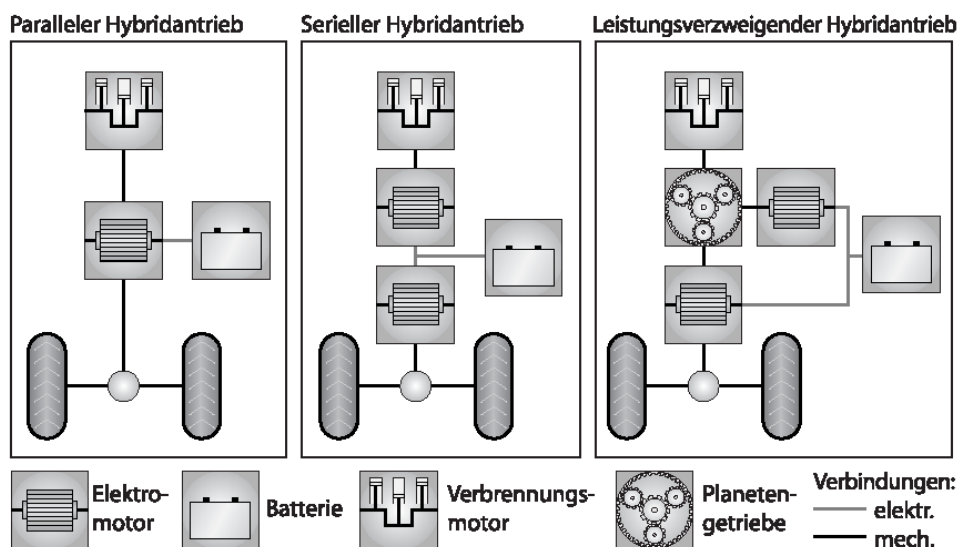


Abbildung 11: Beispielhafte Strukturvarianten von Hybridfahrzeugen [Back 2005, S6]

Nach umfangreichen Systemuntersuchungen ist der Standpunkt vieler OEM, dass dem Parallel-Hybrid der Vorzug zu geben ist. Als entscheidender Vorteil wird die Modularität für eine noch ungewisse Stückzahlentwicklung in [VDI Bericht_a 2006] angegeben.

Weitere Vorteile des Parallel-Einwellenhybrid sind [vgl. Küçükay 2008]: nur eine benötigte elektrische Maschine, gutes Kosten Nutzenverhältnis, geringer Bauraumbedarf, geringes Mehrgewicht und Verwendungsmöglichkeit konventioneller Antriebskomponenten. Dem steht der Nachteil eines nicht frei wählbaren Betriebspunktes für den VKM gegenüber.

Es können drei Arten unterschieden werden wie Elektro- und Verbrennungskraftmotor überlagert werden können:

- Drehzahladdition (Planetengetriebe, bei starrem Momentenverhältnis und frei wählbaren Drehzahlen)
- Momentenaddition (direkte Kopplung, mit Stirnrad oder Kette)
- Zugkraftaddition (Elektro- und VKM wirken auf unterschiedlichen Achsen des Fahrzeugs)

Die Momentenaddition wird beispielhaft in Abbildung 12 dargestellt:

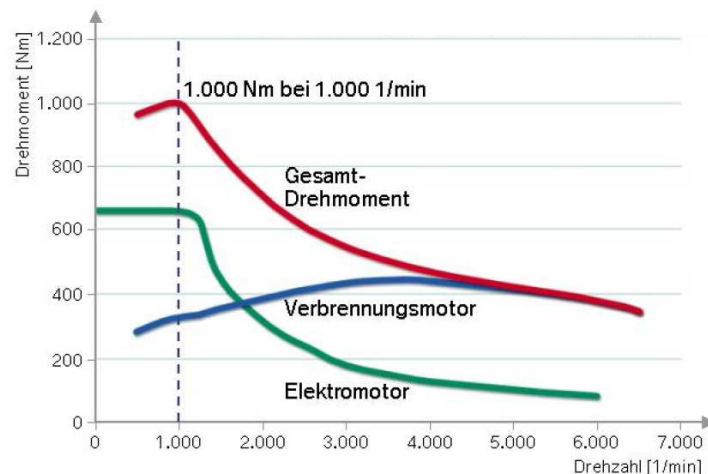


Abbildung 12: Drehmomentenverlauf von Elektromotor und Verbrennungsmotor [Göschel 2004]

Je nach Hybridisierungsgrad H der mit $H = P_{el} / (P_{el} + P_{VKM}) * 100$ [%] definiert ist, kann in folgenden Hybridisierungsstufen: Micro-Hybrid (H ca.5%), Mild-Hybrid (H ca.10%) und Full-Hybrid (H ca.25%) eingeteilt werden. Eine übliche Funktionsübersicht wird in Abbildung 13 gezeigt.

Art	Zusätzliche Funktionen				
	Elektrische Verbraucher	Start-Stopp	Boosten	Rekuperation	Elektrisches Fahren
Micro	✓	✓			
Mild	✓	✓	✓	✓	
Full	✓	✓	✓	✓	✓

Abbildung 13: Übersicht der Hybridisierungsstufen und ihre Funktionen [Küçükay 2008]

Das Start Stopp Potential ist abhängig vom Leerlaufverbrauch, der Stehzeit und Stehhäufigkeit.

In dieser Arbeit wird für die Simulation der Parallel-Hybrid mit den Funktionen eines Full-Hybrid verwendet.

Hybridstrategie

Aus der Notwendigkeit eines effizienten Zusammenspiels zwischen VKM, Elektromotor und deren Speicher ergeben sich für den Fahrbetrieb viele Strategiemöglichkeiten, die an dieser Stelle nur erwähnt, nicht aber im Detail erklärt oder analysiert werden sollen.

Grundsätzlich kann ein Hybrid rein elektrisch, rein verbrennungsmotorisch oder wie z.B.: beim Boosten in Kombination angetrieben werden.

Für eine ganzheitliche Strategie sollten folgende Funktionen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, beachtet werden:

Start-Stopp, rein elektrisches Fahren, Boosten, Rekuperation, emissionsfreies Fahren, Lastpunktverschiebungen beim VKM, Allradfunktion, Fahrbarkeit, Energiemanagement der Batterie, Temperaturmanagement der Bauteile und des Fahrzeuginnenraumes, emissionsminimiertes Fahren, Abstimmung auf eine Fahrsituation (Stau, Langstrecke, Kurzstrecke, ...), ect.

Diese Auflistung macht deutlich wie differenziert die Strategie ausfallen kann. Gleiches unter anderen Voraussetzungen am Fahrzeug gilt für PHEV und PHEV-RE. Welche Strategie für die Simulation herangezogen wurde wird später gezeigt.

5.3 Plug-in-hybrid-elektrisches Fahrzeug PHEV

Mit der Vergrößerung der Batterie und einer Netzanbindung geht die Möglichkeit einher, über das externe Stromnetz (z.B. nachts in der Garage) zu laden und größere Strecken rein elektrisch zurückzulegen. Solche Fahrzeuge sind unter dem Begriff "Plug-In-Hybrid" bereits bekannt. Bei einem solchen Antriebskonzept kann ein Teil der jährlichen Fahrleistung rein elektrisch mit "Strom aus der Steckdose" erbracht werden. Dadurch ergeben sich wie in Kapitel 6 beschrieben die Vorteile eines rein elektrischen Antriebs und ein zum HEV weiteres Kraftstoffeinsparpotential durch geeigneten Energiemix und Möglichkeiten für neue Fahrzeugkonzepte (höhere Batteriekapazitäten und kleinere VKM Motoren), wobei die notwendige höhere Batteriekapazität zusätzliche Kosten beinhaltet.

Für die Anzahl der Fahrten, die über die Reichweite der Batteriekapazität hinausgehen, ist ein VKM in geringfügig kleinerer oder gleicher Ausführung wie beim HEV vorhanden.

Bezeichnungen für diverse Konzepte sind je nach Hersteller unterschiedlich. Hier werden beispielhaft jene aus [Mohr dieck 2007] in Abbildung 14 angeführt:

- HEV mit Steckdose (also keine oder geringe Batterieergrößerung)
- PHEV Minimalversion
- PHEV Verbesserte Version

HEV with Plug Socket	PHEV Minimum Version	PHEV Advanced Version
➤ Same battery-size than a conventional hybrid (~2 kWh) ➤ No additional battery costs ➤ Lower operating costs ➤ Charging up to 80 % *SOC ➤ Pure electric operation until 50 % SOC (ΔSOC ~ 30 %) ➤ Pure electric drive range up to 2 miles ➤ Increased strain on battery	➤ Larger battery than a conventional hybrid (~ 5 kWh) ➤ Higher battery weight ➤ Higher battery costs ➤ Lower operating costs ➤ Pure electric drive range up to 10 miles ➤ Battery size increased to suit additional energy throughput	➤ Larger battery than a conventional hybrid (> 10 kWh) ➤ Considerably higher battery costs ➤ Considerably higher battery weight ➤ Lower operating costs ➤ Packaging not possible in existing passenger vehicles ➤ Pure electric drive range exceeds 10 miles ➤ Further battery-development is necessary (higher energy-density)

*SOC = State of Charge

Abbildung 14: Verschiedene Plug-In-Hybrid Konzepte und deren Eigenschaften [Mohr dieck 2007]

Einen weiteren Typen stellt der PHEV mit **Range-Extender (PHEV-RE)** dar. Ein aus ökologischer Sicht kleinst möglich ausgeführter VKM, also ein Range-Extender RE („Reichweitenvergrößerer“), wird nur mehr dazu benutzt, die in der Praxis seltenen und durch die Batteriekapazität nicht abgedeckten Reichweiten zu überbrücken. Dementsprechend hohe Batteriekapazitäten sind notwendig um den Einsatz des Range-Extenders gering zu halten. Wobei der RE je nach Konzept, entweder zum direkten Antrieb, dem Laden der Batterie oder mit Hilfe eines Generators als Stromquelle für den Elektromotor genutzt wird.

Die Leistung des Range-Extenders kann auf die mittlere benötigte Leistung des Fahrzeuges ausgelegt werden, denn Leistungsspitzen werden durch die Batterie gepuffert und können durch Management im Fahrzeug vorzeitig sichergestellt werden.

Neben anderen ökologisch sinnvollen Maßnahmen kann bei einer zusätzlichen vernünftigen Einschränkung der Maximalgeschwindigkeit die Nennleistung des RE weiter Reduziert werden. Die aktuellen Grenzwerte für Schadstoffemissionen sind einzuhalten.

5.4 Elektrofahrzeug BEV

Ein Elektrofahrzeug ist generell ein Fahrzeug, das mit einem Elektromotor betrieben wird.

Dieses muss aber nicht dauerhaft mit einem mitgeführten Energiespeicher betrieben werden. Die elektrische Energie kann mit einer Batterie oder einer Brennstoffzelle bereitgestellt werden oder eine Überkopfleitung, wie bei einem Oberleitungsbus, könnte für die Energiebereitstellung und somit eine „unendliche“ Reichweite sorgen. Für diverse Regionen und spezielle Anwendungen eine technisch machbare Lösung, die hier als Gedanke festgehalten wird. Ein Elektrofahrzeug für diese Arbeit ist ein Fahrzeug, das chemische Energie in wieder aufladbaren Batterien (Akkumulatoren) gespeichert mitführt und mit einem Elektromotor betrieben wird.

Auf Brennstoffzellenfahrzeuge die grundsätzlich auch als reines Elektrofahrzeug betrieben werden können wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

Fahrdynamik: muss sich auch beim Elektrofahrzeug am Verkehrsfluss orientieren, unterliegt somit gewissen Mindestanforderungen aus praktischer Sichtweise.

Reichweite: wird hauptsächlich durch die Batteriegröße, Luftwiderstand, Gewicht, Bremsenergieerückgewinnung, Fahrverhalten, Temperatur bestimmt.

Das BEV steht am Ende des gesamten Elektrifizierungspfad, dessen Vor- und Nachteile hier detailliert aufgelistet werden [vgl. Hofer 2006, Naunin 2007]:

- + niedrigerer Wartungsaufwand: Elektromotoren müssen seltener gewartet werden als VKM; das Bremssystem wird weniger belastet durch die Energierückgewinnung
- + produziert keine „lokalen Auspuffabgase“ und keinen abgasbedingten Feinstaub
- + elektrische Energie für den Antrieb kann zur Gänze durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden und kann durch regionale Energieerzeugung die Abhängigkeit von Energieimporten verkleinern
- + BEV sind durch die Elektromotoren leiser als Fahrzeuge mit VKM
- + effiziente Energieausnutzung (ca. 70% bei Netzladung, ohne Energieerzeugung)
- + Energierückgewinnung beim Bergabfahren und Bremsen
- + im Stillstand minimaler Energieverbrauch (nur Nebenaggregate)
- + Netzpufferung von Spitzenstrom und Nutzung als Notstromaggregat ist möglich
- + das Laden an jeder Steckdose ist möglich (Infrastruktur vorhanden)

- + das BEV hat durch den Elektromotor bei niedrigen Drehzahlen im Gegensatz zu einem PKW-VKM ihr maximales Drehmoment zur Verfügung
- + niedrige kilometerbezogene Betriebskosten („Tankkosten an der Steckdose“)
- + niedrigerer Aufwand für ABS, ASR und 4 WD zur Erhöhung des Drehmoments bei Elektrotraktion mit Mehrmotorenantrieb
- + wegfallen des VKM, der abgasrelevanten Bauteile und des Treibstofftanks

Die Herausforderungen beziehen sich fast ausschließlich auf die zukünftigen Entwicklungen der Batterietechnologie.

- geringere Reichweite als beim PKW-VKM durch geringe Energiespeicherdichte in der Batterie
- hohen Batteriekosten im Vergleich zum Treibstofftank
- Lebensdauer der Batterien ist meist noch geringer als die Fahrzeuglebensdauer
- lange Ladezeiten der Batterien (von mehreren Minuten bis hin zu Stunden je nach Batterietechnologie und benötigter Speicherkapazität)
- erhöhtes Fahrzeuggewicht durch das Batteriegewicht und zusätzlicher Platzbedarf für die Batterien
- Temperaturabhängigkeit des Fahrverhaltens
- der Einfluss auf die Lebensdauer einer Batterie bei Temperaturen $>35^{\circ}\text{C}$ und $<0^{\circ}\text{C}$ muss auch beim Parken des Elektrofahrzeuges berücksichtigt (geregelt) werden
- neue Strategie für Innenraumklimatisierung notwendig

Interessant erscheint die Tatsache, dass diese Nachteile vom Kunden zu tragen (zu bezahlen) sind, während vorhandenen Vorteile des Elektrofahrzeugs, wie Geräuscharmheit und Abgasfreiheit vor Ort der Allgemeinheit zugute kommen. Bei einem PKW-VKM verhält es sich genau umgekehrt. [vgl. VDI Bericht 1998]

6 Elektrische Antriebstechnik

Die Antriebstechnik umfasst im Allgemeinen den Themenbereich in dem elektrische Energie mittels elektrischer Maschinen in mechanische Energie umgewandelt wird.

Dieses Kapitel soll einen Einblick in einige für die Elektrifizierung im Bereich des motorisierten Individualverkehrs wichtigen Komponenten und deren Zusammenhänge geben. Dabei wird das elektrotechnische Wissen aus einem maschinenbaulichen Verständnis gesehen.

Die drei Hauptkomponenten eines elektrischen Traktionsantriebes werden wie folgt eingeteilt:

- Elektrische Maschine,
- Energiespeicherung (Batterietechnologie, Kühlung, etc.),
- Leistungselektronik inkl. Regelung

und im Folgenden erläutert.

6.1.1 Elektrische Maschinen in Fahrzeugen

Von einer elektrischen Maschine spricht man, wenn sowohl ein motorischer als auch generatorischer Betrieb möglich ist. Diese werden in Kraftfahrzeugen und Schienenfahrzeugen seit langem angewendet und haben folgende Vorteile die den speziellen Anforderungen eines effizienten Antriebs gerecht werden [erweitert nach Naunin 2007, S21; Wiki_1 2009]:

- hoher Wirkungsgrad sowohl im Bereich der Nennleistung als auch bei Teillastbetrieb (max. Wirkungsgrad Maschine 0.89 - 0.93),
- kurzfristige Überlastung ist möglich,
- maximales Drehmoment bereits bei niedrigen Drehzahlen,
- keine lokalen Emissionen,
- Rückgewinnungsmöglichkeit der Bremsenergie im generatorischen Betrieb,
- geringere Betriebskosten (sehr lange Motor-Lebensdauer speziell bei Asynchronmaschinen, geringerer Wartungsaufwand als bei VKM, geringere Energiekosten),
- einfacher Aufbau und hoher Fahrkomfort (keine Kupplung, kein Schaltgetriebe notwendig).

Als Nachteil kann das höhere Leistungsgewicht des Elektromotors mit $\sim 2\text{kg/kW}$ im Vergleich zum VKM mit $1,5\text{kg/kW}$ genannt werden (eigene Abschätzung aus modernen Motoren). Zu einer Rohstoffknappheit von z.B. Kupfer für die Kupferwicklungen, konnten keine Hinweise in der Literatur gefunden werden.

Grundsätzlich kann man vier Typen von Antriebssystemen im Fahrzeug unterscheiden [Naunin 2007]:

- Ein-Motor-System,
- Radnabenmotor-System,
- Tandemmotor-System,
- Hybridsystem mit einem Elektromotor und/oder einem Elektrogenerator.

Diese Arbeit wird sich in der Simulation und den darauf beruhenden Überlegungen auf Ein-Motor-Systeme beschränken.

6.1.2 Funktionsweise Elektrischer Antriebe

Das elektromagnetische Prinzip von Elektromotoren kann über die s.g. Lorenz Kraft erklärt werden. Auf einen mit dem Strom (I) stromdurchflossenen Leiter der Länge (l), der sich in einem magnetischen Feld mit Flussstärke (B) befindet, wirkt eine Kraft (F_{Lorenz}), die sowohl senkrecht zur Feldstärke als auch zur Länge steht. (Abbildung 15)

Formel 3: Lorenzkraft

$$F_{\text{Lorenz}} = I * B * l$$

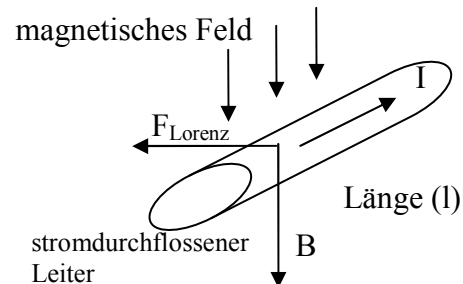


Abbildung 15: Elektrischer Leiter - Lorenzkraft

Somit kann entweder das Magnetfeld um den Leiter oder der Leiter um das Magnetfeld mit dem Radius (r) gedreht werden, damit sich ein Drehmoment ergibt:

Formel 4: Drehmoment eines Elektromotors

$$M = F_{\text{Lorenz}} * r = (I * B * l) * r$$

Auf diesem Prinzip bauen alle Elektromotoren auf wobei sie sich in der Art, wie das Magnetfeld erzeugt wird und wie sich Magnetfeld und Strom gegeneinander bewegen unterscheiden. Der Zusammenhang von Spannung und magnetischem Fluss wird im Induktionsgesetz ausgedrückt, was die theoretische Betrachtung der Funktionsweise des Elektromotors für diese Arbeit bereits abschließt.

Formel 5: Induktionsgesetz

$$U(t) = d\Phi / dt = - B * A * \omega * \sin(\omega * t)$$

mit $\Phi = \int B dA$ und der magnetische Flussdichte $B = \mu * N * I / l$

Elektrische Antriebe decken in der Regel alle Punkte im Drehzahl-Drehmoment Kennfeld nicht nur im ersten sondern in allen vier Quadranten ab. Es kann somit vorwärts und rückwärts sowohl motorisch angetrieben als auch gebremst werden. (Abbildung 16)

Unterhalb des Typenpunkts (TP), der durch Nenndrehzahl und Nennmoment definiert ist, wird von Grunddrehzahlbereich gesprochen. Eine Erhöhung der Drehzahl über die Nenndrehzahl hinaus kann durch Schwächung vom Erregerfeld erzielt werden. D.h. die Ständerspannung wird bei ihrem Maximalwert konstant gehalten und nur noch die Ständerfrequenz steigt. Bei fremderregten Gleichstrommaschinen wird dies durch die Verkleinerung vom Erregerstrom in der separaten Feldwicklung eingeleitet. Im unteren Feldschwächbereich, also bei hohen Drehzahlen und hoher Ständerfrequenz müsste man die Eingangsspannung über die Nennspannung anheben, was aus Isolationsgründen nicht zulässig ist, es nimmt dadurch die Leistung mit $\sim 1/\omega$ und das Drehmoment mit $\sim 1/\omega^2$ ab. (Abbildung 17)

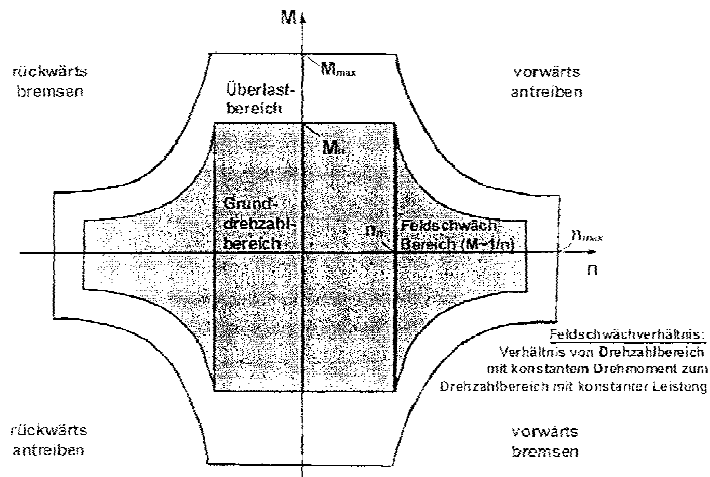


Abbildung 16: Momenten-Drehzahl-Betriebsdiagramm für elektrische Maschinen [Hofmann 2008, S70]

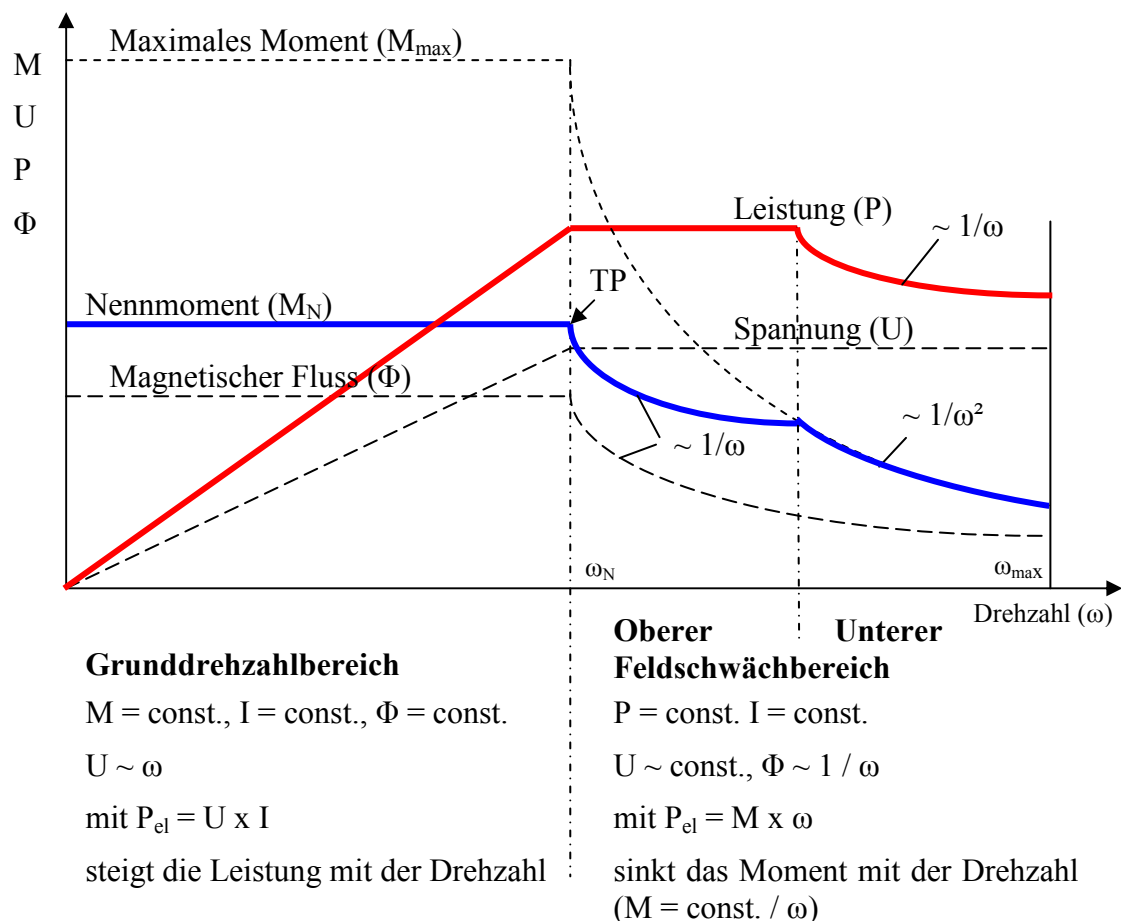


Abbildung 17: Prinzipische Skizze einer Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik am Beispiel einer Asynchronmaschine

Ein Elektromotor kann kurzzeitig stark überlastet werden, bis zum vierfachen seiner Nennbelastung je nach Dimensionierung bei der Auslegung. Limitierend sind thermische Belastbarkeit der E-Maschine, maximaler Phasenstrom des Wechselrichters, mechanische Festigkeit und Lebensdauer [vgl. Hofmann 2008]. Eine Überlastzeit im Modell wird bei Hofmann mit 10 Sekunden gerechnet, lt. [Willberger 2009] ist jedoch bei entsprechender Kühlung die doppelte Last mindestens eine Minute möglich. Dabei dürfen die Zusammenhänge mit der Energieversorgung v.a. im Elektrofahrzeug nicht vergessen werden (maximale Überlast für die Batterie und limitierende Speicherkapazität).

Eine Kupplung ist aufgrund der elektronischen Steuerung nicht zwingend nötig. Eine Gangschaltung wird bei Fahrzeugen mit einer niedrigen Motorleistung eingesetzt, um größere Steigungen überwinden zu können und zur Erreichung größerer Geschwindigkeiten. Für ein hohes Leistungsgewicht wird die Drehzahl der Antriebsmaschine möglichst hoch gewählt und ein Festgetriebe auf die Motorwelle angeflanscht, das die Drehzahl senkt und das Drehmoment erhöht.

Die Qualität des elektrischen Antriebs wird einerseits durch den linearen Hochlauf, der eine optimale Drehzahl bzw. Geschwindigkeitsregelung beinhaltet, aber auch durch einen s.g. Regel- oder Stellbereich beurteilt. Unter dem Stellbereich versteht man das Verhältnis von minimaler Drehzahl, bei der ein Lastsprung noch sauber ausgegletet werden kann, und der Nenndrehzahl (Standardantrieb: 1:10 üblich).

Die mechanische Leistung ($P_{\text{mech}} = M \cdot \omega$) die für rotierende Antriebe bzw. mit ($P_{\text{mech}} = F \cdot v$) die für Translationsbewegungen nötig ist, sind reine Wirkleistungen und werden durch eine elektromechanische Umwandlung bereitgestellt. Bei Gleichstromantrieben tritt nur Wirkleistung (P_w) auf, die sich durch Multiplikation der arithmetischen Mittelwerte (Gleichanteile) von Gleichspannung (U_d) und Gleichstrom (I_d) berechnen lässt. Da es aber in Wechselstromantrieben auf der elektrischen Seite neben der Wirkleistung auch noch Blindleistung gibt, müssen diese Besonders für eine gesamte Leistungsbilanz berücksichtigt werden [Hofer 2006, S26f]:

Formel 6: Berechnung der Scheinleistung

$P_{\text{el}} = U_d \cdot I_d$	Gleichstrom
$P_{\text{el}} = U \cdot I \cdot \cos\varphi$	Wechselstrom
$P_{\text{el}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$	Drehstrom, Dreiphasenwechselstrom (Starkstrom)
$\cos\varphi = P_w / S$	Leistungsfaktor
$S = U \cdot I = \sqrt{(P_w^2 + Q^2)}$	Scheinleistung

Es steht die elektrische Wirkleistung für Wärme, Kraft und Licht, wohingegen Blindleistung für den Aufbau der Magnetfelder in elektrischen Maschinen erforderlich ist. Aus der Formel der elektrischen Leistung werden die für die Auswahl eines Elektromotors wichtigsten physikalischen Größen ersichtlich, nämlich Spannung und Strom. Die Höhe der Spannung entscheidet über die Spannungsfestigkeit der Lackisolierung, die Stromhöhe über die erforderliche Drahtstärke der Wicklungen. Aus diesem Grund sollte bei der Auswahl einer elektrischen Maschine immer auf eine möglichst hohe Nennspannung geachtet werden. Besonders wichtig ist dies bei Elektrofahrzeugen, da die gewählte Batteriespannung hier entscheidenden Einfluss auf das Gewicht und Volumen der elektrischen Maschine und somit direkt auf den Verbrauch des gesamten Fahrzeuges hat.

6.1.3 Auswahl eines geeigneten elektrischen Antriebs

Prinzipiell wird zwischen Gleichstrommaschinen (mit Reihen- oder Nebenschlusswicklung) und Drehstrommaschinen, welche weiters als Drehstrom-Asynchronmaschinen oder Drehstrom-Synchronmaschinen ausgeführt sein können, unterschieden. Als weiterer wichtiger Type im Kfz Bereich wird die geschaltete Reluktanzmaschine (Switched Reluctance Motor) angeführt, die aber lt. [Naunin 2007] durch die hohen Geräuschentwicklung trotz geringster Herstellkosten noch nicht einsatzfähig ist. Der Transversalflussmotor bringt durch seine Umfangswicklungen große Vorteile bei Leistungsdichte und Wirkungsgrad, welche jedoch durch die aufwendige Konstruktion zu hohen Kosten führen.

Einige allgemeine Entscheidungskriterien für die Auswahl der geeigneten Maschine sind in der folgenden Auflistung gezeigt [VDI Bericht_b 2006]

- Bauraum
- Größe des Luftspalts
- Ölbeständigkeit und Watfähigkeit (keine Mängel durch Wassereinwirkung) des Rotors
- Überlastbarkeit (Art der Kühlung)
- Phasenstrom bei hohen Drehzahlen
- Gewicht und Massenträgheit
- Akustik und Schwingungen der Maschine
- Wirkungsgrad
- Kosten (Material und Herstellkosten für die E-Maschine, erforderliche Größe der Leistungselektronik)

Eine Bewertungsmatrix (Abbildung 18) hilft bei der Gegenüberstellung der Eigenschaften verschiedener Motorarten:

	Gleichstrom-motor		Synchronmotor		Transversalfluss-motor	Asynchron-motor	SR-Motor
	Elektr.err.	Perm.err.	Elektr.err.	Perm.err.			
Regel-/Steuerbarkeit	++	++	+	+	+	o	++
Kosten der Steuerung	++	++	-	--	o	-	o
Entwicklungsstand	++	++	o	o	-	+	o
Leistungsdichte	o	+	+	++	++	+	++
Zuverlässigkeit	o	+	+	+	+	++	++
Kosten (Preis)	o	-	o	-	--	+	+
Überlastbarkeit	+	+	+	+	+	+	+
Thermische Überlastfähigkeit	-	-	+	++	+	++	+
Wirkungsgrad	--	-	+	++	++	o	+
Geräuschpegel	-	-	+	+	+	+	-
Kosten der Maschine	--	--	-	-	--	+	++

Abbildung 18: Neugeordnete Bewertungsmatrix von Elektromotoren nach [Wallentowitz 2003] erweitert durch Angaben von [Naunin 2007]

Daraus wird für weitere Betrachtungen und die Simulation die Asynchronmaschine exemplarisch herangezogen, da sie durch [Hofer 2006] bestätigt als die am häufigsten eingesetzte elektrische Maschine im Fahrzeug gilt. V.a. Betriebssicherheit und Wartungsarmut bei niedrigen Kosten werden als Gründe genannt.

6.1.4 Drehstrom-Asynchronmaschine D-ASM

An dieser Stelle wird versucht für das maschinenbauliche Verständnis und die Simulation der Fahrzeugkonzepte wichtige Zusammenhänge zu filtern. Die detailgenaue Funktionsweise und der Aufbau einer D-ASM kann bei z.B. Hofer [Hofer 2006] oder [Weidauer 2008] nachgelesen werden.

Die Vor- und Nachteile der D-ASM werden, ergänzend zur Übersicht in Abbildung 18, hier im Detail aufgelistet [vgl. Ingruber 2006, Wiki_3 2009, Hofmann 2008]:

Vorteile

- lange Lebensdauer, wartungsarm, kein Bürstenverschleiß beim Kurzschlussläufer, (Lebensdauer wird nur durch den Verschleiß der Lager bestimmt)
- kurzzeitig stark überlastbar (2 bis 4 faches Nennmoment)
- nahezu konstante Drehzahl, kein „Durchgehen“ im Leerlauf
- einsetzbar in explosionsgefährdetem Bereich, da keine Bürsten oder Schleifringe vorhanden sind (Vermeidung des Bürstenfeuers - Funkenbildung)
- vergleichsweise geringe Herstellungskosten (auch Einsatz ohne Getriebe möglich)
- Anlauf auch gegen hohe Gegenmomente ohne Hilfsmittel möglich (abhängig von Läuferbauform)
- sehr robuste Ausführung und Medienverträglichkeit des Aktivteils (Öl, Gase, etc.)
- hohe Drehzahltauglichkeit, daher bei Betrieb mit Wechselrichter hohe Leistungsausbeute
- hoher Wirkungsgrad im Feldschwäcbereich

Nachteile

- Drehzahlveränderung nur bei Bauformen mit Polumschaltung oder mit zusätzlichem Frequenzumrichter möglich
- schlechter Wirkungsgrad im Teillastbereich (Aufrechterhaltung des Feldes durch Ständerwicklungen bei Abwesenheit eines Permanentmagneten); insbesondere bei kleinen Ausführungen ca. 20 bis 30% mehr Volumen pro Drehmoment gegenüber permanent – magnetisierten Synchronmotoren
- drei Außenleiter zur Versorgung notwendig (ersatzweise Frequenzumrichter oder Betriebskondensator (Kondensatormotor) bei Einphasenwechselstrom möglich)
- kleinerer Wirkungsgrad im Vergleich zur permanent magnetisierten Synchronmaschine bei hoher Momentausnutzung („Kupferverluste“)
- komplexe theoretische Verfahren zur Berechnung (im Vergleich zu anderen elektrischen Maschinen)
- aufwendige Regelung (Ausgangsspannung und Frequenz müssen stufenlos regelbar sein)
- geringes Anlaufmoment, außer bei Verwendung eines Frequenzumrichters mit Hochlaufsteuerung

Mit einer Lebensdauer (Dauerbetrieb) von bis zu 100.000 Stunden liegen D-ASM an der Spitze aller Antriebsaggregate [Hofer 2006]. Eine ASM bezieht in allen Betriebszuständen zum Aufbau des Drehfelds induktive Blindleistung aus dem speisenden Netz. Dieser Umstand muss gerade in Batteriefahrzeugen beachtet werden, da die benötigte induktive Blindleistung, wie bereits oben erläutert, vom Gleichstromkreis zusätzlich zur Verfügung gestellt werden muss.

Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der ASM

Der gesamte Verlauf der Drehzahl über dem Drehmoment ist in der Vierquadrantenebene (Abbildung 19) gestrichelt eingezeichnet. Das maximale Drehmoment gibt die ASM somit im Kippunkt ab, d.h. bei Kippschlupf bzw. Kippdrehzahl. Dieser Arbeitspunkt darf aber nur kurzzeitig eingestellt oder durchlaufen werden, da sowohl im Kippmoment (M_k) wie auch im Anlaufmoment (M_A) große Läuferverluste vorherrschen. Stationär darf die Maschine immer nur maximal mit dem Nennmoment belastet werden. Das maximale Nennmoment ist durch den Nenn- oder Typenpunkt (TP) gekennzeichnet, wobei es auch bei niedrigeren Drehzahlen voll zur Verfügung steht.

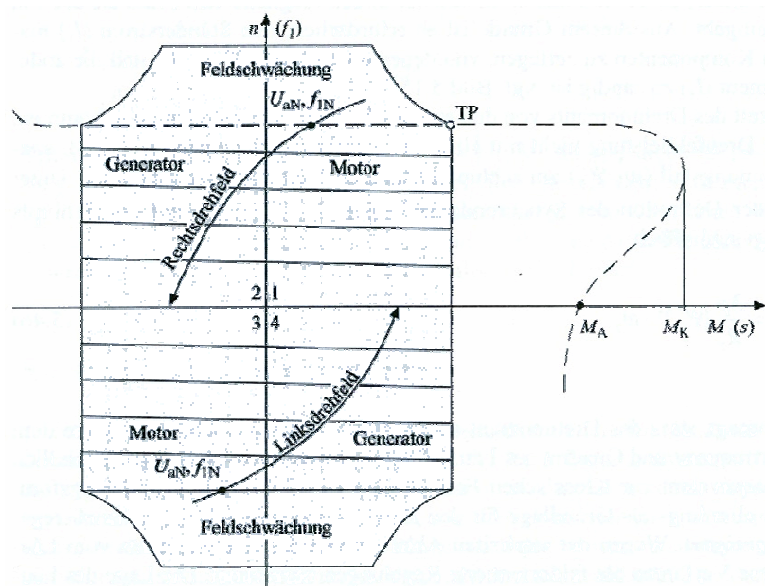


Abbildung 19: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien der Asynchronmaschine [Hofer 2006]

Von Feldschwächbetrieb spricht man, wenn die Ständerfrequenz mit einem Frequenzumrichter über den Nennwert hinaus erhöht wird und der Effektivwert der Spannung auf seinem Nennwert konstant gehalten wird. Die mechanische Leistung bleibt auch im Feldschwächbetrieb konstant wobei das Drehmoment mit zunehmender Drehzahl zurückgeht (nähere Erläuterungen siehe Kapitel 6.1.2).

Der maximale Wirkungsgrad der ASM liegt bei eher höheren Drehzahlen im Feldschwächenbereich. (siehe Abbildung 20)

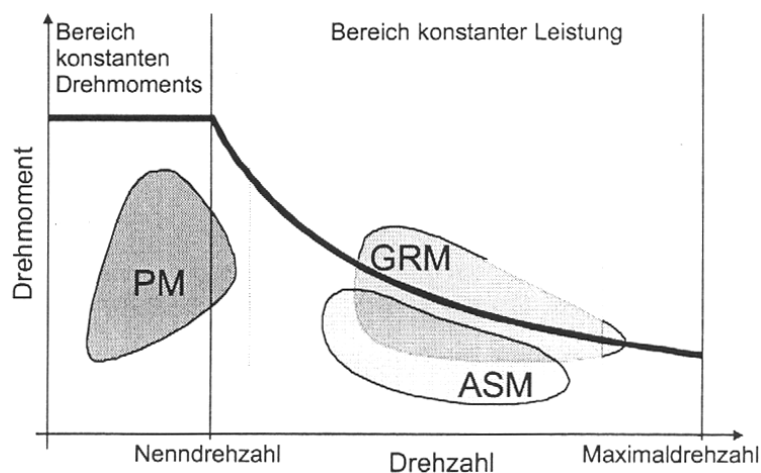


Abbildung 20: Gebiete maximalen Wirkungsgrads der unterschiedlichen Antriebskonzepte (PM=Permanentmagnetm., GRM=Gleichstromm. ASM=Synchronmaschine) [Naunin 2007]

6.2 Leistungselektronik

Aufgabe der Leistungselektronik ist die möglichst effiziente Steuerung und Umformung elektrischer Energie. Wird diese sorgsam durchgeführt kann sie einen bedeutenden Beitrag zur Energieeinsparung leisten. In [Graaf 2000 zitiert nach Hofmann 2008, S81] wird der Wirkungsgrad der Steuerung von Asynchron- und Synchronmaschinen mit einem Bereich von 0.93 - 0.98 angegeben.

Für Traktionsanwendungen ist eine Integration der Leistungselektronik im Elektromotor möglich und bringt Platzvorteile, Reduktion der Verbindungsleitungen und mögliche Kostenvorteile [Feustel 2005].

Technische Anforderungen an Fahrzeug-Leistungselektronik [vgl. Feustel 2005]:

- Funktionssicherheit in großem Temperaturbereich
- Resistent gegen hohe Beschleunigungskräfte
- Hohe Temperaturwechselbelastung (ca. - 40 auf maximale Temperatur $\sim 150^{\circ}\text{C}$)
- Hohe Forderung an die Zuverlässigkeit und Lebensdauer
- Hohe Anzahl von Lastzyklen
- Verlustminimierung

Um D-ASM in einem großen Drehzahlbereich mit wenig Verlusten betreiben zu können, muss die Frequenz und somit die Drehfeldfrequenz veränderbar sein. Zur Drehzahlstellung von Drehmaschinen genügt es nicht, alleine die Frequenz zu verändern, da sich die Reaktanz ($X = \omega * L = 2 * \pi * f * L$) der Motorwicklungen ebenfalls frequenzabhängig verändern, dadurch bleibt der Strom und damit der magnetische Fluss in der Maschine konstant.

Wechselstrommotoren (z.B. Drehstrom-Asynchronmotoren) werden heute zum Großteil in EV und HEV eingesetzt, da diese leistungstärker, robuster und kompakter als früher verwendete Gleichstrommotoren sind. Durch den im Fahrzeug ausschließlich zur Verfügung stehenden Gleichstrom wird ein Einsatz von Leistungselektronik und Umrichtertechnik notwendig.

Eine Übersicht der Komponenten (Motor, Umrichter, Sensor, Steuerung und Regelung) eines Drehstromantriebs bietet Abbildung 21.

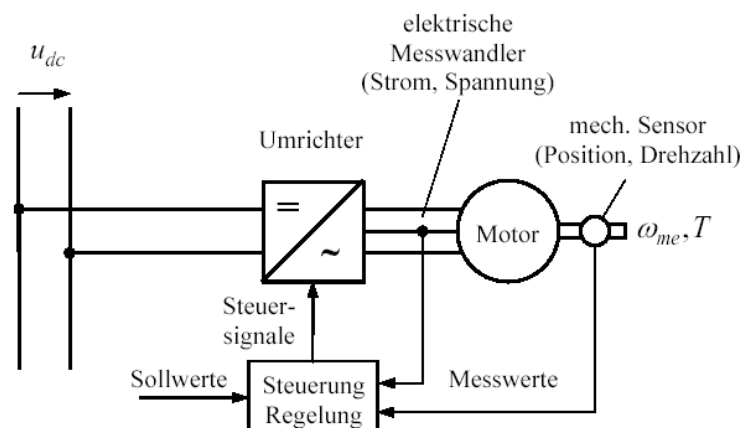


Abbildung 21: Typische Struktur eines elektrischen Drehstromantriebs [Böcker 2007, S71]

Leistungs- und Steuerungselektronik werden zur Fahrgeschwindigkeitsänderung und damit zur Motordrehzahländerung benötigt. Umrichter zur Umwandlung von Gleichstrom auf Wechselstrom und umgekehrt.

6.3 Energiespeicherung im Fahrzeug

In diesem Unterkapitel wird allgemein auf Energiespeichermöglichkeiten und anschließend genauer auf die Grundlagen der Batterietechnologie eingegangen. Der Li-Ionen Batterietyp birgt großes Zukunftspotential für die Elektromobilität und wird bzgl. Batterietechnologie detailliert abgehandelt.

Energie kann im Fahrzeug mit verschiedenen Systemen gespeichert werden. Die bislang höchste Energiedichte wird mit einem herkömmlichen Treibstofftank (Benzin oder Diesel), aufgrund der hohen Energiedichte des Treibstoffs erreicht. Weitere mögliche Energiespeicher sind Batterien, Kondensatoren, Schwungräder oder pneumatische bzw. hydraulische Systeme und Wasserstoff. (Abbildung 22)

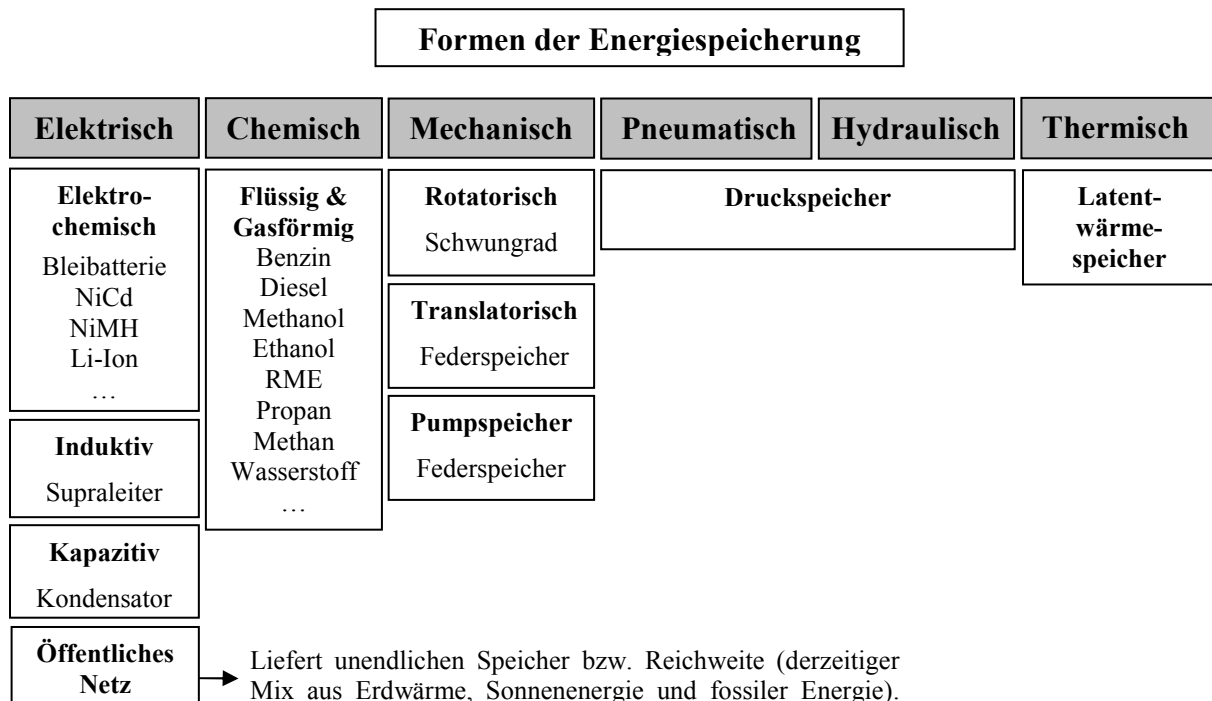


Abbildung 22: Übersicht über mögliche Energiespeicher

Es werden Treibstofftank sowie Batterien und Kondensatoren für hybrid und rein elektrische Anwendung betrachtet.

In der Literatur [z.B. VDI Berichte] kann verfolgt werden wie die Batterietechnologie zur Schlüsseltechnologie für die Elektrifizierung der Fahrzeugkonzepte erhoben wird. Als Hauptgründe sind entsprechende Reichweite, bei möglichst geringem Gewicht und leistbaren Fahrzeugkonzeptkosten genannt. Als Vergleich dient dabei jedoch immer das Fahrzeug mit VKM und seinem Treibstoff, der hinsichtlich Reichweite noch immer „unschlagbar“ ist.

Die Problematik der notwendigen Reichweite wird im Kapitel 5 erläutert. Die Erarbeitung von Einflüssen eines Gesamtkonzeptes auf Verbrauch und Reichweite wird mit Ergebnis dieser Arbeit sein (siehe Kapitel 7.2).

6.3.1 Flüssigtreibstoffe

Neben überwiegend auf fossilen Rohstoffen basierenden flüssigen Treibstoffen, wie Benzin, Diesel, Kerosin ect. gibt es s.g. Alternativtreibstoffe wie z.B. Pflanzenöl, „Biodiesel“, Methanol, Ethanol.

Treibstoffe in flüssiger Form zählen zu den in der Vergangenheit am häufigsten genutzten Energiespeichern. Die hohe Speicherdichte bei hohem Heizwert bringt für die individuelle mobile Anwendung große Reichweitenvorteile. Abbildung 23 zeigt einige Brennstoffe bzgl. Heizwert und Gemischheizwert.

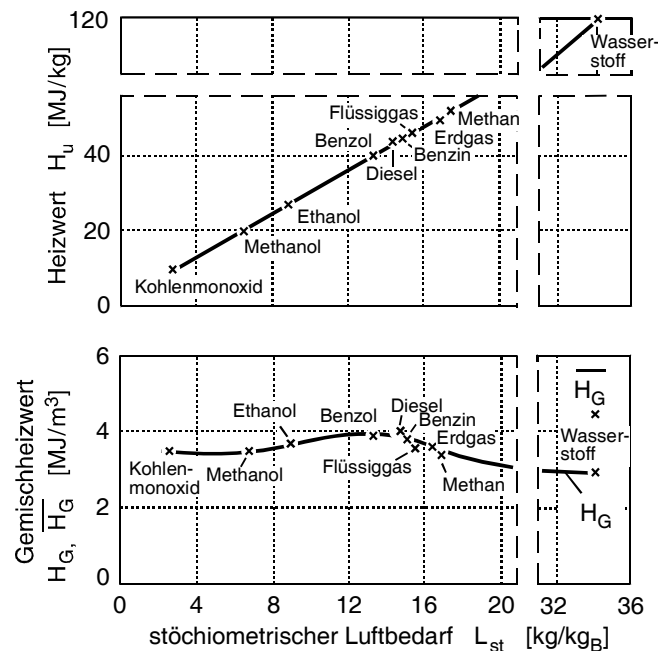


Abbildung 23: Heizwerte und Gemischheizwerte bei $\lambda=1$ für verschiedene Brennstoffe [Eichelseder 2005]

Tankzeiten betragen je nach Tankvolumen ca. 2 bis 5 Minuten. Der Treibstofftank kann individuell der Fahrzeuggeometrie angepasst werden, was ebenfalls einen Vorteil darstellt.

Als Nachteil gilt der hohe CO_2 Ausstoß bei der Verbrennung, neben anderen verbrennungsbedingten Emissionen, nicht nur wenn es sich um fossile Energie handelt. Aus Klimagründen ein so gravierender Nachteil, dass es dringend Alternativen braucht. Alternativen die auf Biomasse aufbauen sind hinsichtlich Flächenverbrauch und bei Betrachtung der gesamten Ökobilanz nur limitiert als Ersatz für fossile Treibstoffe geeignet [Jungmeier et al. 2003]. Bei Verwendung von „Biotreibstoffen“, die besser als Agrotreibstoffe bezeichnet werden müssten, könnte aus der Sicht eines Fahrzeugtechniklers das bestehende System des Verbrennungsmotors und das vorherrschende Fahrzeugkonzept beibehalten werden.

Ein Reichweitenvergleich in Abbildung 24 soll bereits ins nächste Kapitel der Batterietechnologien überführen und zeigen welche technischen Möglichkeiten Batteriespeichersysteme im Vergleich zu z.B. Benzin bieten. Aktuellere Werte für einen Reichweitenvergleich für Dieselfahrzeuge liefern die Ergebnisse dieser Studie in Kapitel 8.

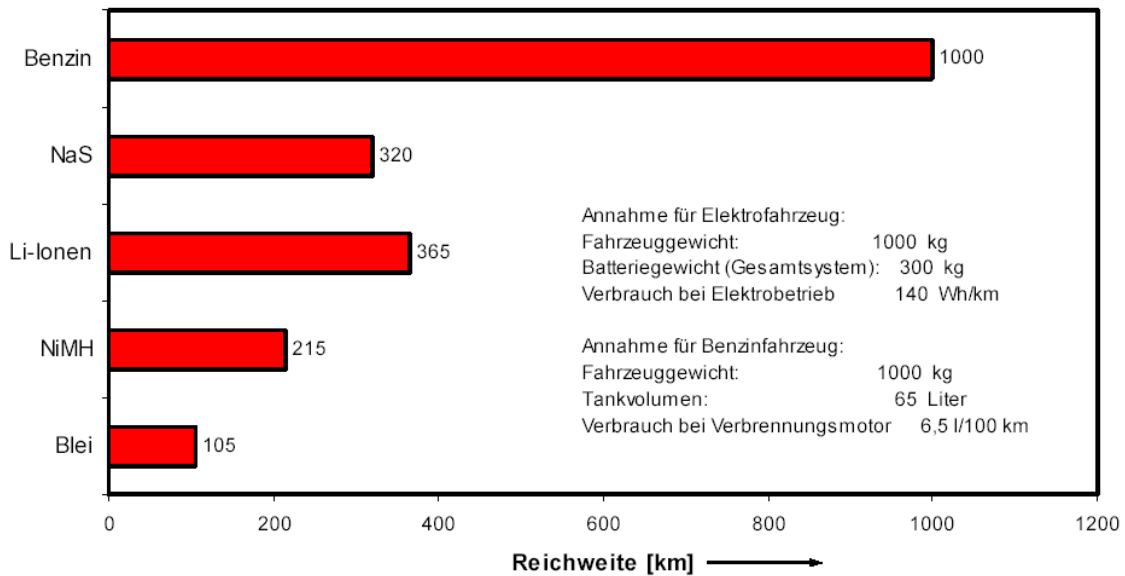


Abbildung 24: Reichweitenvergleich verschiedener Batteriesysteme zum VKM-Benzin [VDI Bericht_b 2008]

6.3.2 Batterietechnologie

Energie kann elektrochemisch in folgenden Systemen gespeichert werden [vgl. Hofmann 2008]:

- Primärelemente (irreversibler Prozess, nicht wiederaufladbar)
- Akkumulatoren oder Sekundärelemente (reversibler Prozess, aufladbar)
- Hochtemperatur-Sekundärelemente (reversibel, aufladbar, Betriebstemperatur: ca. 300 - 400°C)
- Brennstoffzellen (Brennstoffe werden von außen zugeführt)

Den wünschenswerten Eigenschaften von hoher Reichweite, großer Leistungsdichte, langer Lebensdauer etc. sind bei den Batterien vielerlei physikalische und chemische Grenzen gesetzt.

Um den hohen Ansprüchen zu entsprechen müsste eine Batterie eines Hybrid, PHEV oder BEV eine Reihe von Kriterien erfüllen [vgl. TREATISE 2008, Naunin 2007]:

- hohe spezifische Energie (Wh/kg),
- hohe Energiedichte (Wh/m³),
- hohe spezifische Leistung (W/kg) sowie hohe Leistungsdichte (W/m³),
- hohe Lebensdauer (hohe Anzahl an Lade- und Entladezyklen ohne wesentlichen Leistungsabfall),
- gute Ladefähigkeit (inkl. kurze Aufladezeit) und mögliche Tiefenentladungsfunktion (nahezu vollständig Entladung ohne Funktionsverlusten möglich),
- breites Temperaturspektrum für einen sicheren Betrieb,
- guter Lade- und Entladewirkungsgrad,
- wieder verwertbar und
- preiswert.

In der Praxis können je nach Anwendung niemals alle Eigenschaften positiv erfüllt sein. Der beste Kompromiss macht auch hier eine gute technische Lösung.

Eine Übersicht von verschiedenen Fahrzeugkonzepten und deren Energie- und Leistungsnachfrage des Batteriesystems zeigt, dass eine spezielle Batterielösung für jedes Fahrzeugkonzept anders zu gestalten ist (Abbildung 25).

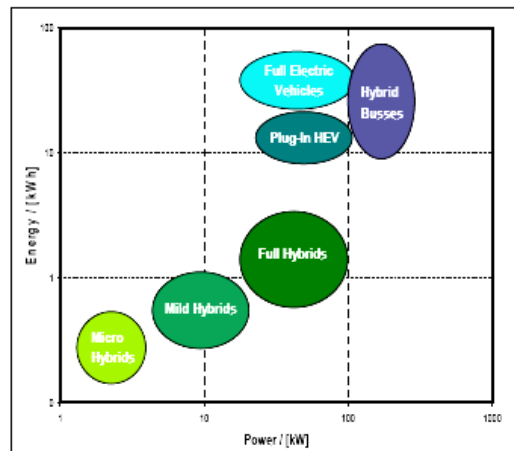


Abbildung 25: Energie- und Leistungsnachfrage in Batteriesystemen für verschiedene Fahrzeugkonzepte. [Köhler 2007]

Aus einer Übersicht (Abbildung 26), dem sg. *Ragone-like plot*, in dem spezifische Leistungen über den spezifischen Energien aufgetragen werden, können auch die für die Traktionsbatterien wichtigsten Batteriearten entnommen werden. Die Entwicklung geht von Blei-, Nickel-Cadmium, Nickel-Metallhydrid bis hin zur heute viel versprechenden Technologie der Li-Ionen Batterien. Superkondensatoren ergänzen dieses Bild, gehören aber nicht zu den chemischen Energiespeichern, sondern können durch die Polarisierung einer elektrolytischen Lösung Energie elektrostatisch speichern. (siehe auch Kapitel 6.3.4)

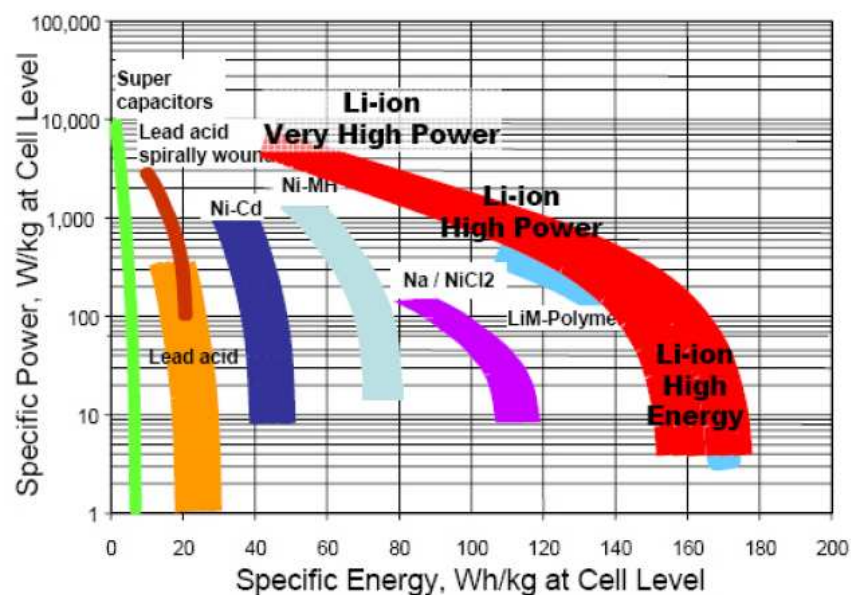


Abbildung 26: Ragone-like plot: Spezifischen Leistungen und spezifische Energien von verschiedenen Energiespeichersystemen [Köhler 2007]

Bei Li-Ion Batterien sind die Eigenschaften für Systeme mit hoher spezifischer Leistung (Einsatz im Hybridfahrzeug) ebenso möglich wie Batteriesysteme mit hoher spezifischer Energie (Einsatz im reinen Elektrofahrzeug). Somit kann gefolgert werden, dass für jedes Fahrzeugkonzept auch die beste Li-Ionen Batterie gefunden werden kann.

Aus der spezifischen Energie [Wh/kg] dividiert durch die spezifische Leistung [W/kg] lassen sich typische Entladezeiten für verschiedene Speicher für eine Abschätzung derer Einsetzbarkeit bestimmen. (Abbildung 27)

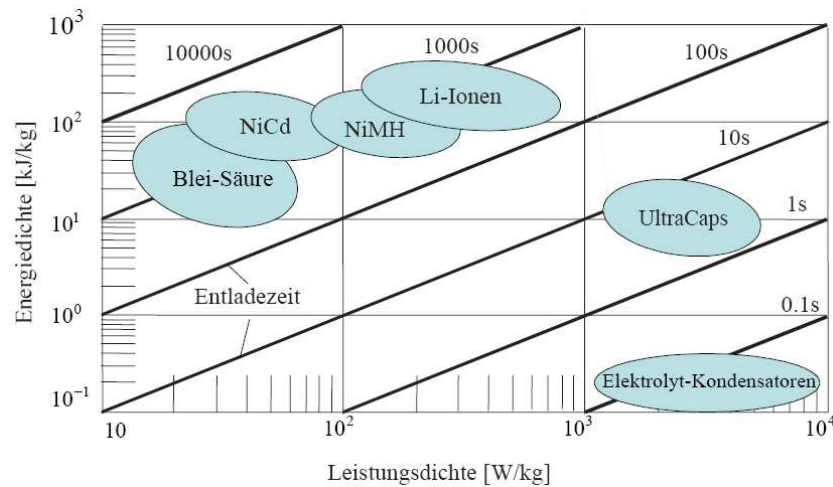


Abbildung 27: Ragone-Diagramm mit typischen Entladezeiten von elektrischen Energiespeichern[Böcker 2007, S37]

Diese Arbeit widmet sich nicht näher der detaillierten Analyse verschiedener Batteriesysteme sondern entscheidet sich für die aus heutiger Sicht viel versprechende Technologie der Li-Ionen Batterien, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Aufgrund der Kombinationsmöglichkeit mit Superkondensatoren und der sich daraus ergebenden Vorteile wird auf diese ebenfalls näher eingegangen.

6.3.3 Li-Ionen Batterien

Aus dem Skript „Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien“ [Winter 2006] wurden folgende Inhalte aus einer fahrzeugtechnischen Sicht zusammengefasst und ergänzt.

Unter dem Überbegriff Li-Ionen Batterien werden meist verschiedene Materialien für spezielle Eigenschaften vorweggenommen. Abbildung 28 verdeutlicht die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Materialien, die bei Li-Ionen Batterien zum Einsatz kommen. Die Lage der Kurven des Ruhespannungsverlaufes unterscheidet sich bei den betrachteten Materialien für die positive Elektrode der Zelle deutlich voneinander. Als negative Elektrode wurde eine der üblichen Kohlenstoffvarianten verwendet. [VDI Bericht_b 2008]

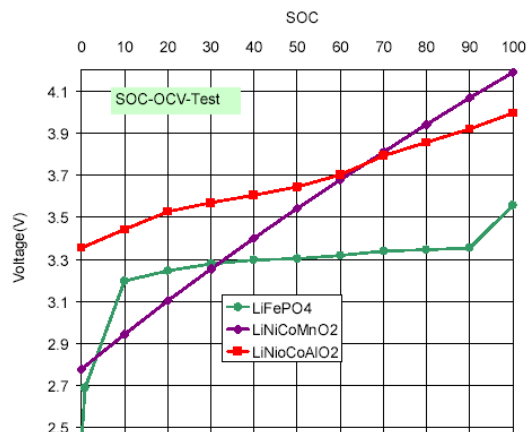


Abbildung 28: Ruhespannungsverlauf beim Einsatz verschiedener Materialien in Lithiumionenbatterien. [VDI Bericht_b 2008]

Eine vergleichende Übersicht von negativen Aktivmassen in Batterien (Tabelle 2) zeigt welche Vorzüge rein theoretisch durch die Verwendung von Lithium entstehen; durch niedrige Äquivalentmasse und der damit verbundenen hohen spezifischen Ladung, als auch des stark negativen Standard-Elektrodenpotential.

Tabelle 2: Vergleich von negativen Aktivmaterialien [Winter 2006]

Aktivmaterial	Gewicht / g mol^{-1}	Ladungs- äquivalent	Äquivalent- masse / $\text{g mol}^{-1} F^{-1} \text{ }^b$	Spezifische Ladung / Ah kg^{-1}	Elektroden- potential / V ^c	Batterie (Beispiel)
Pb	207,20 ^a	2	103,60	259	-0,13	Pb-PbO ₂
Cd	112,42 ^a	2	56,21	477	-0,40	Ni-Cd
LaNi ₅ H ₆ (MH ^d)	438,40 ^a	6	73,07	366,7	±0,00	Ni-MH
Zn	65,38 ^a	2	32,69	820	-0,76	Zn-MnO ₂
Li	6,94 ^a	1	6,94	3862	-3,05	Li-MnO ₂
Na	22,94 ^a	1	22,99	1168	-2,71	Na-NiCl ₂

^a Daten beziehen sich auf das geladene Aktivmaterial. Eventuelle aktive Elektrolytmassen, z.B. H₂SO₄ im Bleiakku oder H₂O im Ni-Cd-Akku, sowie alle inaktiven Massen sind nicht berücksichtigt. ^b F = Faradaykonstante = 96485 As mol⁻¹ (As = Amperesekunde). ^c im Gleichgewicht, unter Standardbedingungen, gegen die Normal-Wasserstoff-Elektrode. ^d Metallhydrid.

Im Elektrofahrzeug bzw. Hybridfahrzeug werden, im Gegensatz zu herkömmlichen wässrigen Systemen, wie Ni-Cd oder Blei-Akku, bei Li-Ionen Batterien nichtwässrige Elektrolyten verwendet. Dadurch werden einerseits unerwünschte Nebenreaktionen wie die „Wasserelektrolyse“ vermieden und eine elektrochemische und chemische Stabilität von Elektrolyt und Elektrodenmaterialien erreicht. Als weiterer Vorteil der nichtwässrigen Elektrolyten ergibt sich, dass auch Anwendungen bei extrem tiefen Temperaturen (bis < -40 °C) möglich sind, die den wässrigen Lösungen aufgrund ihres begrenzten Flüssigbereichs nicht erreichbar und doch für den winterlichen Einsatz notwendig sind.

Für hohe Zyklenfestigkeit wird bei Systemen für Consumer- und Hochvolt-Traktionsanwendungen das aktive Material in Gitter ein- und wieder ausgelagert. Dabei bleibt die Gitterstruktur der aktiven Masse der Elektroden beim Laden und Entladen der Batterie bestehen. Das Einlagern in diese Gitterstrukturen wird Interkalation genannt (bei Blei-Batterie spricht man von Konversionsreaktion). [VDI Bericht_b 2008]

Abbildung 29 zeigt die Weiterentwicklung von Lebensdauer und Energiedichte der Batteriesysteme.

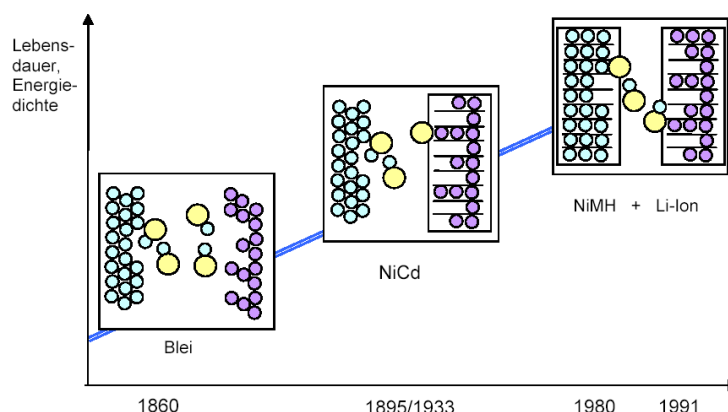


Abbildung 29: Entwicklung der Batteriesysteme von Konversion bei Blei-Säure zu Interkalation bei Nickel-Metallhydrid und Lithium-Ionen [VDI Bericht_b 2008]

Es können folgende Vorteile von Lithium-Batterien zusammengefasst werden [vgl. Winter 2006, Hofmann 2008, VDI Bericht_a 2008]:

- hohe Zellspannung (bis ~4V je nach Kathodenmaterial)
- kein Memory-Effekt (muss nicht regelmäßig voll entladen werden)
- hohe spezifische Energie und Energiedichte (siehe Abbildung 26)
- weiter Temperaturbereich mit gutem Tieftemperaturverhalten (- 40 °C bis +70 °C)
- geringe Selbstentladung (bis >10 Jahre Lagerfähigkeit)
- Lagerung in beliebigem Lagerzustand möglich
- hoher energetischer Wirkungsgrad
- Zyklenlebensdauer liegt heute in der Regel zw. 500 - 10000 Vollzyklen (stark temperatur-, bauart- und vom genutzten SOC abhängig)

Die Entladespannung einer Lithium-Ionen-Zelle liegt bei 3 - 4V, und entspricht damit ca. der Spannung von drei in Serie geschalteten Ni-Cd- oder Ni-Metallhydrid-Zellen (~1,25V), woraus sich gerade für BEV ein „Package-Vorteil“ ergibt. [vgl. Naunin 2007]

Als Nachteile der Li-Ionen Batterien werden: Empfindlichkeit gegen Überladung und Tiefentladung und der daraus folgenden Einzelzellenüberwachung sowie die Sicherheitsthematik angeführt.

Bei Umpolung einiger Zellentypen kann es zu Explosion kommen. Ist in einer Reihenschaltung eine einzelne Zelle geschädigt oder besitzt aufgrund Bauteilstreuungen eine geringere Ladung als die anderen, kann diese Zelle bei einer Entladung umgepolt werden, auch wenn die Gesamtspannung noch positiv ist. Darum werden diese Batterien, nicht zuletzt wegen der hohen Brennbarkeit von Lithium, umfangreichen standardisierten Sicherheitstests unterzogen. Dabei wird neben dem elektrischen Verhalten auch die „Gutmütigkeit“ gegenüber Feuer, Hitze oder mechanischer Gewalt kontrolliert. Das Gefahrenpotential ist umso größer, je höher die Energiedichte und je reaktiver die Komponenten sind.

Die Entladung und Ladung muss bei Lithium-Ionen-Zellen elektronisch überwacht und geregelt werden. Ein Sicherheitsventil und PTC-Keramik des Batteriegehäuses, welche den Elektronenfluss außerhalb der Zelle vor dem unkontrollierten Durchgehen unterbricht, tragen zur Sicherheit bei. Das Ventil öffnet bei einem thermisch verursachten Gasüberdruck in der Zelle den äußeren Leiterkreis. Der Widerstand in der Keramik mit „positive temperature coefficient“ (PTC) wächst mit steigender Temperatur bis zur Isolation. An einer „chemischen Sicherung“ als zusätzliche Schutzvorkehrung wird geforscht.

Lebensdauer

Die nominelle Zyklen-Lebensdauer gilt dann als erreicht, wenn die Batterie nur noch 80% ihrer Nennladung abgeben kann. Dabei ist für den praktischen Betrieb das Ende der nutzbaren Lebensdauer noch nicht erreicht.

Die Lebensdauer ist v.a. von Bauart, Temperatur (Lager- und Betriebstemperatur), Ladebereich in [% SOC], und der Zyklenanzahl abhängig. Bei einer Traktionsanwendung im Fahrzeug sind die Ladezyklen, durch Strategie (Lastpunkterhebung) und Rekuperation, je nach Batteriegröße in der Regel keine Vollladezyklen. Der Einfluss der Lagertemperatur auf die Lebensdauer und die Größe des genutzten SOC Bereichs auf die mögliche Zyklenzahl kann aus [Mohr dieck 2007] entnommen werden. Li-Ionen Batterien weisen dabei im Vergleich zu NiMH-Batterien nur im kleineren SOC Bereich Vorteile auf. (Abbildung 30)

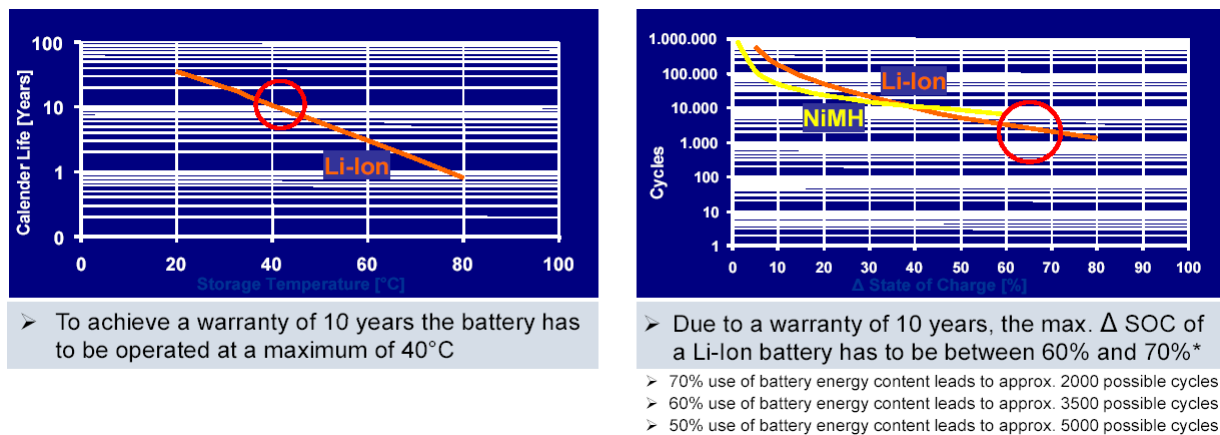


Abbildung 30: Abhängigkeit der Lebensdauer von Temperatur und der Zyklenanzahl vom genutzten SOC Bereich für PHEV [Mohrdeick 2007]

Die Betriebstemperatur sollte für eine Lebensdauer von 10 Jahren somit 40°C nicht übersteigen. Dafür wird Kühlung notwendig, wobei gerade bei Li-Ion Batterien auf geringe Temperaturunterschiede zwischen den Zellen zu achten ist. Dies darf beim Parken eines Elektrofahrzeuges in der Sonne in Zukunft nicht übersehen werden und bedarf einer Planung nicht nur des Fahrzeugherstellers sondern auch des Verkehrs- und Raumplaners. Weiters kann erkannt werden, dass für eine brauchbare Zyklenzahl und somit Lebensdauer eine gewisse Überdimensionierung der Batteriekapazität notwendig wird. Speziell HEV benötigen aufgrund der kleineren Batteriekapazität mehr Zyklen als PHEV oder EV und müssen aus Gründen der Lebensdauer im Fahrbetrieb mit einem geringeren SOC Bereich auskommen. Es wird gefolgert, dass die Rekuperation v.a. bei PHEV oder EV wenig Einfluss auf die Lebensdauer durch dessen geringeren SOC Hub hat. Wie sich zahlreiche ganz kurze Lade- und Entladezyklen, wie beim Rekuperieren, in Kombination mit vollen Ladezyklen, auf die Lebensdauer auswirken, konnte in der Literatur nicht explizit gefunden werden.

Eine besonders viel versprechende Entwicklung ist in den Technologien mit *Lithium Titanat* zu erkennen. Besonders lange Lebensdauer (bis 20 Jahre) bei bis zu 25000 vollen Ladezyklen und kurzen Ladezeiten würden eine Revolution in der Traktionsanwendung bedeuten [ALTAIRNANO 2009].

Materialforschern am *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) ist lt. [Standard 2009] eine Entdeckung bei der Weiterentwicklung einer Lithium-Eisen-Phosphat [LiFePO_4] gelungen. Durch einen Überzug aus Lithiumphosphat konnten die Ladegeschwindigkeiten einer Zelle von sechs Minuten auf 10 bis 20 Sekunden reduziert werden, bei keinerlei Verschleiß am Material.

Temperatureinfluss

Die Lebensdauer einer Li-Ionen Batterie wird wie in Abbildung 30 gezeigt vor allem von hohen Temperaturen limitiert. Einflüsse auf Selbstentladung und irreversible Kapazitätsverluste werden in Abbildung 31 gezeigt. Sowohl reversible Selbstentladung als auch irreversibler Kapazitätsverlust sinken bei niedrigeren Temperaturen. Die Angaben in Abbildung 31 dienen für Li-Ionen Batterien zur Einschätzung von Größenordnungen. Genaue Werte müssen aus den Datenblättern des jeweiligen Batterietyps entnommen werden.

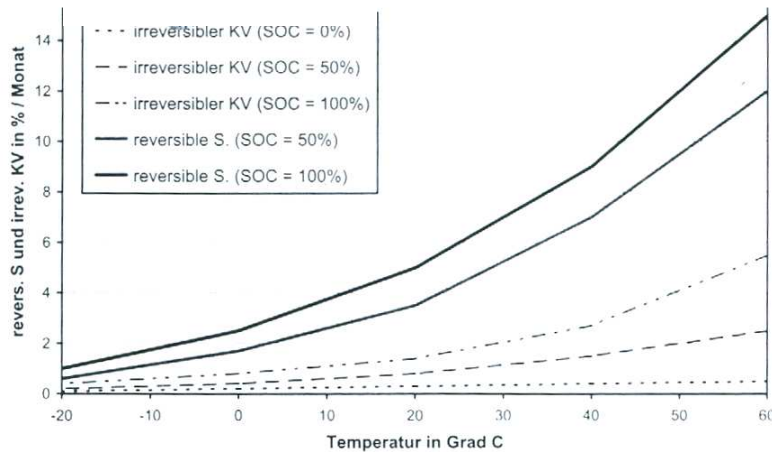


Abbildung 31: Reversible Selbstendladung S und irreversibler Kapazitätsverlust KV in Abhängigkeit vom Ladezustand (SOC) und der Temperatur für eine Lithium-Ionen Zelle [Jossen et al. 2006]

Dieser Zusammenhang wird im Betrieb durch den reversiblen Kapazitätsverlust bei tiefen Temperaturen überlagert, der in [EnerDel 2009] mit wenigen Prozent angegeben wird (Abbildung 32 und Abbildung 33). Die oben erwähnte Anwendung von nichtwässrigen Elektrolyten führt zur möglichen Anwendungen bei extrem tiefen Temperaturen (bis kleiner -40°C).

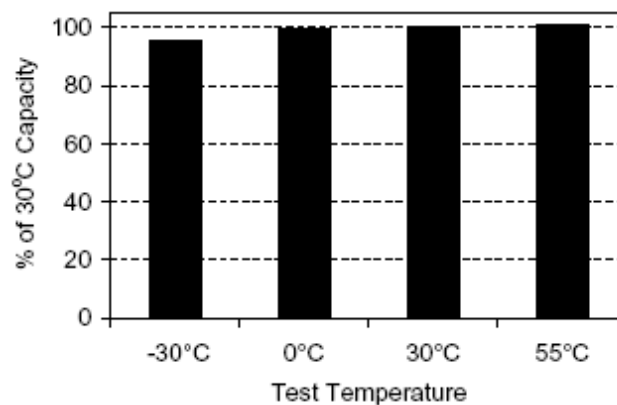


Abbildung 32: Verhalten der Kapazität einer Lithium-Ionen Batterie bei niedrigen Temperaturen (Entladung mit 1C) [EnerDel 2009]

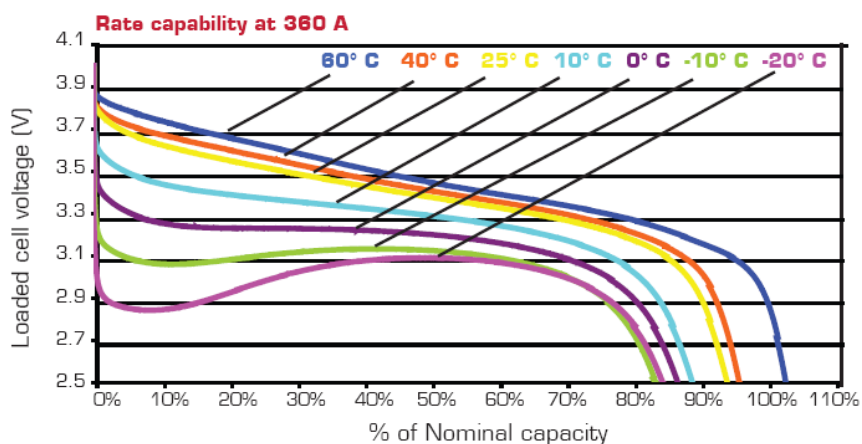


Abbildung 33: Temperatureinfluss einer VL 12 V Zelle auf die Zellspannung bei konstantem Ladestrom als Funktion der Nennkapazität in [%] [Saft 2009]

Der Einfluss auf den Innenwiderstand einer Zelle ist exemplarisch in Abbildung 34 an einer VL 6 A Zelle dargestellt und wird erst bei Temperaturen unter 0°C sehr hoch.

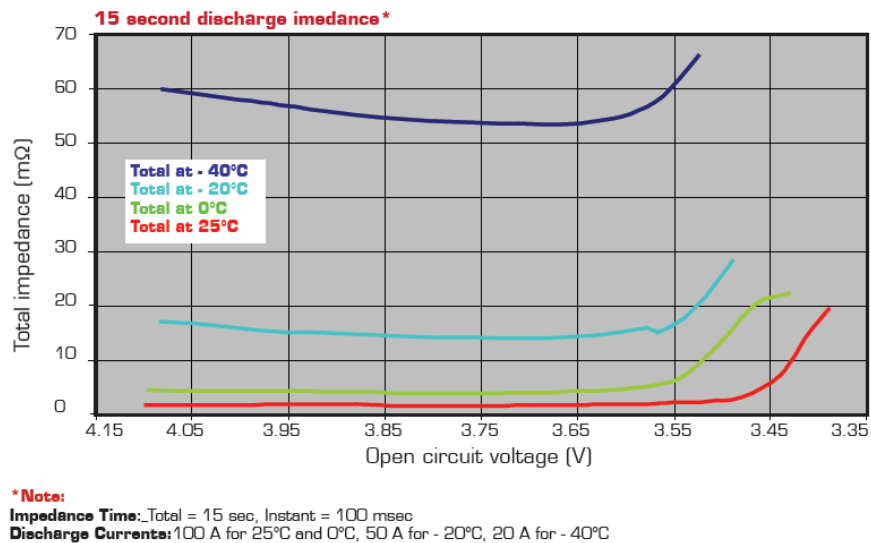


Abbildung 34: Innenwiderstand bei verschiedenen Temperaturen als Funktion der Spannung [Saft 2009]

Einfluss von Lade- und Entladestrom

Um Zellen unterschiedlicher Kapazitäten besser vergleichen zu können, wird der Lade- und Entladestrom häufig in normierter Form, bezogen auf die Kapazität der Zelle, angegeben. Dazu wird meist die s.g. C-Rate verwendet, unter der man die Nennkapazität geteilt durch eine Stunde versteht. Die Nennkapazität ist die bei Entladung mit Nennstrom und Nennspannung bei Nenntemperatur mindestens entnehmbare Ladungsmenge ($I \cdot \text{Zeit}$) bei einer neuen voll geladenen Batterie. Beispielsweise hat eine Zelle mit einer Nennkapazität von 3,5 Ah eine 1C-Rate von 3,5 A, eine 0,2C-Rate (auch C/5-Rate) dieser 0,7 A und eine 10C-Rate für diese Zelle 35 A.

Dieser Zusammenhang kann für ein gesamtes Batteriepack mit der Anzahl der Zellen und derer Kapazität multipliziert werden und stellt einen wichtigen Einflussfaktor auf die Zellspannung dar (Abbildung 35).

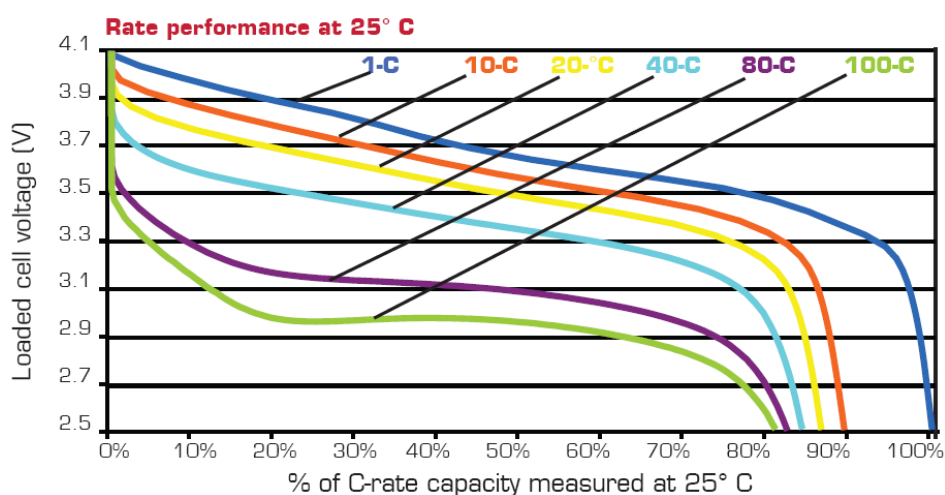


Abbildung 35: Einfluss des Ladestroms einer VL 12 V Zelle auf die Zellspannung bei 25°C als Funktion der C-Rate in [%] (entspricht SOC) [Saft 2009]

Kosten

Der Richtwert von 1000€/kWh für Li-Ionen Batterien wurde v.a. bei HEV immer wieder erwähnt. In [Engel 2008] ist nachzulesen, dass bei größeren Abnahmemengen von dem amerikanischen Batteriehersteller *EnerDel* bereits ein Preis von ca. 350€/kWh bei einem Großauftrag 2008, von 5.000 Lithium-Batteriesätzen zu je 27kWh, verhandelt wurde.

Diese Information wurde aufgrund ihrer großen Bedeutung für die rasche Markteinführung von Elektromobilen weiter überprüft und durch [Autoblog 2008 und Biermann 2009] bestätigt. (Abbildung 36)

USABC (1999)	mittelfristig langfristig	150 US\$/kWh 100 US\$/kWh
SUBAT (2005)	mittelfristig Prognose für 2012	700-800 €/kWh 360-477 €/kWh
ISEA (2008)	heute bei Massenproduktion	1500 €/kWh 300 €/kWh
Roland Berger (2008)	Prognose 2010/2011 Prognose 2020	400-500 €/kWh 200 €/kWh

Kosten für Laptop-Batterien betragen heute ca. 220 €/kWh
Kostenreduktion um Faktor 5 zwischen 1995 und 2005

Abbildung 36: Kosten und Kostenprognose für Li-Ionen Traktionsbatterien [Biermann 2009]

Von [Göschel 2009] ist März 2009 von einem Preis mit 650€/kWh und einer Preisentwicklung bis 2015 auf 250€/kWh die Rede.

Woran eine Einigkeit in der Preisdiskussion noch lange scheitern wird, ist das Fehlen einer Differenzierung zw. Batterien für die Hybridanwendung (hohe spezifische Leistung) und der rein elektrischen Anwendung (hohe spezifische Energien). Wie in Abbildung 26 bereits gezeigt können Li-Ionen Batterien sowohl für hohe spezifische Leistungen als auch für hohe spezifische Energien gebaut werden. Bezieht sich die Angabe des Preises immer auf eine Kilowattstunde werden HEV-Batterien pro Kilowattstunde (im Vergleich zu BEV-Batterie) teurer erscheinen als sie für ihren Einsatzbereich leistungsbezogen sind. Ein großer Fehler entsteht wenn heute vorhandene Preise von HEV-Batterien pro Kilowattstunde für eine BEV-Batterie hochgerechnet werden, da sich spezifische Leistung und spezifische Energien der beiden Batterietechnologien gegenläufig verhalten.

Rohstoffknappheit

Bei vielen derzeitigen Li-Ionen Batterien wird neben Graphit, Lithium, Nickel, Mangan u.a. Cobalt eingesetzt. Cobalt ist ein seltenes Element und würde bei 100% BEV Anteil sicherlich nicht in ausreichender Menge vorhanden sein [Koller 2009]. Li-Ionen Batterien ohne Cobalt sind lt. Koller aber bereits heute technisch machbar, mit ähnlichen Eigenschaften und gleichen Einsatzgebieten wie die Li-Ionen Systeme mit Cobalt.

Weitere Knappheiten sind nicht bekannt, ein funktionierendes Recyclingsystem wird aber in jedem Fall als notwendig erachtet.

6.3.4 Doppelschicht-Kondensatoren

Doppelschicht-Kondensatoren DSK, auch Superkondensatoren genannt, bestehen zwar aus elektrochemischen Komponenten, für die Energiespeicherung werden jedoch keine chemischen Reaktionen, sondern die Polarisierung einer elektrolytischen Lösung für die elektrostatische Energiespeicherung genutzt. Mit diesem reversiblen Mechanismus kann ein Doppelschicht-Kondensator über eine Million Mal geladen und wieder entladen werden und bringt gegenüber Batterien einen großen Lebensdauervorteil.

Im Vergleich zeigt sich, dass Batterien eine höhere Energiedichte aufweisen, während DSK mit einer hohen Leistungsdichte punkten. Aus diesem Gesichtspunkt sind DSK ideal für Anwendungen geeignet, bei denen wiederholt für kurze Zeit – von Sekundenbruchteilen bis zu einigen Sekunden – Spitzenleistungen gespeichert und wieder gefordert werden sollen. Diese Art des Energiemanagements ist v.a. beim Rekuperieren von Hybrid oder Elektrofahrzeugen notwendig und bringt eine schnelle und effiziente Aufnahme der Bremsenergie mit ebenso verlustarmer Rückspeisung. Die geringen leistungsspezifischen Kosten sind ein weiterer Vorteil von Doppelschicht-Kondensatoren. [VDI Bericht_a 2007]

Im Vergleich zu Batterien bieten Doppelschicht-Kondensatoren eine Reihe von weiteren Vorteilen [vgl. VDI Bericht_a 2007]:

- höherer Wirkungsgrad aufgrund des äußerst geringen Innenwiderstands ($>>90\%$)
- größerer Temperaturbereich ohne Einbußen der Funktionalität (bis -40 °C)
- variable Zykltiefe uneingeschränkt möglich
- keine feste Betriebsspannung erforderlich

Aus [Kötz 2002] können Richtwerte für den Stand der Technik 2002 entnommen werden die ebenfalls für heutige Kombinationsmöglichkeiten mit Batterien bedeutend sind:

- DSK decken den Energiebereich zwischen 0.1 Wh/kg und 10 Wh/kg mit einer spez. Leistung von $> 1\text{ kW/kg}$ ab
- angestrebte Preis soll 15 €/kWh sein (ca. 1670 €/kWh bei $4,68\text{ kW/kg}$ und $4,2\text{ Wh/kg}$)

Im *Laboratory for Electromagnetic and Electromic Systems* zeigen Analysen, dass bei Verwendung von vertikal angeordneten Kohlenstoff-Nanoröhrchen eine spezifische Energie von über 60 Wh/kg bei einer spezifischen Leistung von mehr als 100 kW/kg und über 300000 Zyklen möglich ist. Marktreife wurde noch nicht erreicht. [LEES 2009]

Für die letzte Rekuperation im NEDC können theoretisch ca. 140 Wh in die Batterie gespeist werden. Das würde zu einem Gewicht von 20 kg bei einem DSK mit 7 Wh/kg führen.

Kombination von Doppelschicht-Kondensatoren mit Batterien

Ein dynamisches Auftreten von Leistungsspitzen beeinflusst die Lebensdauer einer Batterie in der Regel negativ. Eine Kombination von Batterien und Ultrakondensatoren stellt dabei eine Möglichkeit dar, in der die Batterie die kontinuierlichen Energiebedarfe sicherstellt und der Ultrakondensator die Leistungsspitzen abdeckt. Bei einer s.g. „aktiv parallelen Konfiguration“ werden die unterschiedlichen Spannungsniveaus der beiden Speicher mittels Leistungselektronik kombiniert. Ein Zweispannungsbordnetz ist zwar komplexer und kostenaufwändiger als ein herkömmliches Bordnetz, dennoch hat dieses System gerade im Bezug auf Start-Stop Strategien, Rekuperation und deren Verbrauchseinsparungen Vorteile. Für einen Überblick der Einsatzbereiche von Doppelschicht-Kondensatoren siehe Abbildung 37. Durch die genannten neuen Entwicklungen kann sich der Bereich für sinnvolle Funktionsanwendungen zukünftig aufweiten.

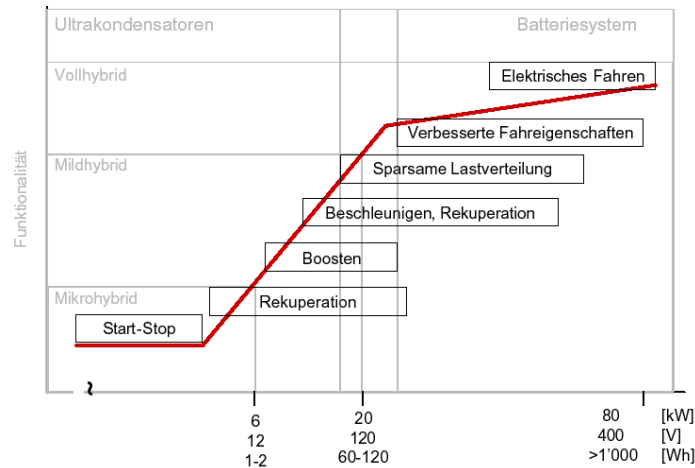


Abbildung 37: Erforderliche Leistung, Energie und Spannung in Funktion der Hybridfunktion [VDI Bericht_a 2007]

6.3.5 Batteriesystem

Eine Batterie ist nicht nur im Fahrzeug sondern in fast jeder technischen Anwendung in ein gesamtes Batteriesystem eingebettet, besteht also nicht „nur“ aus den chemisch relevanten Komponenten.

Abbildung 38 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Lithium-Ionen Systems und deren Hauptkomponenten [VDI Bericht_c 2006]:

- Zellpaket,
- Zellüberwachungselektronik, Sensorik,
- Batteriesteuergerät inklusive Software,
- Kühlung,
- HV-Verkabelung, Schalter, Sicherungen und
- Gehäuse

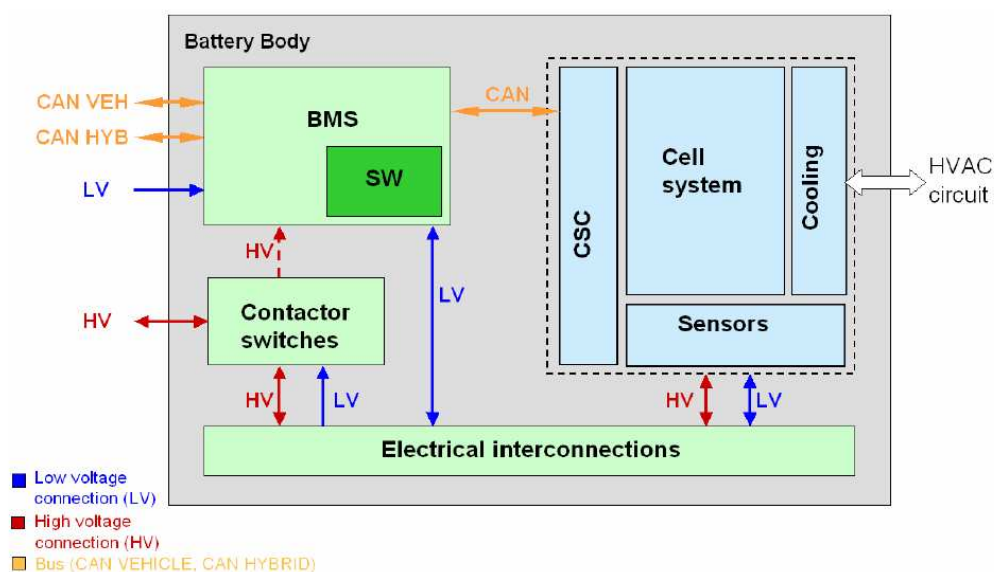


Abbildung 38: Blockschaltbild eines Li-Ionen Batteriesystems [VDI Bericht_c 2006]

Eine detaillierte Funktionsstruktur des Batteriesystems mit allen Komponenten und Verbindungen sowie deren räumlicher Anordnung wird exemplarisch in Abbildung 39 dargestellt.

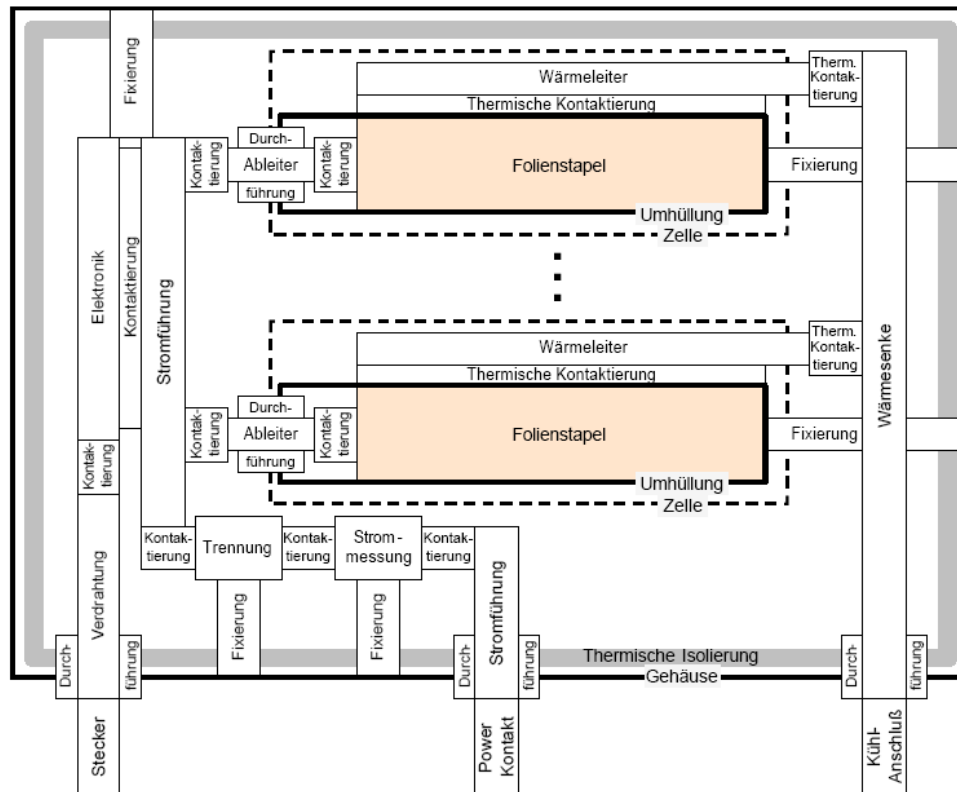


Abbildung 39: Aufbautechnische Funktionsstruktur des Batteriesystems [VDI Bericht_b 2007]

Die Beherrschung der gespeicherten Energie bei Übertemperatur, Überspannung, fehlerhaftem Berührungsschutz ect. wird durch ein Batteriemanagementsystems (BMS) realisiert.

6.3.6 Batteriemanagement

Moderne Batteriemanagementsysteme beinhalten als wichtige Ziele wie in [Naunin 2007] aufgelistet, die Erhöhung der Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit aber auch die Reichweitenbestimmung. Bei Lade- und Entladezustand müssen folgende Anforderungen der Batterie sichergestellt werden:

- Zell- bzw. Modulspannung innerhalb zulässiger Grenzen (bei Li-Ionen Batterien für die Einzelzelle 2,7 V bis 4,2 V)
- Strombegrenzung als Tiefentladungsschutz
- Batterietemperierung im Betriebsbereich und Temperatenausgleich zwischen den Modulen
- Steuerung von Lade- und Entladeprozess im vorgeschriebenen Rahmen (inkl. Ladungsausgleich)

Einer Vielzahl von Sensoren (Spannungen, Strom, Temperaturen, Isolation, Interlock-Schleife) und Trennrelais im Lastpfad sorgen für einen gefahrlosen Betrieb des Batteriesystems. Auf geringen Eingestromverbrauch ist aus Effizienzgründen zu achten.

Die Problematik vom Laden und Entladen eines Batteriepacks ohne BMS kann folgendermaßen vereinfacht erklärt werden:

Die „schwächste“ Batterie bleibt in einer Serienschaltung in ihrer Spannung beim Laden etwas unter der Ladeschlussspannung. Fast die gesamte Serienschaltung hat die Ladeschlussspannung aber bereits früher erreicht und wird überladen. Die schlechte Zelle wird jedoch nie ganz voll und als erstes auch wieder (tief-) entladen. Die Spannung bricht verfrüht zusammen und täuscht für das Gesamtsystem eine leere Gesamtbatterie vor. Mit jedem Ladevorgang verstärkt sich dieser Effekt und nach kurzer Zeit ist die Batterie nicht mehr funktionsfähig.

In Abbildung 40 wird überleitend zum Thema Kühlung das elektrische und thermische Management schematisch noch einmal dargestellt.

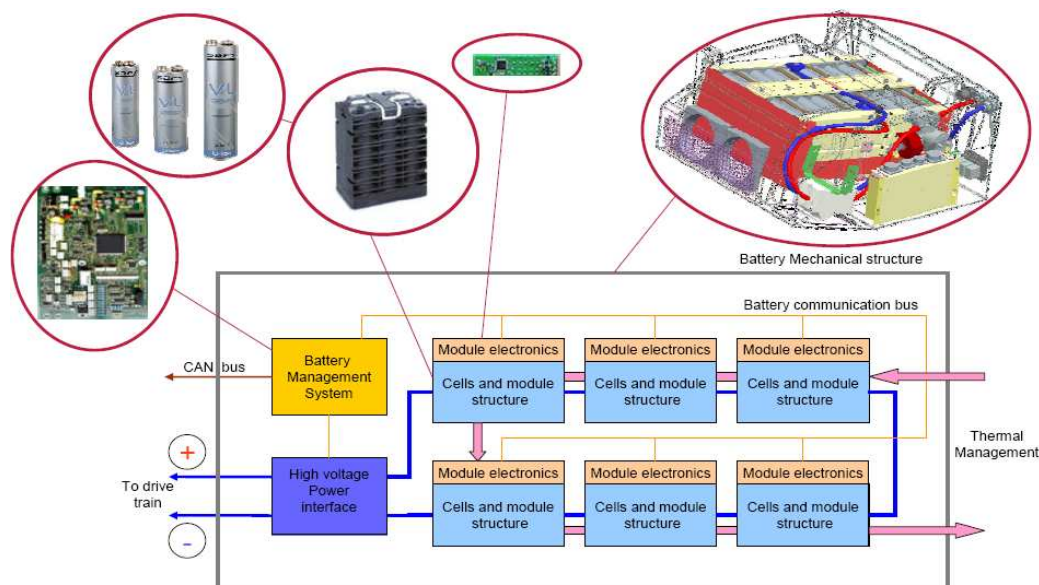


Abbildung 40: Schematische Darstellung eines Li-Ion Batteriesystems mit elektrischem und thermischem Management [Köhler 2007]

6.3.7 Kühlung

Am Innenwiderstand der Zellen entsteht thermische Verlustleistung. Dadurch wird die Zelle erwärmt und es kommt zu unerwünschter Alterung. Die Kühlung des Batteriesystems bringt einen wesentlichen Beitrag zur Lebensdauer. Einen Überblick wichtiger Zusammenhänge und möglicher Varianten soll dieses Unterkapitel geben.

Besonders wichtig ist die gleichmäßige Kühlung aller Zellen im Batterieverbund, wobei auch auf das Temperaturgefälle in der Zelle selbst vom Hersteller Rücksicht genommen werden muss. Aktive Kühlung kann grundsätzlich mit Luft oder Flüssigkeit erfolgen. Die Temperierung kann durch eine Liquidkühlung meist besser umgesetzt bzw. für die geforderte Lebensdauer sichergestellt werden. Kühlungselemente werden elektrisch isoliert, was den Wärmeübergang von der Zelle ins Kühlmedium verschlechtert, der aber noch um Größenordnungen besser bleibt als bei Luftkühlung. [VDI Bericht_c 2006]

Die Art der Zelle hinsichtlich Oberfläche/Volumen-Verhältnis kann die Kühlung, wie bei z.B. Flachzellen, entscheidend erleichtern. Wasserkühlung ist grundsätzlich aufwendiger als Luftkühlung, führt aber auch zu leichteren Motoren.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit bietet Abbildung 41 eine Variantenübersicht. Abbildung 42 stellt eine Batteriesystemübersicht mit Kühlung und Lastkreis für einen Einblick in die Wechselwirkungen dar.

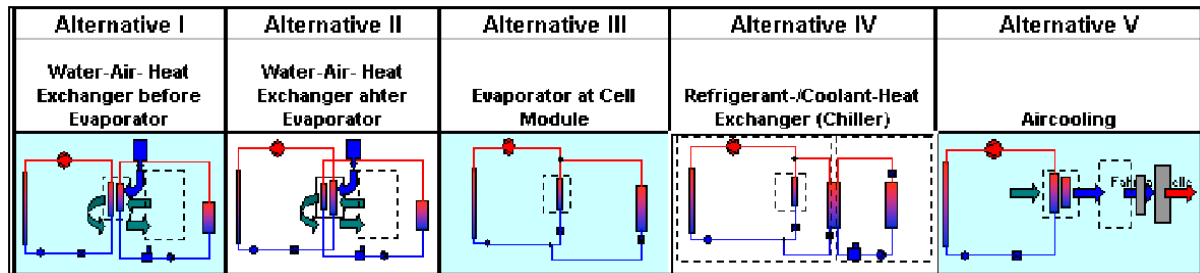


Abbildung 41: Aktive Kühlungsvarianten (Luft- und Flüssigkeitssysteme) mit Einbindung ins Fahrzeug [VDI Bericht_c 2006]

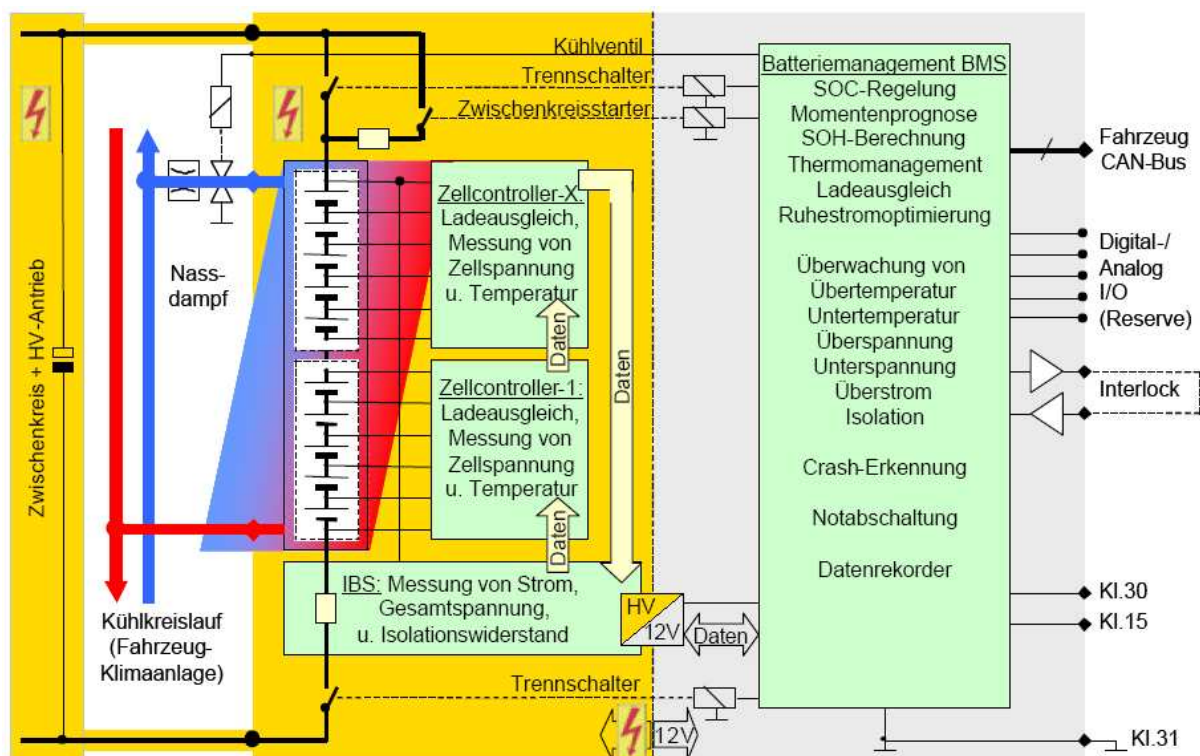


Abbildung 42: Batteriesystem mit Kühlung und Lastkreis [VDI Bericht_b 2007, S75]

6.4 Laden/Entladen der Traktionsbatterie

Entladen wird die Traktionsbatterie durch das Antreiben der elektrischen Maschine oder diverser Nebenverbraucher wie z.B. Licht, Scheibenwischer, Bremsen. Geladen kann durch das öffentliche Strom-Netz werden, hybridisch durch den VKM oder der Rekuperation.

Allgemein gilt:

Beim Laden- und Entladevorgang treten Verluste auf. Diese Verluste werden durch das abfließen von Ladestrom in Nebenreaktionen und die Selbstentladung bestimmt wobei das elektrische Verhalten von Ladegrad q [%SOC], der Temperatur T und auch vom Alterungszustand (SOH) abhängt. Das typische Verhalten der Batteriespannung in Abhängigkeit vom Ladegrad (SOC) wird in Abbildung 43 dargestellt.

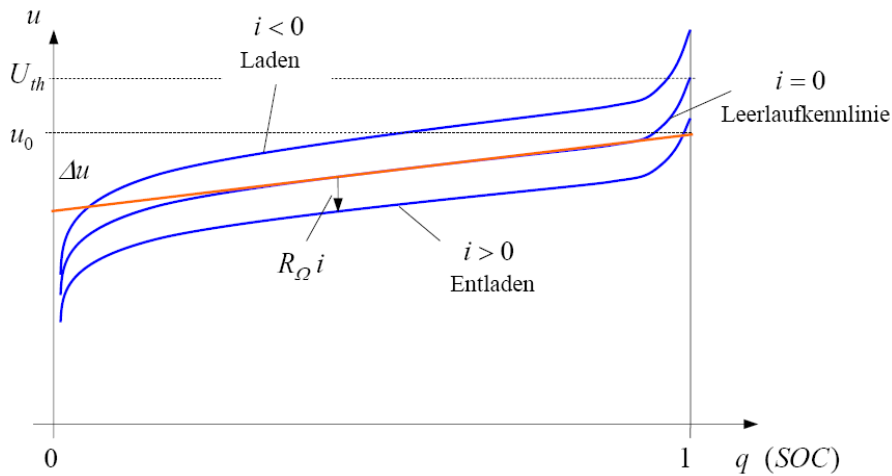


Abbildung 43: Typisches Verhalten der Batteriespannung in Abhängigkeit von Ladegrad und Strom [Böcker 2007, S49]

Der Wirkungsgrad einer Batterie wird über einen Lade- / Entladezyklus definiert mit:

Formel 7: Batterie Lade- Enladewirkungsgrad

$$\eta = \frac{W_{\text{Entladen}}}{W_{\text{Laden}}} = \frac{\int_{\text{Entladen}} u(t)i(t)dt}{-\int_{\text{Laden}} u(t)i(t)dt}$$

Wird dieser Zyklus mit konstantem Ladestrom $i = -I$ und einem Entladestrom von $i = I$ durchführen, wobei der Fehlstrom i_v vernachlässigt wird, lassen sich die Lade- und Entladearbeiten wegen

$$dq = \frac{I dt}{Q_0}$$

als Flächen unter den Spannungskurven interpretieren. (Abbildung 44)

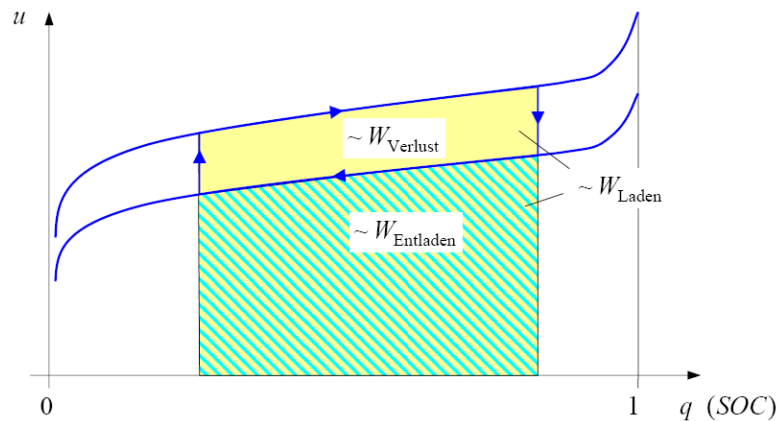


Abbildung 44: Lade- und Entladearbeiten über einen Lade-Entlade-Zyklus [Böcker 2007, S51]

Der Wirkungsgrad hängt vom Innenwiderstand und der Größe des Lade- bzw. Entladestroms ab. Typische Werte für den Wirkungsgrad liegen lt. [Böcker 2007, S51] im Bereich $\eta=0.6 - 0.9$, wobei der obere Wert nur mit kleinen Strömen (längerer Ladedauer) zu erreichen ist.

Für die Ladungsbilanzierung wird die entnommene Ladung in einem Batterie-Modell berechnet oder am Fahrzeug gemessen und daraus ein neuer SOC berechnet. Mit:

Formel 8: Speicherkapazitätsberechnung

$$\text{SOC} = (1 - \text{entnommene Ladung} / \text{Nennladung}) * 100\%$$

Zu beachten ist, dass die Nennladung (Batteriekapazität) von der Temperatur, vom Entladestrom, dem Lastprofil und dem Alterungsverhalten abhängig ist. Eine exakte Bestimmung durch eine Berechnung wird zu einem komplexen Problem. Auf die verschiedenen Ladungsvarianten und deren spezifischen Eigenschaften wird im Folgenden eingegangen.

6.4.1 Netzladung

Das Laden mit dem öffentlichen Netz kann nicht nur genutzt werden um das Elektroauto zu laden sondern auch um in das Netz zurückzuspeisen.

Die Hauptkomponenten einer herkömmlichen Netzladung sind in Abbildung 45 skizziert und aufgelistet:

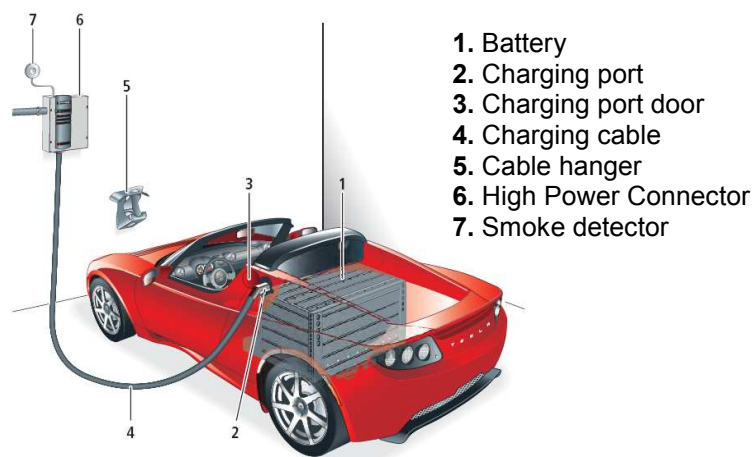


Abbildung 45: Hauptkomponenten für das Laden eines Elektroautos [Tesla 2009, S 5-6]

„Optimale“ Ladeverfahren setzen sich aus verschiedenen, auf die Batterieart abgestimmten Phasen unter Berücksichtigung verschiedener Ladekennlinien, zusammen. Hohe Zyklenlebensdauern und möglichst kurze Ladezeiten können dadurch verwirklicht werden.

Bestimmt wird das Laden bzw. die Ladezeit einer Traktionsbatterie, neben dem Batterietyp und der vom Ladegerät vorgegebenen Ladekennlinien, hauptsächlich durch den Ladestrom. Dieser ist bei netzgespeisten Ladegeräten mit dem maximal zulässigen Netzstrom (z.B.: 10 A oder 16 A bei Starkstrom) begrenzt. [Naunin 2007]

Eine Ladeleistung ergibt sich für den Anschluss in jedem Haushalt mit:

Formel 9: Ladeleistungen am Netz

$$2,3\text{kW} = 230\text{V} \times 10\text{A} \quad \text{Steckdose}$$

$$3,68\text{kW} = 230\text{V} \times 16\text{A} \quad \text{Starkstromanschluss}$$

Mit einem Ladewirkungsgrad von $\sim 0,8$ wird für eine Vollladung bei vorhandenem Starkstromanschluss und 20kWh Batteriekapazität eine Ladezeit von $\sim 7\text{h}$ benötigt. Durch die Einschränkung vom SOC-Hub für längere Lebensdauer ist dementsprechend weniger nutzbare Batteriekapazität vorhanden und die benötigte Ladezeit geringer.

Hinsichtlich der Funktionalität und der Lebensdauer existiert eine optimale Ladespannung, welche jedoch Abhängig vom Batteriezustand ist.

Aus dem Ladeverfahren für Hochstrom Li-Ionen Batterien [Jossen et al. 2006] kann gefolgert werden, dass je höher der Ladestrom umso kürzer die Ladezeit ist (Abbildung 46). Signifikante Vorteile durch den hohen Ladestrom hat man dazu allerdings nur bei Einschränkung des SOC Bereichs. Eine Schnellladung erfordert Batterien mit hoher Ladeleistung und die dazu erforderliche Infrastruktur.

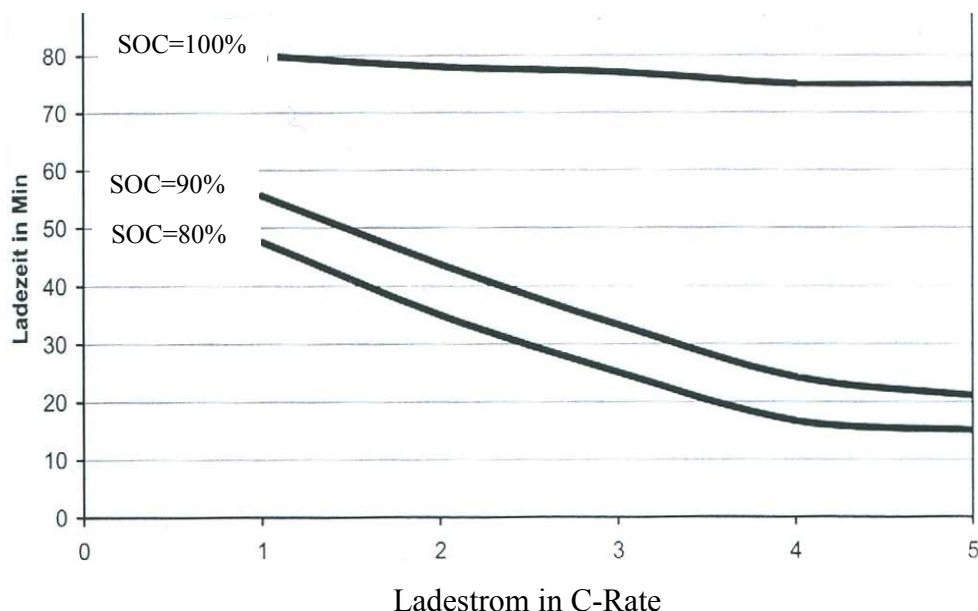


Abbildung 46: Ladezeiten für eine Lithium-Polymer Zelle (Hochstromtyp) in Abhängigkeit vom Ladestrom [Jossen et al. 2006]

Die gespeicherte Energie der Batterien kann bei Bedarf wieder in das elektrische Netz eingespeist werden. Dazu muss das Fahrzeug ans Netz angeschlossen und die Batterien ausreichend geladen sein. Diese Möglichkeit der Rückeinspeisung, von Strom aus Batterien von Elektrofahrzeugen in das elektrische Netz, wird als „vehicle to grid“ V2G bezeichnet. Das V2G Konzept wird in Abbildung 47 skizziert.

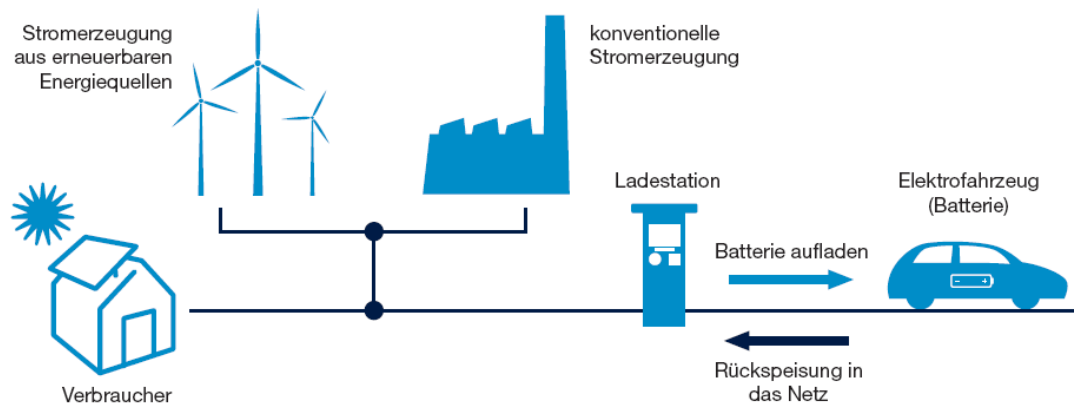


Abbildung 47: Vehicle to grid Konzept [PWC 2009]

Als weitere Option gilt, dass ein Haushalt durch V2G über eine gewisse Zeit (je nach Stromverbrauch und Speicherkapazität der Batterien) im Sinne eines Notstromaggregates, seinen Strombedarf decken kann. Bei eigener Energieerzeugung kann durch die Speichermöglichkeit im Fahrzeug sogar eine Energieautarkie geschaffen werden.

Eine Studie [PWC 2009] zeigt, dass auf Basis eines durchschnittlichen Fahrverhaltens 82% der Batteriekapazitäten als gesicherte Stromquellen (Lieferung von Strom garantiert über 24h) zur Verfügung stehen. Weitere 7% der Batteriekapazitäten stehen zeitweise über den Tag zur Verfügung und könnten zusätzlich in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Rund 11% der Batteriekapazität werden täglich für die Fahrten sowie Wiederbeladung benötigt.

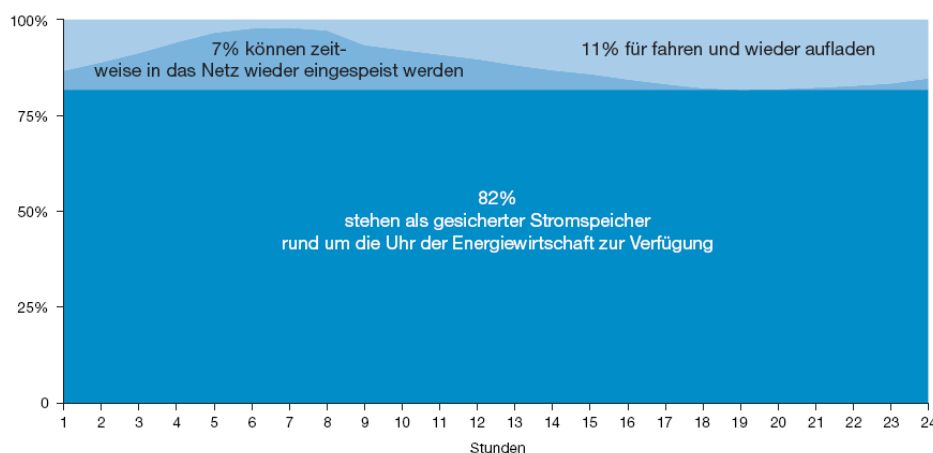


Abbildung 48: Verteilung der täglichen Batteriemengen auf Basis des durchschnittlichen Fahrverhaltens [PWC 2009]

Unter der Annahme (für Österreich), eines Anteils von 20% Elektrofahrzeugen an der gesamten Anzahl von PKW, einspurigen Fahrzeugen und leichten Nutzfahrzeugen, könnten ca. 16 TWh Strom wieder (gesichert) in das Netz eingespeist werden. Dies wären ca. 17% des Gesamtstromverbrauchs. Es werden ca. 5-8% des Stromverbrauchs zur Regelung (Ausgleichsenergie) in Österreich benötigt woran die Elektrofahrzeuge einen erheblichen Anteil liefern können [PWC 2009].

Eine Lösung für das Batterietemperaturmanagement (Lebensdauer der Batterie) beim Parken bietet sich hiermit sofort an, denn wenn geparkt (geladen oder eingespeist) wird kann ebenfalls eine geringe Energiemenge für die Temperierung der Batterie aufgewendet werden.

Nachlademöglichkeiten sollte es in erster Linie am Wohnort, am Arbeitsplatz, bei Bahnhöfen, Parkhäuser, diversen Freizeiteinrichtungen und öffentlichen Einrichtungen geben.

6.4.2 Rekuperation

Unter Rekuperation bzw. Regeneration wird in diesem Zusammenhang die Rückgewinnung elektrischer Energie aus der Bewegungsenergie verstanden. Durch die elektrische Maschine wird im generatorischen Betrieb beim Bremsen elektrische Energie in die Batterie gespeichert.

Erwartete Bremswirkung, gegeben durch die Stellung des Gas- und Bremspedals, Fahrverhalten, sowie die maximale Generatorleistung und die Ladung der Batterie bestimmen die Randbedingungen der Rekuperation (Abbildung 49). Das theoretisch mögliche Energieangebot zur Speicherung kann durch die kinetische Energie plus der gespeicherten Rotationsenergie abzüglich der relevanten Verluste (Roll-, Luft-, Getriebe-, und Motorschleppverluste) errechnet werden.

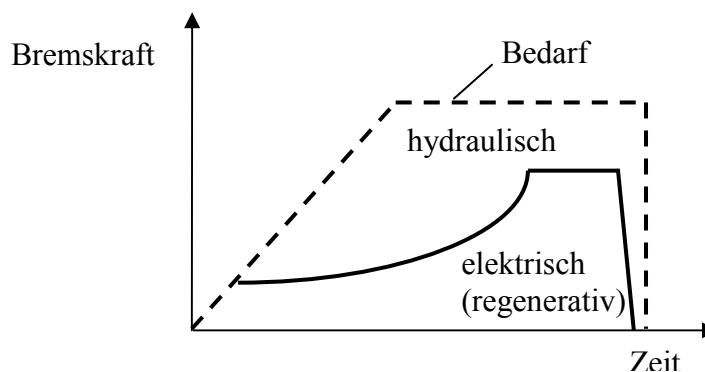


Abbildung 49: Prinzipieller Zusammenhang einer elektrischen und hydraulischen Bremsung.

Das Ladeverhalten kann durch die Verwendung von einer Batterie in Kombination mit einem Doppelschichtkondensator verbessert werden. Dabei kann eine spezifische Leistung von etwa 3000 W/kg erreicht werden und die Spitzenlast bei der Energierückgewinnung beim Bremsen bis zum Faktor 2,5 erhöht werden [Naunin 2007, S60ff]. Details zu DSK siehe Kapitel 6.3.4.

Allgemein sind aus Gründen der Batterielebensdauer maximaler Ladestrom bzw. maximale Ladekapazität limitiert. Die Ströme sind wesentlich höher als bei der Netzladung, da die hohen Bremsleistungen nur für kurze Zeitabschnitte zur Verfügung stehen.

Prinzipiell unterscheidet man bei der Aufteilung der Bremsanforderung zwei Strategien [Bauer 2007]: die parallele und serielle Rekuperation. Bei der parallelen Rekuperation wirken Reibungs- und Generatorbremse gleichzeitig (mit prozentueller Bremskraftaufteilung der Bremsanforderung). Die serielle Rekuperation startet mit einer reinen generatorischen Bremsung und setzt die Reibungsbremse erst dann ein, wenn die Bremsanforderung das vom Generator zur Verfügung stehende Bremsmoment übersteigt oder radselektive Regeleingriffe (z.B. Elektrisches Stabilitätsprogramm) dies erfordern.

Potentialabschätzung durch Rekuperation (beispielhaft)

Für ein Fahrzeug mit der Fahrzeugmasse 1500kg liegt das Grenzpotential der speicherbaren Bremsenergie (unter Berücksichtigung der Roll-, Luft-, Getriebe-, und Motorschleppverluste; nicht berücksichtigt wurde die gespeicherte Rotationsenergie) im NEDC bei ca. 0,38kWh. (Abbildung 50)

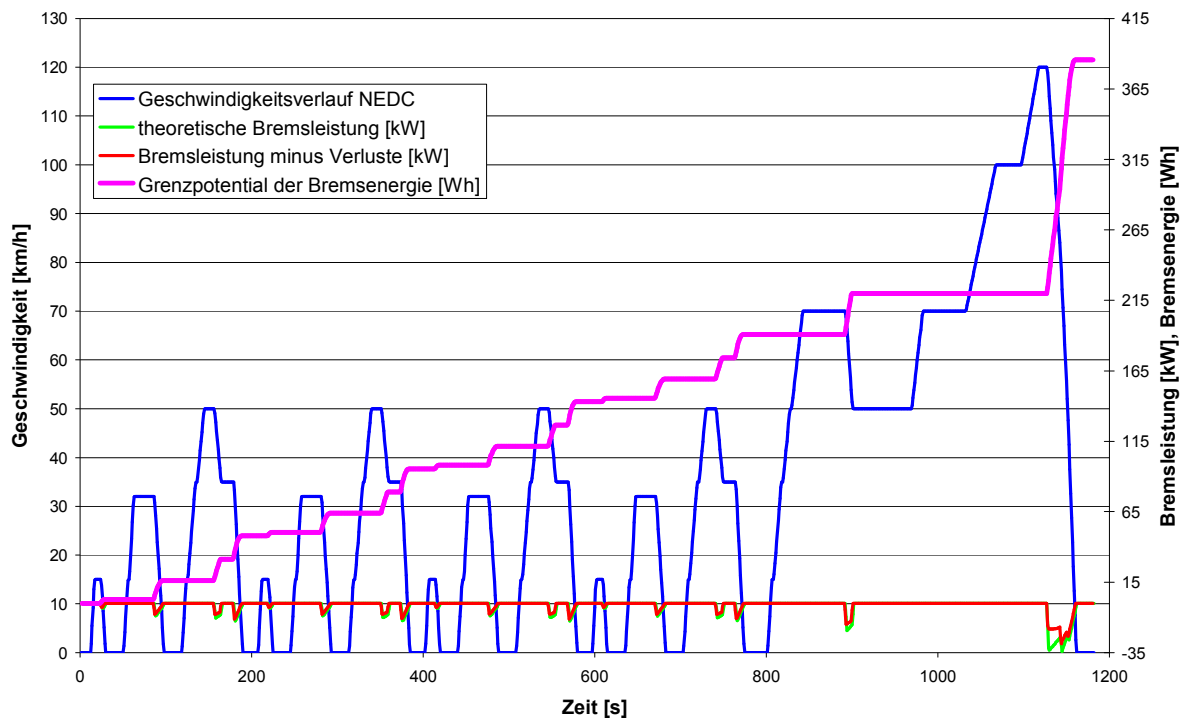


Abbildung 50: Fahrgeschwindigkeit und Bremsleistung im NEDC

Bei Annahme eines Rekuperationswirkungsgrades von:

Formel 10: Rekuperationswirkungsgrad

$$\eta_{\text{rekup}} = \eta_{\text{Getriebe}} * \eta_{\text{Generator}} * \eta_{\text{Batterie}} = 0,95 * 0,90 * 0,90 = \sim 77\%$$

und einem Wirkungsgrad für den motorischen Betrieb von:

Formel 11: Antriebswirkungsgrad

$$\eta_{\text{e_antrieb}} = \eta_{\text{Getriebe}} * \eta_{\text{Motor}} * \eta_{\text{Batterie}} = 0,95 * 0,91 * 0,90 = \sim 78\%$$

erhält man für den Gesamtwirkungsgrad einer Rekuperation (Aufnahme der Bremsenergie am Rad bis Abgabe ans Rad) von $0,77 * 0,78 = \sim 60\%$.

Das reale Potential der Speicherung in die Batterie beträgt also $0,77 * 0,38\text{kWh} = 0,29\text{kWh}$, und jenes reale Potential das wieder an das Rad abgegeben werden kann von $0,78 * 0,29\text{kWh} = 0,23\text{kWh}$. Die Streckenlänge im NEDC ist ca. 11km lang, woraus sich ein gesamtes Einsparpotential pro 100km, mit NEDC Fahrverhalten, bei $0,23\text{kWh}/11\text{km} * 100\text{km}$ von etwa 2kWh ergibt (entspricht reiner Antriebsarbeit).

Bei einem Heizwert von $9,8\text{kWh/l_Diesel}$ und einem Motorwirkungsgrade von ca. 25% ist dies eine mögliche Verbrauchsreduktion von $\sim 0,8\text{l}/100\text{km}$. Wird durch geeignete Strategie der VKM Betrieb in Bereichen schlechter Wirkungsgrade durch die Elektrotraktion ersetzt können $\sim 2\text{l}/100\text{km}$ (bei 10% Motorwirkungsgrad) eingespart werden. Bei 5Liter/100km Treibstoffverbrauch eines PKW-VKM sind dies 16% - 40% Verbrauchseinsparungspotential, bei einem Energieverbrauch eines Elektrofahrzeuges von $16\text{kWh}/100\text{km}$ sind dies 12,5%.

Für das gleiche Fahrzeug im CADC ergibt sich ein Grenzpotential der speicherbaren Bremsenergie von ca. $1,8\text{kWh}$. Unter Beibehaltung der Wirkungsgrade ergibt sich somit ein reales Potential (Aufnahme der Bremsenergie am Rad bis Abgabe ans Rad) von $1,8\text{kWh} * 0,6 = 1,08\text{kWh}$.

Die Streckenlänge des CADC ist ca. 50 km lang, woraus sich ein gesamtes Einsparpotential pro 100km, mit CADC Fahrverhalten, bei $1,08\text{kWh}/50\text{km} \cdot 100\text{km}$ von $2,16\text{kWh}$ ergibt.

Bezüglich Rekuperation ist das Ergebnis im NEDC somit auch für reales fahren repräsentativ, mit einer Abweichung des gesamten Einsparpotentials von nur $0,16\text{kWh}/100\text{km}$.

Alle Potentialabschätzungen beziehen sich auf Bremsungen die ohne zusätzliche Vernichtung von Energie in der hydraulischen Bremse getätigt wurden. Aus Gründen der Fahrbarkeit und der geringeren Bremswirkung der elektrischen Maschine bei hohen Drehzahlen würde das Verbrauchsreduktionspotential zusätzlich eingeschränkt.

6.4.3 Laden durch den Verbrennungskraftmotor

Wie in Abbildung 9 bereits gezeigt wurde, befindet sich der Bereich mit geringstem spezifischem Kraftstoffverbrauch bei hohen Lasten. Wenn der VKM nicht nur die Antriebsenergie aufbringen muss, sondern auch den Generator antreiben soll um die Batterien zu laden, ist er diesem Verbrauchsoptimum durch die zusätzliche Last des Generators näher. Optimalisiert befindet sich der VKM-Betriebspunkt genau im Bereich mit geringstem spezifischem Kraftstoffverbrauch. Man spricht beim Laden durch den VKM auch von s.g. Lastpunktanhebung, die Teil der Strategie ist und in der sich die elektrische Maschine im generatorischen Betrieb befindet.

6.4.4 Entladen der Batterie

Die Kapazität der Batterie die entnommen werden kann ist abhängig vom Entladestrom und dem „inneren Zustand“ der Batterie. Als „innerer Zustand“ wird bei [Naunin 2007] ein Zustandsvektor mit den Größen: Temperatur, Alter, Zyklenzahl, Innenwiderstand und Ladezustand verstanden. Vorwiegend nichtlineare Zusammenhänge machen die Bestimmung des Ladezustandes zu einem komplexen Problem. Dies zeigt wie schwierig es ist eine genaue Angabe zum Ladezustand zu machen, die für Reichweitenangaben und Strategiewahl bei Hybridfahrzeugen nötig werden. Auch das Fahrverhalten hat direkten Einfluss auf die Dynamik des Entladestroms und somit auf die Reichweite, d.h. der Fahrer kann die Reichweite mitbestimmen und zur Erreichung seines Zieles mit schlauer Fahrweise aktiv beitragen. Denn es gilt je höher der Entladestrom und je niedriger die Temperatur, desto geringer ist die entnehmbare Kapazität.

Entladetiefe

Bei der Entladetiefe, also dem nutzbaren SOC-Hub, kann kein allgemein gültiger Wert für Batterien von Hybrid- oder Elektrofahrzeug herangezogen werden. Viel mehr ist der Batterietyp mitentscheidend, wie Abbildung 51 und Abbildung 52 im Vergleich von NiMH und Li-Ionen Batterie zeigen. Zu bemerken ist, dass Batterien für die Hybridanwendung mehr Zyklen aushalten müssen, da die Kapazität im Verhältnis zur Rekuperationsenergie geringer ist als bei Batterien für Elektrofahrzeuge. Bei rein elektrischen Antrieben kann lt. [Koller 2009] die Entladetiefe stark erhöht werden, da durch die höhere Speicherkapazität weniger Zyklen notwendig sind. Eine Batterie mit nutzbarer Kapazität von 20 kWh würde bei einem Mittelklassewagen für ca. 100km reichen, bei 2000 Zyklen (nominelle Zyklen-Lebensdauer) wäre dies eine Reichweite pro Batterie von mindestens 200000 km.

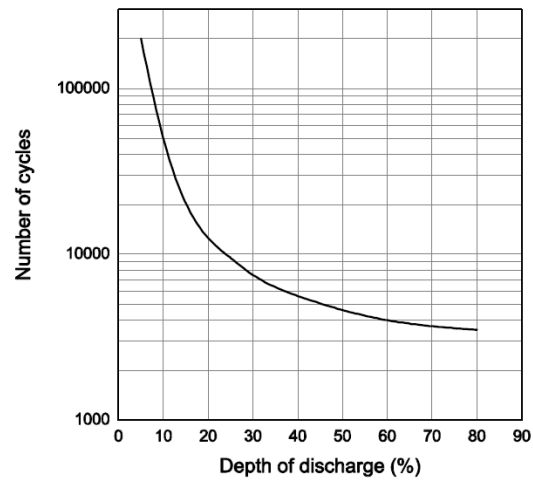


Abbildung 51: Abhängigkeit der Zyklenzahl von der Entladetiefe für eine NiMH-Batterie [Quelle: Saft Batterien GmbH, Stand 2006 übernommen aus Böcker 2007, S52]

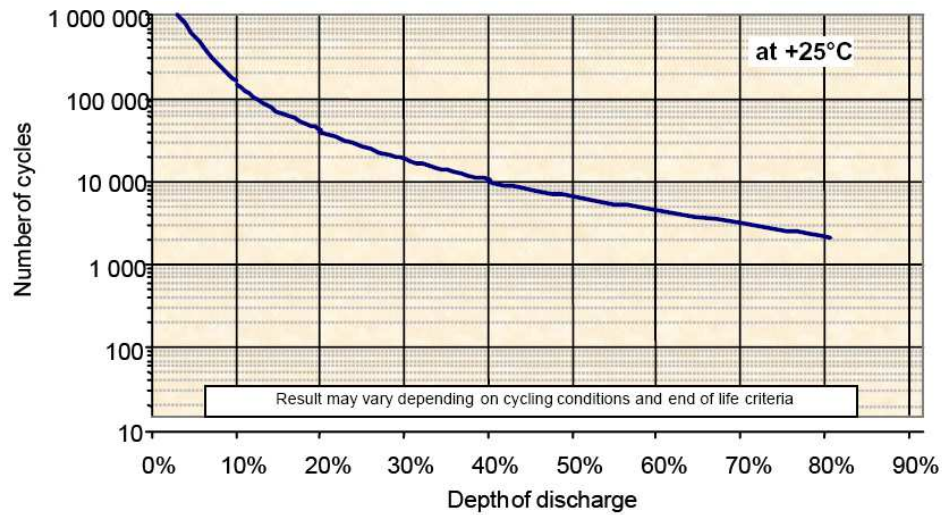


Abbildung 52: Abhängigkeit der Zyklenzahl von der Entladetiefe für eine Li-Ionen-Batterie [Quelle: Saft Batterien GmbH, Stand 2006 übernommen aus Böcker 2007, S52]

7 Simulation der Fahrzeugkonzepte

Dieses Kapitel widmet sich der Beschreibung aller notwendigen Randbedingungen für den Nachvollzug der Simulationsergebnisse.

7.1 Methode

Für die Potentialabschätzung wird die Methode der Simulation verwendet. Erarbeitete Fahrzeugkonzepte unterschiedlicher Kategorien werden im PHEM („Passenger car and Hheavy duty vehicle Emission Model“) simuliert und einem Ergebnisvergleich unterzogen.

Das Gegenstück für diese Untersuchungen bei erwerbzbaren Fahrzeugen wäre der PKW-Rollenprüfstand. Da es die hier simulierten Fahrzeugkonzepte in der Praxis noch nicht gibt und dies unter anderem eine unüberwindbare Kostenfrage darstellt, kommt diese Art der Untersuchung nicht in Frage. Der Rollenprüfstand dient aber für das Simulationsprogramm PHEM als ein entscheidendes Referenz- (Kontroll-) Instrument zur Überprüfung der Ergebnisplausibilität und wird aus diesem Grund zum besseren Verständnis ebenfalls kurz erläutert und das gewählte Vergleichsfahrzeug mit seinen Messwerten dargestellt.

Zur Überprüfung der Plausibilität und zu Vergleichszwecken wurden die Fahrzeuge in verschiedenen Fahrzyklen betrieben.

7.1.1 Beschreibung PKW Rollenprüfstand der TU-Graz

Technische Daten [Hausberger, 2007]:

Bremse:	56kW Gleichstrommaschine + 240kW Wechselstrommaschine
max. Geschwindigkeit:	200km/h
Regelbare Temperatur:	-30°C bis +40°C (+ Regelbare Luftfeuchte)
simulierbare Fahrzeugmasse:	567 bis 2325kg (55kg Schrittweite)
CVS Durchfluss:	6, 10 oder 20m ³ /min
Lieferfirma des Rollenprüfstandes:	Zöllner

Betriebsarten

Der Prüfstand kann im stationären und instationären Betrieb gefahren werden, wobei sowohl Brems- als auch Schleppbetrieb möglich ist.

Stationärbetrieb (Leistungsprüfstand)

Die Regelung bei dieser Betriebsart erfolgt entweder bei konstanter Zugkraft oder konstanter Fahrgeschwindigkeit.

- Konstante Zugkraft: Das Antriebsdrehmoment an den Hinterrädern bleibt über dem Fahrgeschwindigkeitsbereich konstant.
- Konstante Fahrgeschwindigkeit: Die Raddrehzahl an der antreibenden Achse bleibt konstant. Die Zugkraft wird durch die Motorlast eingestellt.

Instationärbetrieb (Fahrwiderstandsimulation)

In dieser Betriebsart ermöglicht der Prüfstand die Simulation von Fahrwiderstandskennlinien. Der Fahrwiderstandsgleichung entsprechend werden die straßen- und fahrzeugspezifischen Faktoren am Prüfstand eingestellt. Der zu fahrende Geschwindigkeitsverlauf als Funktion der Zeit wird dem Fahrer mit einem Fahrleitgerät über einen Bildschirm vorgegeben.

Luftwiderstand und Rollwiderstand können aus Ausrollkurven bestimmt werden. Simulation der Fahrwiderstände:

Formel 12: Fahrwiderstandsgleichung

$$F = R_0 + R_1 \cdot v + R_2 \cdot v^2$$

Die Werte R_0 , R_1 und R_2 werden durch einen Abgleich von einem Ausgleichspolygon 2. Ordnung mit der beim Ausrollversuch gemessenen Ausrollkurve ermittelt.

Abgasanalyse

Die Messung der Emissionen erfolgt über eine Vollstrom-CVS-Anlage und Abgasanalysatoren der Firma AVL (CEB II). Die Emissionen können als Beutelwert und im zeitlichen Verlauf (z.B. Sekundenschritte) erfasst und ausgegeben werden.

Die beim Prüfzyklus emittierte Abgasmenge wird durch das sog. CVS - Verfahren (Constant Volume Sampling) ermittelt. Das ausgestoßene Abgas wird dabei mit gereinigter Umgebungsluft verdünnt und mittels Gebläse abgesaugt. (Abbildung 53)

Entnommene Teilströme und Proben aus der geförderten Gasmenge:

- ein definiert verdünnter Teilstrom wird über Partikelfilter zur gravimetrischen Auswertung geleitet.
- ein Teilstrom wird direkt den Abgasanalysatoren zugeführt, welche kontinuierlich die CO_2 , CO, HC, und NO_x Konzentrationen in z.B.: 1Hz Abstand messen
- der letzte Teilstrom wird für jede Emissionskomponente in einen Abgasbeutel geleitet. Gleichzeitig wird ein zweiter Beutel mit Verdünnungsluft gefüllt. Nach Testende wird der Beutelinhalt analysiert und gibt somit die durchschnittliche Konzentration der Abgaskomponenten über den gesamten Test an. Die Hintergrundkonzentration der Verdünnungsluft wird vom Emissionswert abgezogen.

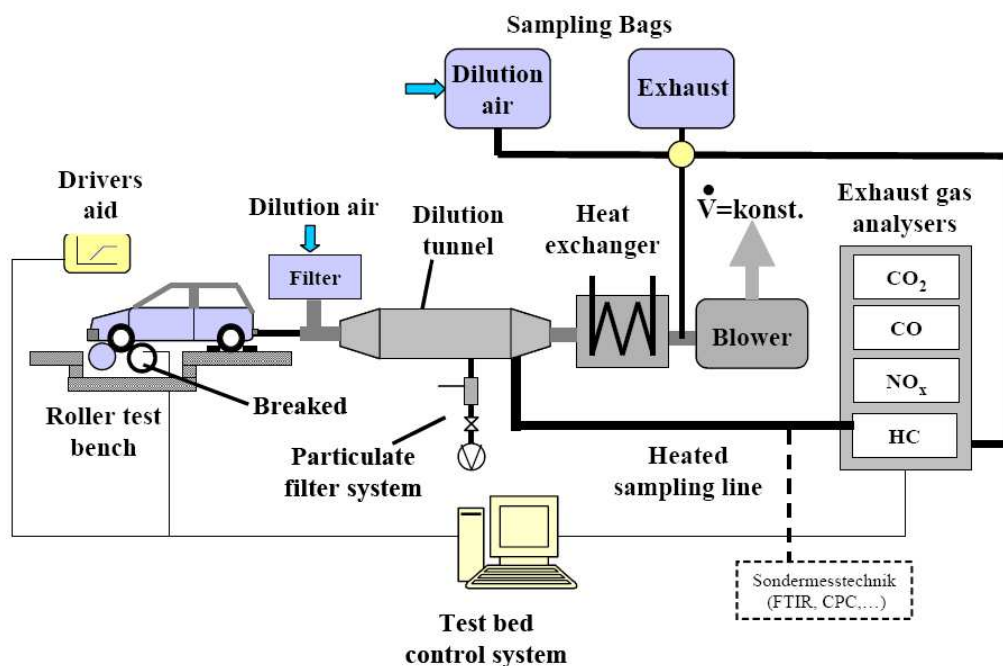


Abbildung 53: Schema eines PKW Rollenprüfstandes mit CVS-Abgasanalyseanlage [Hausberger, 2007]

7.1.2 Emissionsmodell PHEM

Das Programm PHEM [Hausberger, 2003], wurde und wird im Rahmen internationaler Kooperationen entwickelt und stellt den Stand der Technik zur detaillierten Simulation von Energieverbrauch und Emissionen von PKW und Nutzfahrzeugen dar. (Abbildung 54)

Das Modell berechnet für einen gegebenen Fahrzyklus (Geschwindigkeitsverlauf und Fahrbahnlängsneigung über der Zeit) die erforderliche Motorleistung in 1 Hz Frequenz aus den Fahrwiderständen und den Verlusten im Antriebsstrang. Die Motordrehzahl wird aus Reifendurchmesser, Achs- und Getriebeübersetzung sowie einem Fahrer-Gangwechselmodell simuliert. Die Emissionen werden dann entsprechend der aktuellen Motorleistung und Motordrehzahl aus Kennfeldern normierten Formates interpoliert. Das normierte Format stellt Motoren unterschiedlicher Leistungsklassen vergleichbar dar. Die Motordrehzahl ist zwischen Leerlauf (=0) und Nenndrehzahl (=1) normiert, die Leistung zwischen Leerlauf und Nennleistung. Die Verbrauchs- und Emissionswerte werden mittels Division durch die Motornennleistung normiert (ähnlich dem in der Typprüfung relevanten Wert g/kWh, bei diesem wird aber durch die jeweilige Leistung des Messpunktes dividiert, was aber bei Einschluss des Leerlaufes nicht möglich ist).

Ein wesentliches Instrument um eine hohe Modellgenauigkeit zu erreichen ist die für PHEM entwickelte Methode der Dynamikkorrektur. Diese Methode transformiert das Emissionsniveau der Emissionskennfelder auf das Niveau, das in den jeweiligen transienten Fahrabschnitten zu erwarten ist. Für die Dynamikkorrektur wurde eine empirisch-statistische Methode verwendet, die eine rasche Bearbeitung vieler Messwerte erlaubt. Es werden dabei die wesentlichsten Unterschiede des Emissionsverhaltens in stationärem und dynamischem Motorbetrieb von Nutzfahrzeugen und Diesel-PKW infolge

- der Trägheit des Turboladers
- der Trägheit der Ladeluftkühlung
- der meist unterschiedlich programmierten Motorsteuerung

auf einfache Dynamikparameter zurückgeführt. Diese können direkt aus dem Verlauf der Motorleistung und der Motordrehzahl im jeweiligen Zyklus berechnet werden. Neben den Emissionen im betriebswarmen Zustand können mit dem Modell auch Kaltstartemissionen simuliert werden, so dass jede in der Realität auftretende Betriebssituation erfasst werden kann. Die momentan verfügbaren Modelleingabedaten basieren auf 118 vermessenen Nutzfahrzeugen sowie 69 PKW.

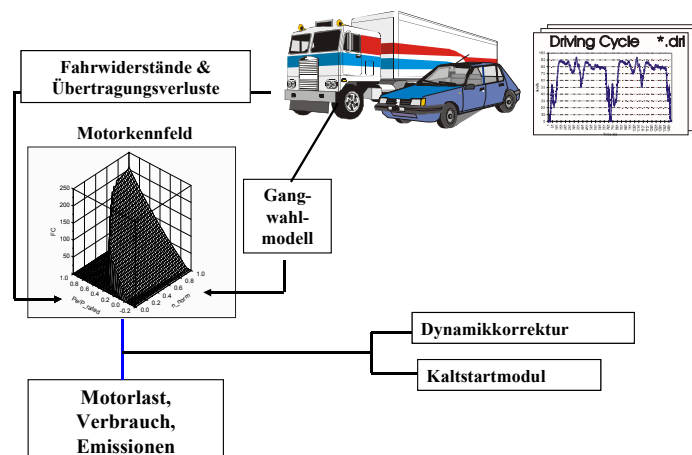


Abbildung 54: Schematische Darstellung des Modells PHEM

7.1.3 Beschreibung der Testzyklen

Verbrauchswerte werden am Rollenprüfstand oder in der Simulation in der Regel anhand genormter Fahrzyklen ermittelt, welche einen Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit über der Zeit vorgeben.

An dieser Stelle werden die verwendeten Testzyklen erklärt.

Die Fahrzeuge dieser Arbeit wurden in folgenden Testzyklen simuliert:

- NEDC Warmstart
- CADC Warmstart Gesamtzyklus

Der NEDC (New European Driving Cycle) wurde als Weiterentwicklung des ECE Zyklus eingeführt. Dieser, für europäische Verhältnisse ausgelegte Test, umfasst zwei Teile, den ECE-Zyklus (4 Cityfahrzyklen) und den EUDC-Zyklus (Extra Urban Driving Cycle). Die gesamte Länge des Tests beträgt 11.007 km bei einer Gesamtdauer von 20min und 10Sek.

Seit dem 1. Januar 1996 erfolgt die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs von Kraftfahrzeugen in der Europäischen Union im NEDC. Der hierbei ermittelte Kraftstoffverbrauch ist durch die in der Realität fehlenden Konstantfahrten und wesentlich höheren geforderten Beschleunigungen und Geschwindigkeiten wenig repräsentativ. Beispielhaft: Es werden im NEDC nur Geschwindigkeiten von 120 km/h geprüft, somit schneiden aerodynamisch ungünstige Fahrzeuge weniger schlecht ab, als im realen Betrieb bei Autobahnfahrten.

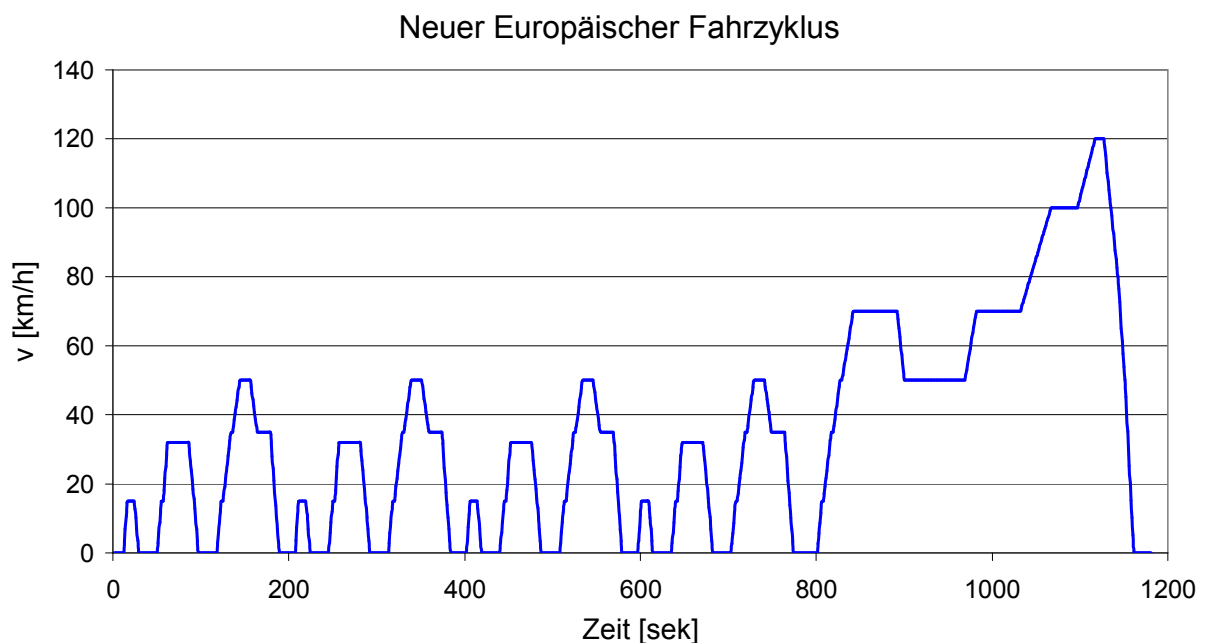


Abbildung 55: Geschwindigkeitsverlauf NEDC (New European Driving Cycle, Neuer Europäischer Fahrzyklus)

Ergänzend erfolgt daher eine Bewertung im s.g. „real world driving cycles“. Im Rahmen des Projektes ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Modeling and Inventories im 5. EU-Forschungsprogramm) wurde der CADC (Common Artemis Driving Cycle) entwickelt [Hausberger 2005].

Neben einer realitätsnahen Fahrdynamik und Motorleistung, ist der ARTEMIS Testzyklus auch durch deutlich höhere Motordrehzahlen als der NEDC charakterisiert. Die Schaltpunkte werden bei diesem Testzyklus zudem in Abhängigkeit von Fahrzeugmasse und Motornennleistung dargestellt.

Es gibt drei verschiedene Typen des CADC für die unterschiedlichen Lastkollektive: Stadt, Land und Autobahn.

- | | |
|------------------------------------|----------------------|
| - CADC Urban (Artemis Urban) | Dauer: 993 Sekunden |
| - CADC Road (Artemis Road) | Dauer: 1082 Sekunden |
| - CADC Motorway (Artemis Motorway) | Dauer: 1068 Sekunden |

Für die Simulation der Fahrzeugkategorien wurden alle drei Teile des CADC als ein gesamter CADC verwendet. Daraus ergibt sich im Ergebnis ein Durchschnittswert einer Fahrt in allen Bereichen (Abbildung 56). Die Reihenfolge hat Einfluss auf die Strategiewahl, welche aber nicht weiter untersucht wurde in dieser Arbeit.

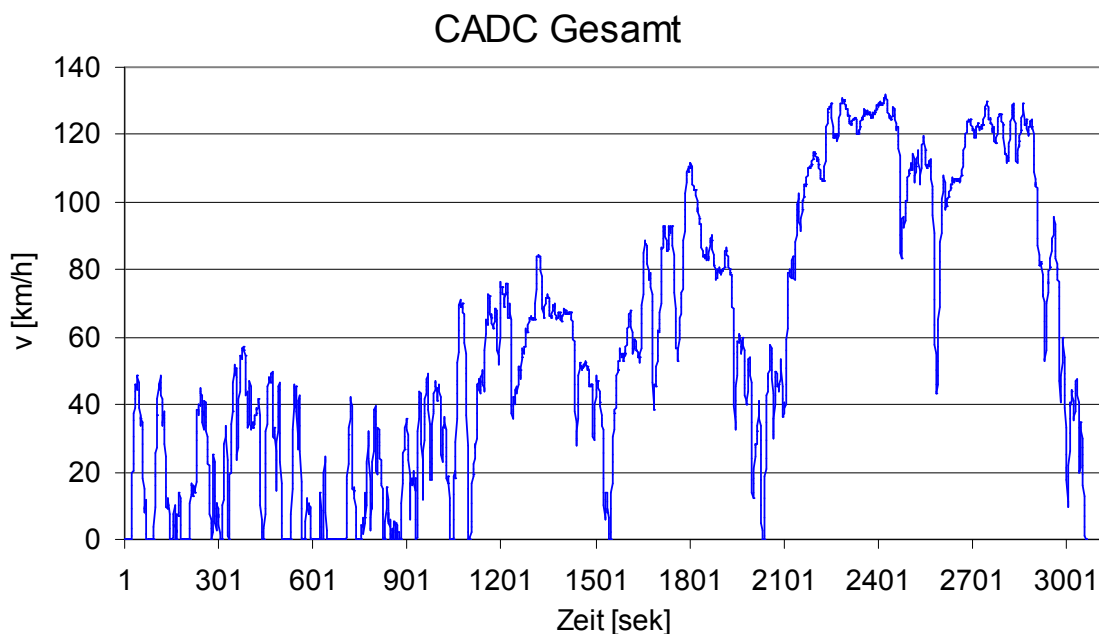


Abbildung 56: Geschwindigkeitsverlauf CADC Gesamt

Wie in Abbildung 56 im Vergleich zur Abbildung 55 ersichtlich sind die CADC Zyklen viel dynamischer als der NEDC. Dadurch sind reale Fahrsituationen besser abgebildet.

7.1.4 Erweiterung des Emissionsmodells für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

Das Emissionsmodell PHEM wurde für die Anwendung von PKW und Nutzfahrzeugen mit VKM entwickelt und erst anschließend für Hybridfahrzeuge erweitert. Die Erweiterung wurde durch diese Arbeit zwar vorangetrieben, ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Der für die Simulationen dieser Arbeit verwendete Stand wird im Folgenden festgehalten.

Zusätzliche Eingaben sind für die Simulation eines Hybridfahrzeugs zu tätigen:

- Batteriedaten als (*.bat) mit:
 - SOC-max [kWh]
 - Innenwiderstand [Ohm]
 - SOC-Start zu SOC-max
 - SOC-min Zulässig im Betrieb zu SOC-max
 - Spannungsverlauf der Lade- und Entladekurve als $f(\text{SOC})$
- Elektromotor Daten als (*.emo) mit:
 - Nennleistung [kW]
 - Maximalleistung [kW]
 - Zeit für Maximalleistung [Sek.]
 - Leerlaufdrehzahl [U/min]
 - Nenn-drehzahl [U/min]
 - kW Leistungsaufnahme im Leerlauf
 - Verlustkennfeld
- Manuelle Strategie des Elektromotors als (*.ean) mit:
 - Motorleistungsangabe in [%] zur Nennleistung zu jeder Zyklussekunde
- Getriebekennfeld als (*.get) mit:
 - Kennfeld (Leistung über der Drehzahl) mit entsprechenden Verlusten
- Hybridstrategie als (*.ste) mit:
 - Grenzlinien für η_{el} (kWh_{el}/kg_{Fuel}) zur Hybridregelung
- η_{el} Kennfeld als (*.ekf) mit:
 - Kennfeld (Leistung über der Drehzahl) mit entsprechenden Wirkungsgraden des gesamten Antriebstrangs zum Generieren und Assistieren.

Als **Hybridmodell** ist ein Parallelhybrid zugrunde gelegt, mit den in Abbildung 57 für die Simulation berücksichtigten Komponenten. Die für die Simulation interessanten Schnittstellen werden ebenfalls dargestellt und Teile der Berechnungslogik ausformuliert.

In diesem Hybridmodell fehlen noch folgende Elemente in der genauen Abbildung, die jedoch durch zusätzliche Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden und die Simulationsgenauigkeit wenig einschränken:

- Leistungselektronik
- Temperaturabhängigkeiten des Lade- und Entladevorganges
- Leistungsabhängiger Spannungsverlauf der Lade- und Entladekurve als $f(\text{SOC})$
- Bremsregelung (Kombination aus mechanischer und generatorischer Bremsung)

Eine Auswahl von einem beliebigen Hybridmodell ist noch nicht möglich.

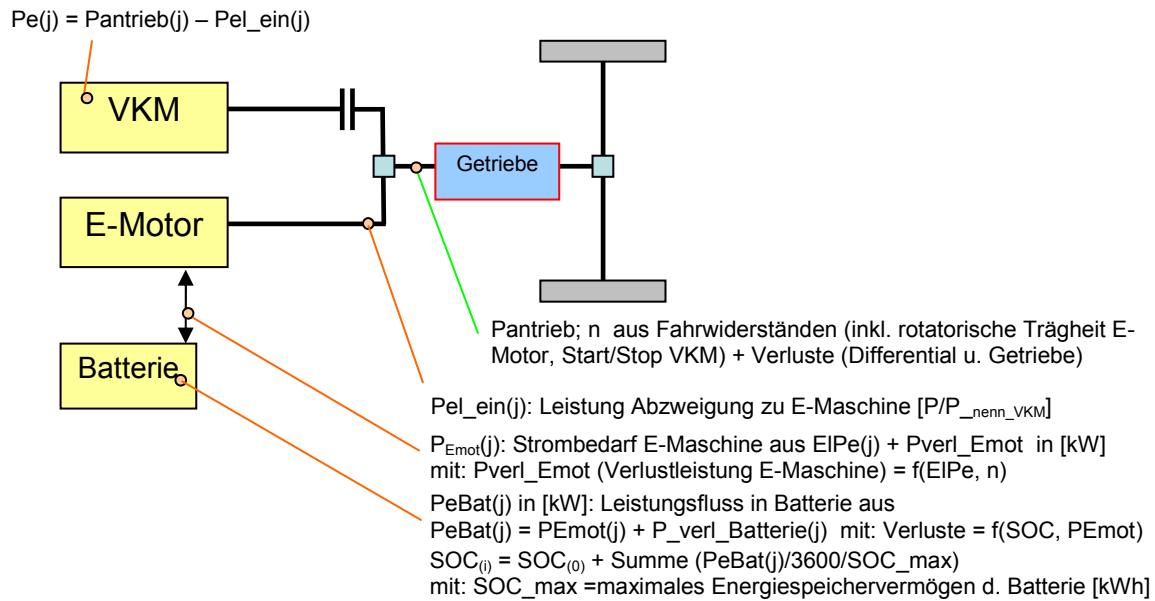


Abbildung 57: Hybridmodell in PHEM

Verwendetes Batteriemodell

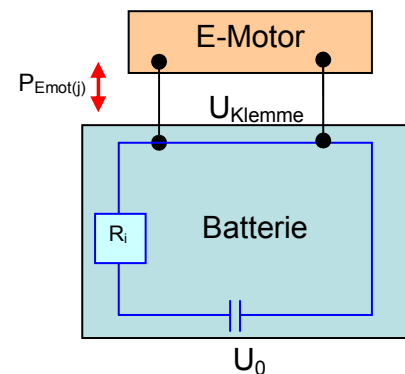
Formel 13: Batteriemodell Formeln

$$P_{\text{Emot}} = I_{\text{Lade}} \times U_{\text{Klemme}} = I_{\text{Lade}} \times (U_0 + I_{\text{Lade}} \times R_i)$$

Daraus folgt die quadratische Gleichung für I_{Lade} mit:

$$I_{\text{Lade}} = \frac{-U_0}{2 R_i} + \sqrt{\left(\frac{U_0^2}{2 R_i}\right) + \left(\frac{P_{\text{Emot}}}{R_i}\right)}$$

Woraus sich ergibt: $P_{\text{eBat}}(j) = P_{\text{Emot}}(j) - I_{\text{Lade}}^2(j) \times R_i$



Dabei ergibt sich U_0 aus der Summe der einzelnen Zellspannungen und R_i aus der Summe der einzelnen Innenwiderstände einer Zelle. Daraus ergeben sich die Zusammenhänge von einem gesamten Batteriepack in Abhängigkeit von der Zellenanzahl, die proportional zur Batteriepackspannung und des gesamten Innenwiderstandes sind. (Abbildung 58)

Bei Konstanzhaltung der Leistung des Elektromotors ergibt sich z.B. beim Laden durch Rekuperation bei höheren Zellenanzahlen und der daraus folgenden geringeren Verlustleistung (höhere Spannung und niedrigerer Strom für gleiche Leistung $P = U \cdot I$) ein besserer Ladewirkungsgrad. Maßgebend ist, gegeben durch die Ladeverlustgleichung, der quadratisch eingehende Ladestrom I_{Lade} .

In Abbildung 58 werden die Vorteile bzgl. geringerer Batterieladeverluste ersichtlich, die durch eine höhere Zellenzahl entstehen. Die rot markierten Linien zeigen die Zellenanzahlen einiger simulierter Fahrzeugbatterien, wobei 136 Zellen bereits eine Klemmenspannung von fast 500 Volt ergeben. Eine Grenzzellenzahl ergibt sich mit der durch die Zellenzahl linear steigenden Kosten und der, aus sicherheitstechnischen Gründen, höchsten Spannung. Mit jeder zusätzlichen Zelle steigt nicht nur die Klemmenspannung sondern auch die gesamte Kapazität vom Batteriepack. Die nutzbare Kapazität wird jedoch wie oben erläutert aus Lebensdauergründen eingeschränkt, was wiederum für die Auslegung der Batterie berücksichtigt werden muss.

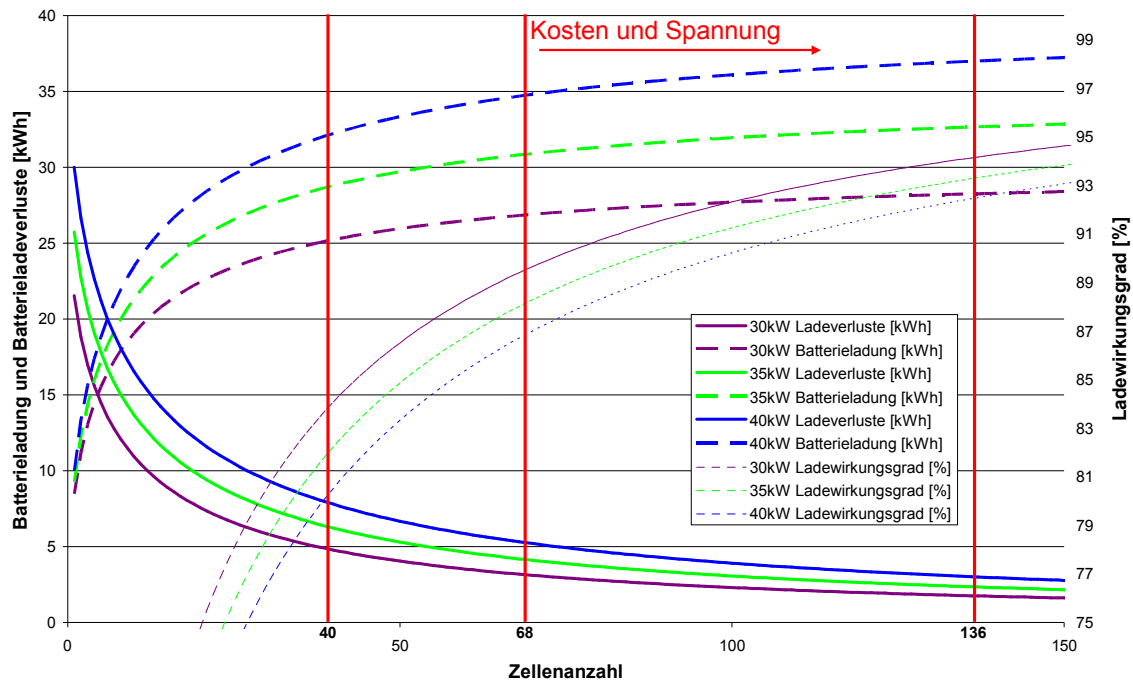


Abbildung 58: Ladewirkungsgrad, Batterieladeverluste und Batterieladung in Abhängigkeit von der Zellenanzahl bei $U_0=3,65\text{V}$ und $R_i=0,004\text{Ohm}$ je Zelle

Eine Abhängigkeit des Ladewirkungsgrades von der Motorleistung, bei konstanter Klemmenspannung, wird in Abbildung 59 deutlich. Kleinere Motorleistungen haben besseren Ladewirkungsgrad der hier mit:

Formel 14: Ladewirkungsgrad

$$\eta_{\text{Lade}} = (\text{Motorleistung} - \text{Ladeverluste}) / \text{Motorleistung}$$

berechnet wurde. Dabei werden für diese Darstellung Motorwirkungsgrad und andere Ladeverluste nicht berücksichtigt.

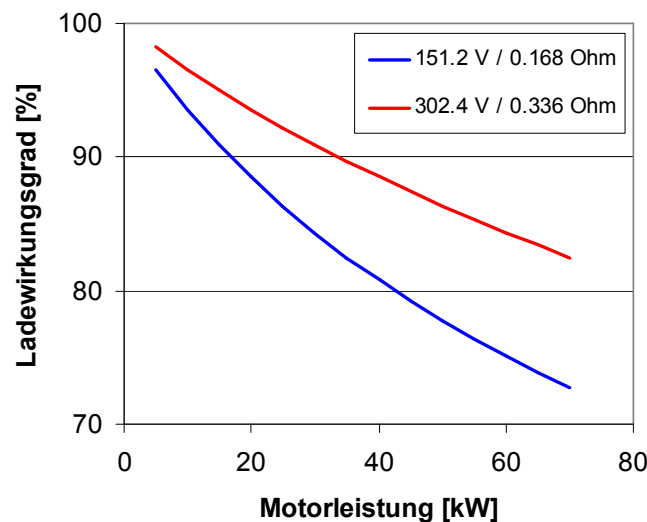


Abbildung 59: Ladewirkungsgrad in Abhängigkeit der Motorleistung bei zwei verschiedenen Klemmspannungen und Innenwiderständen.

Der Ladestrom (I_{Lade}) wird im Modell aus der abgefragten Elektromotorleistung (P_{Emot}) und dem Ladezustand (SOC) ermittelt. U_0 ist als Funktion von SOC dargestellt.

7.1.5 Beschreibung der Batteriestrategie (Hybridstrategie)

Die Regelstrategie im PHEM [Schmitzberger 2007, S66f] wurde entwickelt um geringste Verbrauchswerte zu realisieren und basiert auf einer Wirkungsgradbezogenen Regelung. Die jeweils eingesparte bzw. aufgewendete Kraftstoffmenge die für assistieren und generieren benötigt wird ist dabei maßgebend. Es wird im Fahrzyklus ein sekundlicher Wirkungsgrad (Eta_{el}) berechnet, der die elektrische Leistung auf die Kraftstoffmenge bezieht.

Für das Assistieren wird die aufgewendete elektrische Leistung auf die eingesparte Kraftstoffmenge (umgerechnet auf kW) bezogen (Formel 15):

Formel 15: Wirkungsgrad für Verbrauchsregelung beim Assistieren

$$\text{Eta}_{\text{el}_{\text{assistieren}}} = \frac{\text{aufgewendete elektrische Leistung [kW]}}{\text{eingesparte Kraftstoffmenge [kg/h]}}$$

Im Modus generieren wird die gewonnene elektrische Leistung (P_{eBat}) auf die eingesetzte bzw. aufgewendete Kraftstoffmenge bezogen (Formel 16):

Formel 16: Wirkungsgrad für Verbrauchsregelung beim Generieren

$$\text{Eta}_{\text{el}_{\text{generieren}}} = \frac{\text{gewonnene elektrische Leistung [kW]}}{\text{aufgewendete Kraftstoffmenge [kg/h]}}$$

Unter der Voraussetzung, dass über einen gesamten Testzyklus die entnommene Energie gleich der gespeicherten Energie sein soll, wurden die sekundlich berechneten Ergebnisse des Wirkungsgrades sortiert und über die kumulierte Batteriearbeit aufgetragen. Die so erhaltenen Kurven (Abbildung 60) für Assistieren und Generieren wurden unter der Annahme, dass alle Punkte links vom Schnittpunkt optimal für Generieren bzw. Assistieren sind, geschnitten. Für Assistieren sind in diesem Beispiel also Werte für $\text{Eta}_{\text{el}_{\text{assistieren}}}$ kleiner 5,4 und für Generieren $\text{Eta}_{\text{el}_{\text{generieren}}}$ größer 5,4 optimal, mit dem $\text{Eta}_{\text{el}_{\text{Schnittpunkt}}}$ von ca. 5,4.

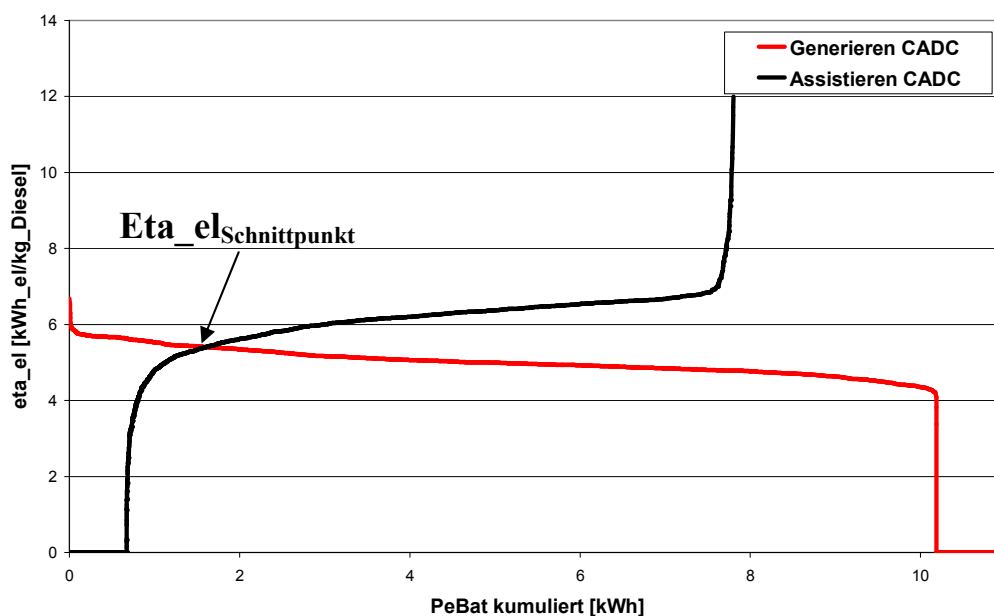


Abbildung 60: Schnittpunkt der Verbrauchswirkungsgradkurven

Mit dem Wert für $\text{Eta_el}_{\text{Schnittpunkt}}$ kann für die Regelung im PHEM eine Grenzkurve für den Wirkungsgrad der Verbrauchsregelung zwischen den SOC Grenzwerten erstellt werden. (Abbildung 61)

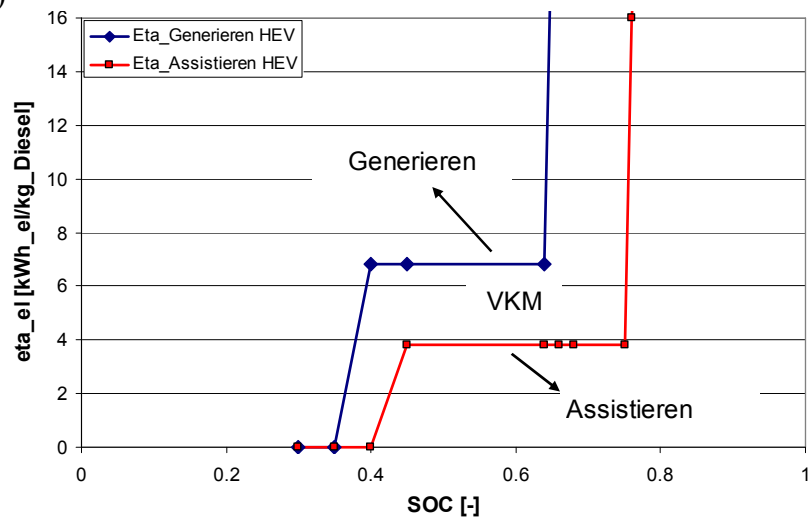


Abbildung 61: TUG-Eta_{el}-Kennfeld für HEV

Diese Grenzkurve sieht einen Bereich für reines Generieren oberhalb von der Grenzlinie für $\text{Eta_el}_{\text{generieren}}$ und einen Bereich für Assistieren unterhalb der Grenzlinie für $\text{Eta_el}_{\text{assistieren}}$ vor. Dazwischen befindet sich ein Bereich in dem nur mit dem VKM angetrieben wird.

Bei niedrigen SOC Werten wird durch die Regelstrategie eher elektrische Leistung generiert, als bei hohen SOC Werten und es wird bei niedrigen SOC Werten nur in Punkten mit absolut besten Wirkungsgraden (also hohem Einsparpotential) assistiert. Bei hohen SOC Werten kann auch bei nicht optimalem Eta_el assistiert werden.

Eine gute Strategie verlangt horizontale Grenzlinien die nicht zu nahe beisammen oder direkt im Schnittpunkt liegen. Die daraus möglichen ständigen Wechsel zw. Generieren und Assistieren mit dem zugehörigen Energieumwandlungen und deren Verluste hätten negative Auswirkungen auf die Verbrauchseinsparung und wären speziell für das Fahrverhalten unbrauchbar.

Eine optimierte Betriebsstrategiefindung bzgl. Verbrauchsminimierung wurde durch mehrere iterative Versuche am CADC Gesamtzyklus mit dem Mittelklasse-Hybrid-Fahrzeug ermittelt. Niedrige SOC Bereiche mit einem speziellen Stadtzyklus sowie die CADC Teilzyklen (urban – road – motorway) wurden nicht optimiert. Als Batteriegröße für diese Optimierungsversuche wurde 1 kWh herangezogen. Weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die SOC Start Eingabe, da sie direkt Rückwirkung auf die Strategiewahl hat. Durch die Vorgehensweise SOC Start und Ende über den Zyklus konstant zu halten (Delta maximal: 0,002) für eine korrekte energetische Beurteilung, ändert sich SOC Start für unterschiedliche Batteriegrößen bei HEV.

Betriebsstrategie für PHEV, PHEV-RE und BEV

Um ein PHEV realitätsgetreu zu simulieren, sollte das an der Steckdose geladene Fahrzeug bis zu einem vorgegebenen minimalen SOC Wert rein elektrisch fahren und danach wieder die Hybridstrategie verwenden. Dazu wurde das TUG-Eta_{el}-Kennfeld durch eine Verschiebung der Grenzlinien nach links angepasst (Abbildung 62). Der Assistierbereich wird somit vergrößert bis die Strategie wieder zu tragen kommt. Eine Optimierung der PHEV Strategie ist in dieser Arbeit iterativ erfolgt und könnte weiter verbessert bzw. automatisiert werden.

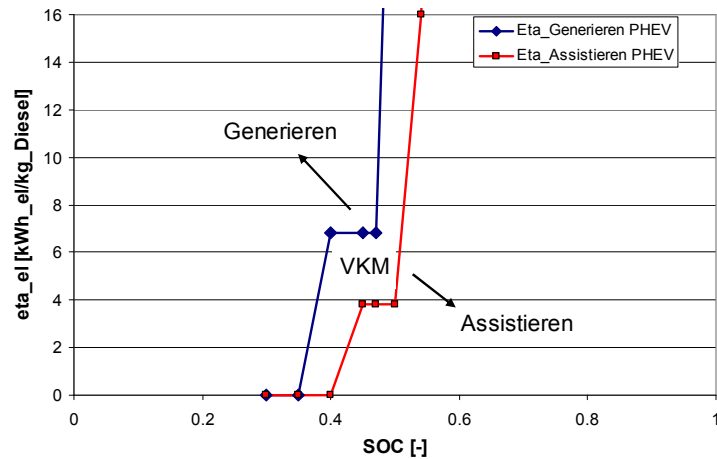


Abbildung 62: TUG-Eta_{el}-Kennfeld für PHEV

Durch den Wechsel vom Batterietyp beim PHEV-RE, kann ein größerer SOC-Bereich genutzt werden. Aus diesem Grund erfolgt eine weitere Aufweitung des Assistierbereiches. (Abbildung 63)

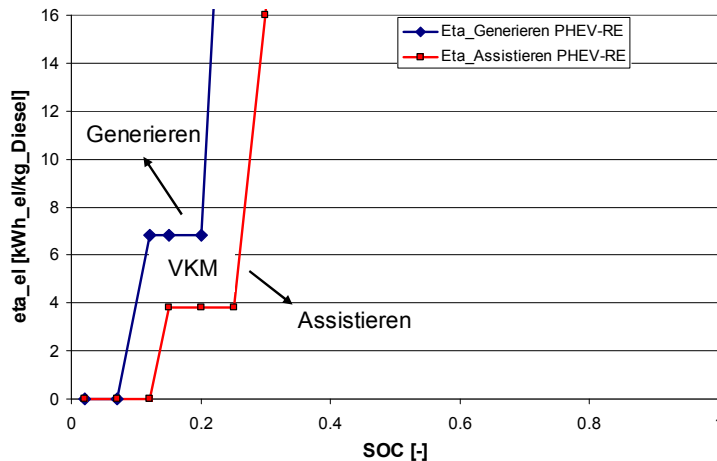


Abbildung 63: TUG-Eta_{el}-Kennfeld für PHEV-RE

Für die BEV Strategie ist der Assistierbereich und die Leistung des Elektromotors so groß, dass kein VKM-Betrieb erreicht wird und die Simulation im rein elektrischen Betrieb bis zu einem SOC von 0,1% möglich wird. (Abbildung 64)

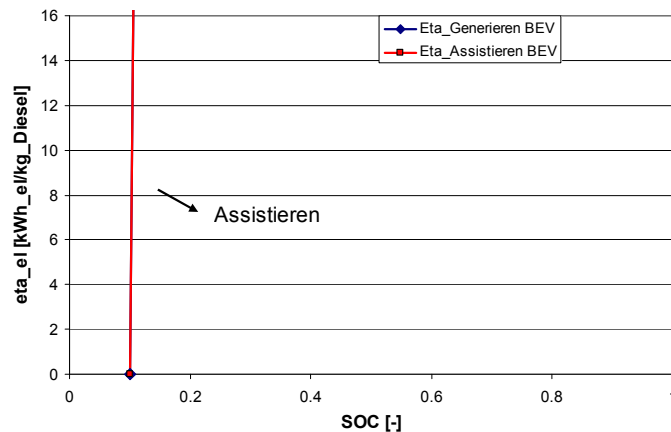


Abbildung 64: TUG-Eta_{el}-Kennfeld für BEV

Eine automatisierte Strategiefindung ist im PHEM noch nicht möglich.

Exemplarisch soll gezeigt werden, wie eine simulierte Fahrt mit z.B. einem Hybridfahrzeug oder PHEV nach der Aufbereitung im Excel dargestellt werden kann. Es werden Geschwindigkeitsverlauf, VKM- und Elektromotorleistung sowie der SOC zeitlich aufgetragen. (Abbildung 65 und Abbildung 66)

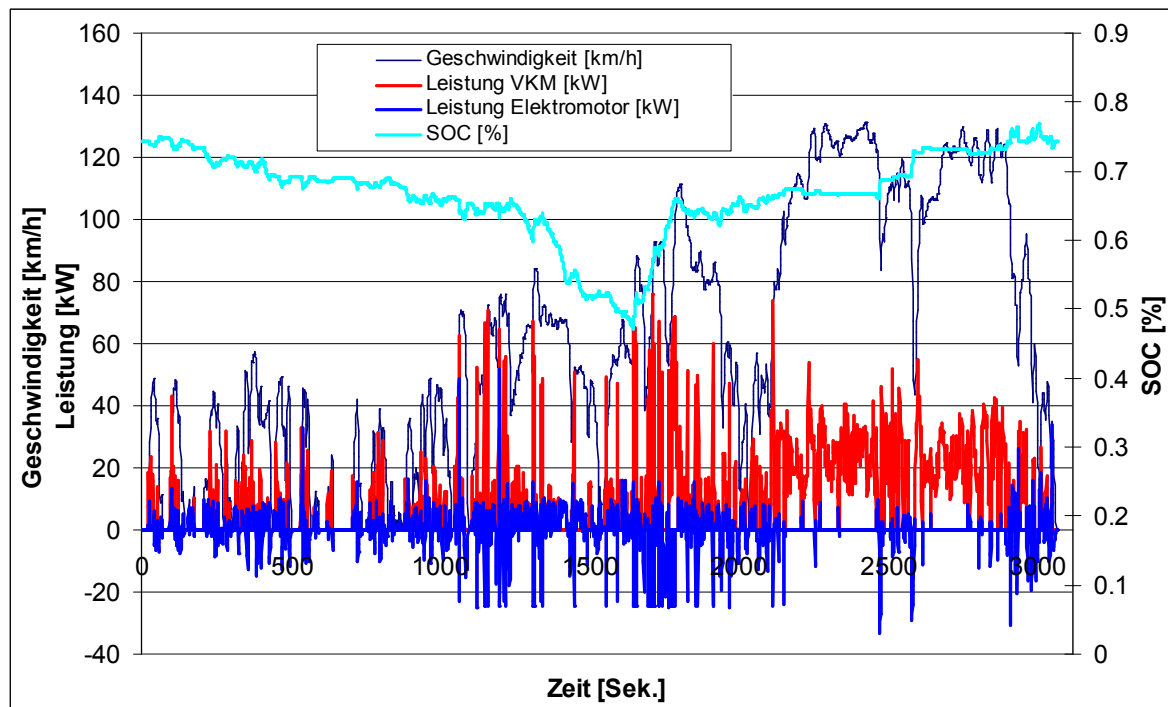


Abbildung 65: Hybrid Mittelklassefahrzeug simuliert im CAD/C

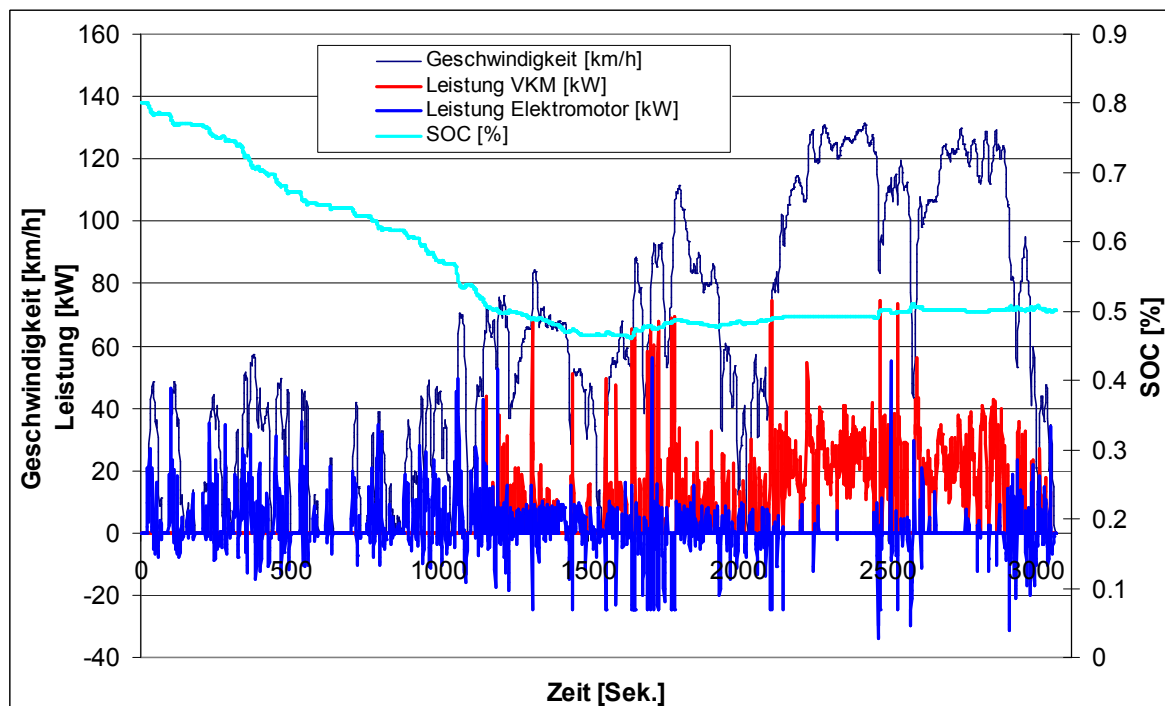


Abbildung 66: PHEV Mittelklassefahrzeug simuliert im CAD/C

7.1.6 Vergleichsergebnis am Rollenprüfstand

Als Referenzfahrzeug zur Überprüfung der Simulationsgenauigkeit werden die Werte eines am Rollenprüfstand gemessenen VW Golf V GT TDI 125 kW im CADC herangezogen. In Tabelle 3 werden die Emissionen für die einzelnen CADC Abschnitte und den CADC gesamt dargestellt und mit den simulierten Werten verglichen.

Tabelle 3: Messergebnisse Rollenprüfstand und PHEM Simulationsergebnisse eines VW Golf V GT TDI 125 kW im CADC

Zyklus [Text]	Fahrzeug [Text]	Kraft- stoff [Text]	Masse [kg]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [g/km]	PM [g/km]	Verbrauch [l/100km]
CADC urban	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	220.228	0.002	0.018	0.971	0.00049	8.310
CADC road	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	128.678	0.002	0.004	0.588	0.00056	4.856
CADC motorway	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	154.506	0.002	0.001	1.146	0.00076	5.830
CADC gesamt	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	151.584	0.002	0.004	0.923	0.001	5.720

Vergleichswerte mit PHEM simuliert

Zyklus [Text]	Fahrzeug [Text]	Kraft- stoff [Text]	Masse [kg]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [g/km]	PM [g/km]	Verbrauch [l/100km]
CADC urban	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	217.519	0.00765	0.0142	0.91217	0.0006464	8.208
CADC road	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	128.901	0.00253	0.005	0.6214	0.0006188	4.864
CADC motorway	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	151.270	0.00179	0.0026	1.10512	0.0007146	5.708
CADC gesamt	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	149.672	0.003	0.005	0.908	0.001	5.648

Abweichung der Simulation zur Messung am Rollenprüfstand in [%]

CADC urban	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	-1.2	254.1	-20.3	-6.0	30.9	-1.2
CADC road	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	0.2	11.7	20.4	5.7	11.1	0.2
CADC motorway	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	-2.1	-6.6	83.3	-3.5	-5.5	-2.1
CADC gesamt	VW Golf VGT TDI 125 kW	Diesel	1438	-1.3	27.9	14.4	-1.6	2.4	-1.3

Die Abweichungen der Messergebnisse im unteren Teil der Tabelle 3 zeigen wie die Simulation mit PHEM zu den Ergebnissen des Rollenprüfstands prozentuell übereinstimmen. Bei den CO₂ Emissionen ergibt sich eine Abweichung kleiner 2,1% bei den Einzelzyklen. Im *CADC gesamt* ist die Abweichung der Werte bei CO₂ Emissionen 1,3%. CO, HC und Partikel Emissionen sind in ihrem Absolutwert sehr gering, sodass bei z.B. geringen Messungenauigkeiten die Abweichungen in % ausgedrückt höher sind. Die hohe Abweichung bei CO im *CADC urban* kann auf schwierige Abstimmung bei Abgasrückführung und Turboladung zurückgeführt werden, die aber im *CADC gesamt* geglättet wird. Ihrem niedrigen Niveau entsprechend sind die Komponenten CO, HC und Partikel in den Ergebnissen zu interpretieren. Die Abweichung bei NO_x schwankt von 5,7 bis -6%, wird aber im *CADC gesamt* gemittelt auf 1,6% Abweichung.

Für die Simulation in dieser Arbeit wurde immer der CADC gesamt herangezogen. Dadurch gleichen sich diverse positive und negative Abweichungen aus und führen zu einem – auf den km bezogenen – Durchschnittsergebnis. Bei den Vergleichen zu den Simulationsergebnissen ist darauf zu achten, dass der *CADC motorway* durch die höheren Geschwindigkeiten auch am meisten Kilometer beinhaltet.

7.1.7 GEMIS

Das Computerprogramm GEMIS (Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme) wurde als Instrument zur vergleichenden Untersuchung von Umwelteffekten der Energiebereitstellung und -nutzung von Öko-Institut e.V. Freiburg/BRD und Gesamthochschule Kassel (GhK) in den Jahren 1987-1989 entwickelt und seitdem kontinuierlich fortentwickelt und aktualisiert. GEMIS wird angewendet zur Analyse von Umwelt- und Kostenaspekten bei Energie-, Stoff- und Transportsystemen.

GEMIS-Österreich wurde mit der Unterstützung des Lebensministeriums und des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Kultur erstellt und wird durch diese für österreichische Daten aktualisiert.

Daten aus GEMIS werden in der Arbeit zur Erweiterung und Interpretation der Simulationsergebnisse verwendet. Diese Daten wurden extern berechnet.

7.2 Beschreibung der simulierten Fahrzeuge

Bei der Wahl der Fahrzeugkategorien wurde eine Matrix gesucht die eine Technologieentwicklung durch die Elektrifizierung und eine ökologische Entwicklung abdeckt. (Abbildung 67)

Dabei wird versucht vom „derzeit gängigen“ Bild eines Personenkraftwagens auszugehen und eine ökologische Entwicklung zeitlich vorzuzeichnen, welche ihren Ursprung in dem oben dargelegten CO₂ freien Mobilitätsbewusstsein hat. Die Matrix dient einzig der genauen Argumentation der Simulationsergebnisse und soll nicht als Zukunftsszenario einer Entwicklung die schrittweise geschehen muss gesehen werden. Denn Produzenten und mobile Individuen leben durchaus heute schon ökologisch nachhaltige Lösungen in der Praxis.

Elektrifizierung →

		VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid-RE	Elektroauto
ökologische Entwicklung ↓	Mittelklassewagen					
	Kleinwagen					
	"Greenwagen"					

Abbildung 67: Übersichtsmatrix der Fahrzeugkategorien

Jede ökologische Kategorie beinhaltet mehrere Fahrzeuge. Vom PKW mit Verbrennungsmotor über den Hybrid, Plug-In-Hybrid, Plug-In-Hybrid mit Range-Extender bis hin zum Elektroauto wird die Elektrifizierung vorangetrieben.

Für jede ökologische Kategorie gibt es ein oder mehrere Vergleichsfahrzeuge aus der Praxis an denen sich die Werte für die genaue Simulationsmatrix orientieren. Die jeweilige Begründung für die Wahl der Werte einzelner Fahrzeugkonzepte werden in diesem Kapitel sukzessive erarbeitet.

Im Folgenden wird jede ökologische Entwicklungsstufe im Detail beschrieben, wobei einige ausführliche Erläuterungen die für das Verständnis notwendig sind, nur in der ersten Kategorie detailliert angeführt sind.

7.2.1 Mittelklassewagen

Bei den Mittelklassewagen wird von einem VW Golf 103 kW als Vergleichsfahrzeug ausgegangen und dieses durch diverse Abänderungen elektrifiziert bis hin zum Elektrofahrzeug. Das heißt dieses Ausgangsfahrzeug mit VKM wird durch den Austausch relevanter Antriebskomponenten technologisch verändert (elektrifiziert), ohne dabei die Fahrzeugkonzeptidee eines Mittelklassewagens zu verlassen.

Ein Teil der Fahrzeugdaten der Mittelklassewagen ist in Tabelle 4 (verkürzte Übersicht) dargestellt. Alle für die Simulation im PHEM relevanten Daten, können im Anhang 1 nachgelesen werden.

Tabelle 4: Fahrzeugkategoriedaten der Mittelklassewagen

Fahrzeugbezeichnung	Mittelklassewagen					Vergleichs-FZ
	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV	VW Golf 103kW
Type	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	VKM
Fahrzeugmasse [kg]	1300	1317	1342	1368	1378	1299
Luftwiderstandswert Cw [-]	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Querschnittsfläche [m²]	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22
Verbrennungskraftmotor	diesel	diesel	diesel	diesel		diesel
VKM Nennleistung [kW]	103	76	76	53		103
Elektromotor						
Typ		ASM	ASM	ASM	ASM	
Nennleistung [kW]		27	27	50	76	
Max. Leistung [kW]		54 (10Sek)	54 (10Sek)	100 (10Sek)	152 (10Sek)	
Batterie						
Typ der Li-Ion Batterie (Saft)		VL12 V	VL12 V	VL 45 E	VL 45 E	
Zellen -Dauerleistung [W]		1500	1500	664	664	
Zellenanzahl		14	60	68	136	
Kapazität [kWh]		1.036	4.440	10.132	20.264	
Zellen-Leerlaufspannung [V]		3.65	3.65	3.60	3.60	

Gewicht

Lt. [Hofer 2006] liegen die Leistungsgewichte verschiedener Antriebe bei folgenden Größenordnungen:

- schnelllaufender Elektroantrieb ~ 2kg/kW
- Asynchronmaschinen mit 1,7kg/kW
- Verbrennungskraftmotoren ~ 5kg/kW

Diese wurden an der TU-Graz überprüft und als Größenordnung festgelegt auf:

- Moderner Verbrennungskraftmotor mit ~ 1,5kg/kW
- Moderner Elektromotor für den Traktionsantrieb mit ~ 2kg/kW

Der gesamte Abgasnachbehandlungsstrang wird mit einem Gewicht von ~ 20kg abgeschätzt und mit Batteriegewicht, dem Gewicht von Leistungselektronik und Tankinhalt bei der Gewichtsrechnung berücksichtigt. Somit ergeben sich für die Gewichtsvariationen als Abschätzung folgende in Tabelle 5 dargestellten Werte:

Tabelle 5: Gewichtskalkulation der Konzepte

Fahrzeugbezeichnung	Mittelklassewagen				
	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV
Type	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto
Anzahl der Sitzplätze	5				
Fahrzeugmasse [kg]	1300	1317	1342	1368	1378
Beladung [kg]	0	0	0	0	0
max. Zuladung [kg]	600	583	558	532	522
Zulässiges Gesamtgewicht [kg]	1900	1900	1900	1900	1900
VKM Nennleistung [kW]	103	76	76	53	
Emot Nennleistung [kW]		27	27	50	76
Gewicht VKM [kg]	154.5	114	114	79.5	0
Gewicht Emot [kg]	0	54	54	100	152
Abgasnachbehandlung [kg]		-5	-5	-10	-20
Batterie-Gesamtgewicht [kg]		8.96	38.40	72.76	145.52
Leistungselektronik [kg]		5	5	5	5
Tankinhalt + Tank [kg]	50	45	40	25	
Zusatzgewicht Gesamt		17	42	68	78

Verbrennungskraftmotor

Die Leistung des VKM wird bei fortschreitender Elektrifizierung verkleinert. Als Begründung dient die zusätzlich vorhandene Leistung des Elektromotors, womit in Summe eine Leistung von 103 kW dauerhaft zur Verfügung steht. Bei Überlastung des Elektromotors auch mehr.

Bei einer Veränderung des Motors müsste in PHEM eine Veränderung der motorspezifischen Emissionsdaten erfolgen. Diese Motorkennfelder stehen für diese neuen Motoren nicht zur Verfügung. In den Motorkennfeldern werden sämtliche Verbrauchsdaten in [g/h] auf die Nennleistung bezogen [(g/h)/kW_Nennleistung], was eine Veränderung der Nennleistung leicht möglich macht. Emissionen werden im Kennfeld in [g/h] angegeben. Aus diesem Grund werden sämtliche Emissionsdaten des bekannten Motors auf die entsprechende Nennleistung mit

Formel 17: Skalierung der Emissionen im Kennfeld auf die Nennleistung

$$g/h_{\text{neu}} = g/h_{\text{alt}} * kW_{\text{neu}} / kW_{\text{alt}}$$

skaliert, was konstante g/kWh in den einzelnen Kennfeldpunkten ergibt. Alle VKM sind mit Partikelfilter ausgerüstet.

Elektromotor

Bei der Leistungsveränderung der Elektromotoren wird gleich vorgegangen wie beim VKM. Die Veränderung der Leistung begründet sich ebenfalls im Elektrifizierungsgrad, mit einem Mehr an notwendiger Elektromotorleistung bis hin zur maximalen Leistung beim EV.

Die Nennleistung wird ergänzt durch eine Eingabe der maximalen Leistung die für die Simulationen mit großer Sicherheit bzgl. Überlastung bei 10 Sekunden angenommen wird. Für das BEV wird von der Dauerleistung eines HEV ausgegangen also 76kW Nennleistung, wobei auch hier eine maximale Leistung von 152kW kurzzeitig zur Verfügung steht.

Die Auslegung bei HEV, PHEV und PHEV-RE ist nach der für die Rückgewinnung der Rekuperationsenergien notwendigen Leistung erfolgt. Diese kann bei Nutzung der maximalen Leistung ebenfalls niedriger als die im Zyklus auftretenden Leistungen angenommen werden.

Batterie

Bei HEV und PHEV wurde eine leistungsstarke Li-Ionen Batterie (Kategorie VLV) ausgewählt, für PHEV-RE und BEV ist die spezifische Energie (Kategorie VLE) von größerer Bedeutung. (Abbildung 68)

Diese Differenzierung muss nicht nur für die simulierten Konzepte beachtet, sondern muss v.a. im Sprachgebrauch bei batteriespezifischen Angaben, je nach Elektrifizierungsgrad deutlich getrennt werden. Davon sind u.a. wie oben bereits erläutert die Kostenangaben betroffen.

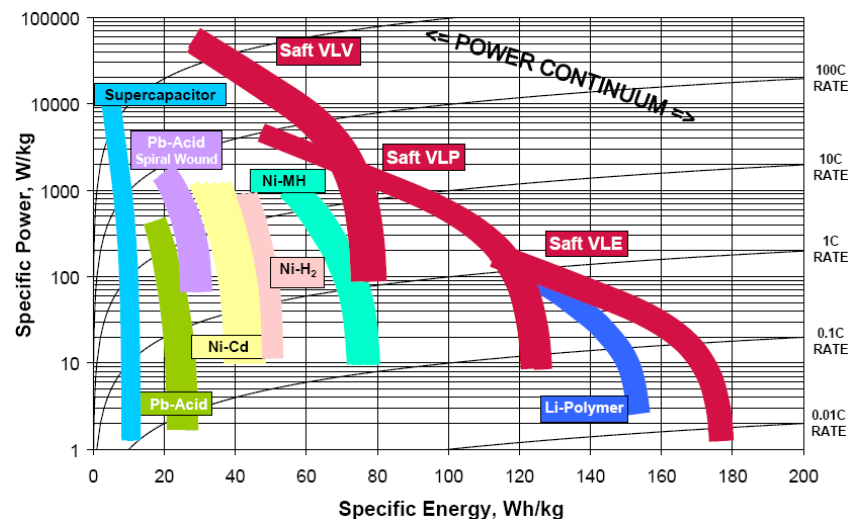


Abbildung 68: Specific power and specific energy of rechargeable cells [Saft 2009]

Bei allen Batterien sind sämtliche Zellen in Serie geschaltet. Die mittlere Spannung von 500V wurde nicht überschritten. Sollten zu hohe Spannungen problematisch werden, muss parallel geschaltet werden. Zu beachten ist, dass sich der Gesamtwiderstand von parallel geschalteten Widerständen mit gleichem Widerstandswert mit

Formel 18: Widerstand einer Parallelschaltung

$R_{\text{ges}} = \text{Widerstand} / \text{Anzahl der parallelgeschalteten Widerstände}$
errechnet.

Die Spannung ist für jeden Teilzweig identisch und errechnet sich für in Serie geschaltete Zellen mit:

Formel 19: Spannungsberechnung einer Parallelschaltung

$U = (\text{Anzahl der Zellen} * \text{Zellenspannung}) / \text{Anzahl der Teilzweige der Parallelschaltung}$.

Die vollständigen Datenblätter der gewählten Li-Ionen Batterie befindet sich im Anhang 5.

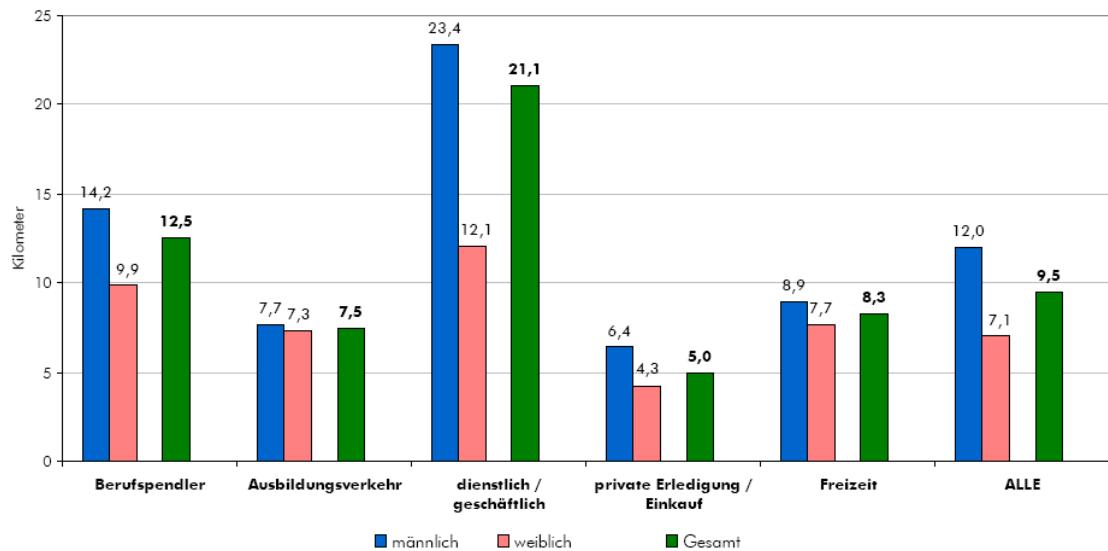
Festlegung der Reichweiten und Batteriekapazität

Die durchschnittliche Tagesweglänge für Österreich ist 28,5km [BMVIT 2007], wobei die durchschnittliche Weglänge (für Männer und Frauen gemittelt) bei deutlich niedrigeren Werten um die 9,5km liegt. In Abbildung 69 zeigt eine Grafik, dass nur berufliche Wege über dem Durchschnittswert liegen und weibliche Verkehrsteilnehmer in der Regel geringere durchschnittliche Weglängen aufweisen. Ab 1-2,5km hat der motorisierte Individualverkehr den größten Anteil am benutzten Verkehrsmittel. (Abbildung 70)

Aus [Herry/Sammer 1998] kann festgestellt werden, dass etwa 75% der Wege kürzer als 10km sind. Bereits 99% aller Wege sind kürzer als 100km.

Entscheidend ist jedoch die Fahrleistung, welche in [Brauner 2008] mit 80% kumulierte Fahrleistung bis 100km Fahrtlänge entnommen werden kann. 80% der Wege werden hier kürzer als 17km angegeben. (Abbildung 71)

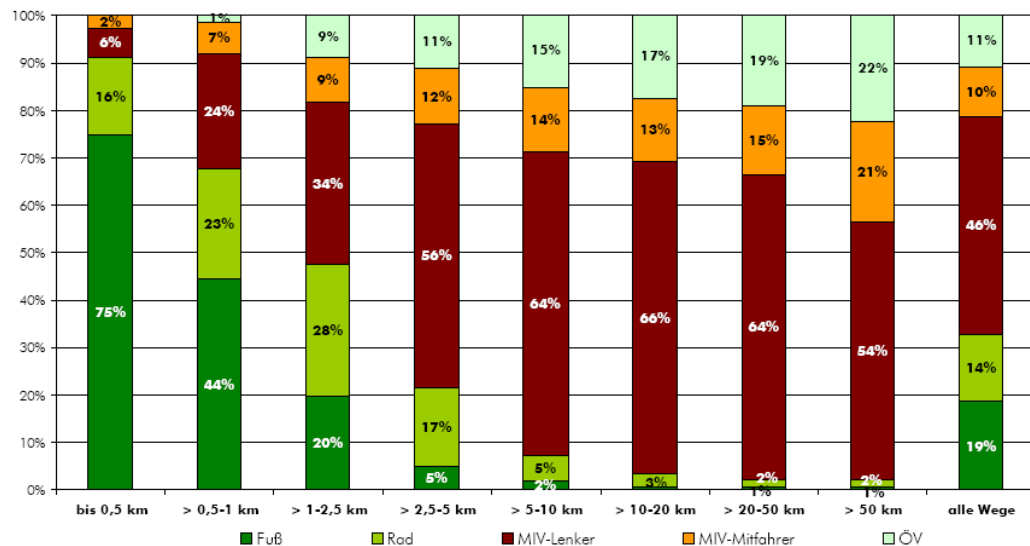
Für Deutschland gilt lt. [Pehnt 2007] das an 80% der Tage im Jahr weniger als 40km zurückgelegt werden. Diese Strecke macht in Summe mehr als die Hälfte der jährlichen Fahrleistung aus.



Quelle: Herry/Sammer, Bundesverkehrswegeplan 1995. Im Auftrag des BMWV

HERRY 2000

Abbildung 69: Durchschnittliche Weglänge in [km] nach Wegzweck und Geschlecht [BMVIT 2007]



Quelle: HERRY Consult, Mobilitätsbefragung Vorarlberg 2003. Im Auftrag der Vorarlberger Landesregierung

HERRY 2006

Abbildung 70: Weglänge in Klassen nach hauptsächlich benutztem Verkehrsmittel am Beispiel Vorarlberg 2003 [BMVIT 2007]

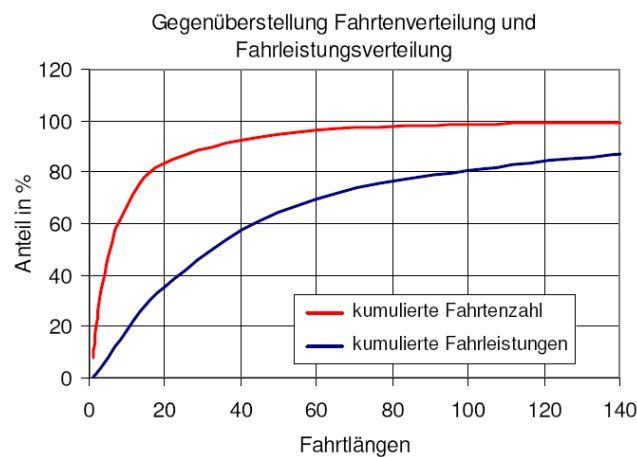


Abbildung 71: Gegenüberstellung Fahrtlängenverteilung und Fahrleistungsverteilung [Brauner 2008]

Die Kapazität wird bei HEV mit einer üblichen Speicherkapazität von 1kWh festgelegt, die v.a. reicht um die Rekuperationsenergien zu speichern. Ein PHEV könnte bei voller Entladung eine Reichweite von etwa 20km erreichen, der PHEV-RE von etwa 50km und das Elektrofahrzeug von 100km.

Durch den nutzbaren Hub werden diese Reichweiten aus Gründen der Batteriebensdauer auf 8km für den PHEV, 40 für den PHEV-RE und 80km für das Elektrofahrzeug limitiert.

Die Fahrzeuge können also einen Großteil aller Fahrten elektrisch zurücklegen. Die Reichweite eines Elektrofahrzeuges konkurriert, wie oben bereits erläutert, nicht mit der Reichweite eines PKW-VKM. Der ökologische Gedanke ist für eine zukunftsfähige Mobilität und die Wahl der Reichweiten entscheidend. Durch eine verbesserte Schnittstelle zum Öffentlichen Verkehr bleiben alle „Mobilitätsbedürfnisse“ möglich. Wie sich dieses „Mobilitätsbedürfnis“ vom Bedarf unterscheidet wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

Sonstige Daten

Alle weiteren Daten wurden für eine gute Vergleichbarkeit konstant gehalten bzw. vom Vergleichsfahrzeug übernommen.

7.2.2 Kleinwagen

Für die Kategorie der Kleinwagen wird von einem Audi A2 1,2l TDI als Vergleichsfahrzeug ausgegangen und dieses durch diverse Abänderungen elektrifiziert bis hin zum Elektrofahrzeug.

Ein Teil der Fahrzeugdaten der Kleinwagen ist in Tabelle 6 (verkürzte Übersicht) dargestellt. Alle für die Simulation im PHEM relevanten Daten, können im Anhang 2 nachgelesen werden.

Tabelle 6: Fahrzeugkategoriedaten der Kleinwagen

	Kleinwagen					Vergleichs-FZ
Fahrzeugbezeichnung	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV	Audi A2 1,2l TDI ²⁾
Type	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	VKM
Fahrzeugmasse [kg]	900	918	936	968	993	855
Luftwiderstandswert Cw [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Querschnittsfläche [m²]	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18
Verbrennungskraftmotor	diesel	diesel	diesel	diesel		diesel
VKM Nennleistung [kW]	45	30	30	15		45
Elektromotor						
Typ		ASM	ASM	ASM	ASM	
Nennleistung [kW]		15	15	30	30	
Max. Leistung [kW]		30 (10 Sek)	30 (10 Sek)	60 (10 Sek)	60 (10 Sek)	
Batterie						
Typ der Li-Ion Batterie (Saft)		VL12 V	VL12 V	VL 45 E	VL 45 E	
Zellen -Dauerleistung [W]		1500	1500	664	664	
Zellenanzahl		14	50	60	122	
Kapazität [kWh]		1.036	3.700	8.940	18.178	
Zellen-Leerlaufspannung [V]		3.65	3.65	3.60	3.60	

Im Folgenden wird auf Werte eingegangen deren Logik sich nicht bereits aus den Erklärungen der Mittelklassewagen ergibt.

Gewicht

Die Gewichtsberechnungen wurden analog zu den Mittelklassewagen durchgeführt. Die genaue Berechnung kann im Anhang 4 nachvollzogen werden.

Elektromotor

Die Nennleistung der Elektromotoren bei HEV und PHEV deckt nicht alle Spitzen der Rekuperationsleistung ab, diese werden aber durch die Maximalleistung erreicht.

Festlegung der Reichweiten und Batteriekapazität

Die Speicherkapazität kann unter Voraussetzung gleicher Reichweiten gegenüber den Mittelklassewagen leicht reduziert werden, was sich wiederum positiv auf das Fahrzeuggewicht auswirkt. Die Abstimmung auf gleiche Reichweiten ist insofern schwierig, da man im NEDC und CADC unterschiedliche Verbrauchsergebnisse erhält und diese Anpassung iterativ erfolgen müsste. Viele Konzeptdaten müssten jedes Mal neu erstellt werden. Aus diesen Gründen wurden die Konzepte bei folgenden Reichweiten belassen: PHEV mit ca. 6km, PHEV-RE mit ca. 36km und dem BEV mit 90km.

Eine weitere Verbrauchseinsparung wäre also bei den Kleinwagen im Vergleich zu den Mittelklassewagen möglich. Es verbleibt der zusätzliche Vorteil größerer Reichweiten für diese ökologische Kategorie.

Sonstige Daten

Alle weiteren Daten wurden für eine gute Vergleichbarkeit konstant gehalten bzw. vom Vergleichsfahrzeug übernommen.

7.2.3 Greenwagen

Der Begriff „Greenwagen“ soll treffsicher die Art der Konzeptwahl bereits begrifflich deutlich machen. Dieses Fahrzeugkonzept orientiert sich nicht nur an der technischen Machbarkeit, sondern orientiert sich an einem Preis für ein möglichst hohes Markteinführungspotential. In der so wichtigen ersten Phase einer Verbesserung im Mobilitätsbereich durch die Elektrofahrzeuge sollten diese auch verkaufbar sein. Das bedeutet, dass technische Einsparpotentiale in Zukunft weit höher sein können, wenn es gelingt der engstirnigen Wirtschaftslogik zu enttrinnen und die Ziele der Käufer und Unternehmer ganzheitlich orientiert sind. Dieses Potential wird im „optimalen“ Elektrofahrzeug (EV_opt), welches sich rein an der technischen Machbarkeit (von Herstellern bewiesen) orientiert, aufgezeigt. „Optimal“ bedeutet somit, dass für Masse, cw-Wert, Querschnittsfläche etc. technisch verwirklichte Werte der Vergleichsfahrzeuge herangezogen wurden.

Das Recht auf saubere Luft und Zukunftsfähigkeit wird stärker als das momentan gültige "Recht auf Fahrspaß" bewertet. Es wird eine Mischung aus Platz für Stauraum für den Alltagsgebrauch und einem reinen Transportmittel für die Personenbeförderung gesucht.

Die Findung eines Konzeptes orientiert sich auch am derzeitigen praktischen Verständnis von einem Fahrzeug. Für ein reines Personen-Transportmittel müsste, v.a. bei einem heutigen Besetzungsgrad von etwa 1,25, die Personenkapazität weiter reduziert und von Gewicht bis Motorleistung optimiert werden. Ein weiteres Verbrauchsverbesserungspotential könnte damit natürlich erreicht werden, diese Arbeit sieht dies jedoch nicht vor.

Der Begriff des Zweitwagens (Zweitwagenkonzept) soll an dieser Stelle noch klargestellt werden. Diese Überlegung wird in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt, wobei bei Annahme eines Greenwagens als Zweitwagen, für die Verwendung als „Erstwagen“ Bus oder Bahn aus dem Öffentlichen Verkehr oder ein für wenige Tage geborgter PKW-VKM (Carsharing) als Lösung vorgesehen wäre. Selbst für den zersiedelten Bereich (durch die Zersiedelung wurde leider seit Jahren der Automobilindustrie vorbereitend in die Hände gespielt) sind die gewählten Reichweiten ausreichend hoch, um öffentliche Verkehrsmittel erreichen zu können.

Für die Kategorie der Greenwagen wird von einem Pool an Vergleichsfahrzeugen ein PKW-VKM Ausgangsfahrzeug bestimmt und davon ausgehend durch diverse Abänderungen elektrifiziert bis hin zum Elektrofahrzeug.

Ein Teil der Fahrzeugdaten der Greenwagen ist in Tabelle 7 (verkürzte Übersicht) sowie EV_opt und die Vergleichsfahrzeuge in Tabelle 8 dargestellt. Alle für die Simulation im PHEM relevanten Daten, können im Anhang 3 nachgelesen werden.

Tabelle 7: Fahrzeugkategoriedaten der Greenwagen

	Greenwagen				
Fahrzeugbezeichnung	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV
Type	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto
Fahrzeugmasse [kg]	650	667	679	715	750
Luftwiderstandswert Cw [-]	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Querschnittsfläche [m²]	2	2	2	2	2
Verbrennungskraftmotor		diesel	diesel	diesel	
VKM Nennleistung [kW]	33	25	25	10	
Elektromotor					
Typ					
Nennleistung [kW]		12	12	23	23
Max. Leistung [kW]		24 (10 Sek)	24 (10 Sek)	46 (10 Sek)	46 (10 Sek)
Batterie					
Typ der Li-Ion Batterie (Saft)		VL12 V	VL12 V	VL 45 E	VL 45 E
Zellen -Dauerleistung [W]		1500	1500	664	664
Zellenanzahl		14	40	57	114
Kapazität [kWh]		1.036	2.960	8.493	16.986
Zellen-Leerlaufspannung [V]		3.65	3.65	3.60	3.60

Tabelle 8: Fahrzeugkategoriedaten EV_opt und Vergleichsfahrzeuge zu Greenwagen

		Vergleichsfahrzeuge			
Fahrzeugbezeichnung	BEV	Smart Fortwo	VW 1-Liter-Auto	Twingo Electrica	LOREMO-EV
Type	EV_opt ⁴⁾	VKM	VKM	BEV	BEV
Fahrzeugmasse [kg]	450	799	290	939	450 (?)
Luftwiderstandswert Cw [-]	0.2	0.36	0.159	~0.25	0.2
Querschnittsfläche [m²]	1.1			~1.8	1.1
Verbrennungskraftmotor		diesel			
VKM Nennleistung [kW]		33	6.3		
Elektromotor					
Typ				200-125W	
Nennleistung [kW]	18			15 / 50 Nm	20
Max. Leistung [kW]	36 (10 Sek)			30 (41) / 124 nm	
Batterie					
Typ der Li-Ion Batterie	Saft VL 45 E			ZEBRA Z55T-263-ML3X-76	Li-Ion
Zellen -Dauerleistung [W]	664				
Zellenanzahl	57				
Kapazität [kWh]	8.493			20.496	
Zellen-Leerlaufspannung [V]	3.60			263	

Im Folgenden wird auf Werte eingegangen deren Logik sich nicht bereits aus den Erklärungen der Mittelklasse- und Kleinwagen ergibt.

Gewicht

Die Gewichtsberechnungen wurden analog zu den Mittelklassewagen durchgeführt. Die genaue Berechnung kann im Anhang 4 nachvollzogen werden.

Für das EV_opt wurden die Werte von den Vergleichsfahrzeugen übernommen und nicht berechnet.

Elektromotor

Die Nennleistung der Elektromotoren bei HEV und PHEV deckt nicht alle Spitzen der Rekuperationsleistung ab, diese werden aber durch die Maximalleistung erreicht.

Festlegung der Reichweiten und Batteriekapazität

Mit analoger Vorgehensweise wie bei den Kleinwagen können mit den Greenwagen folgende elektrische Reichweiten erreicht werden: PHEV ca. 6km, PHEV-RE ca. 46km und dem BEV 102km.

Eine weitere Verbrauchseinsparung wäre also auch bei den Greenwagen im Vergleich zu den Mittelklassewagen möglich. Es verbleibt der zusätzliche Vorteil größerer Reichweiten für diese ökologische Kategorie.

Sonstige Daten

Alle weiteren Daten wurden für eine gute Vergleichbarkeit konstant gehalten bzw. vom Vergleichsfahrzeug übernommen.

Die Größenordnung der gewählten Werte für die Konzepte werden aus der Literatur bestätigt:

c_w-Wert

Eine kurzfristige Verbesserung des c_w-Wertes auf 0,2 wird für erzielbar gehalten. Dies bestätigt L22 der Loremo Automotive GmbH mit einem Luftwiderstandsbeiwert von 0,19. Großes Potential birgt der Fahrzeugboden auf den etwa 40% des Luftwiderstandes fallen. Als realisierbares Minimum wird bei optimierten Oberflächenmaterialien 0,1 oder weniger angegeben. [Dauensteiner 2002]

Querschnittsfläche

Frontflächen können im ersten Schritt ohne Einbußen an Raum und Bequemlichkeit von derzeit typischen 2,3m² leicht auf 1,9m² gesenkt werden. Der L22 der Loremo Automotive GmbH gibt hier mit seinen angepeilten 1,1 m² die möglichen Entwicklungsziele vor. [Dauensteiner 2002]

Rollwiderstand

Entscheidend ist hier die direkte Proportionalität zum Fahrzeuggewicht. Das Verbesserungspotential in diesem Bereich durch Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen etc. wird als sehr hoch eingeschätzt. Durch Gewichtsabnahme kann die sg. „Abwärtsspirale“ eine sekundäre Reduktion bis zu 50% der primären Gewichtseinsparung bewirken. Damit ist eine kleinere Dimensionierung anderer Baugruppen, wie Achsen, Rahmenkonstruktion, Bremsen, Motorisierung etc. gemeint, die zu weiteren Gewichtseinsparungen führen.

Der Rollwiderstandsbeiwert selbst liegt bei Radialreifen bei ca. $r_0 = 0,007 - 0,01$. Als untere Grenze kann r_0 derzeit mit ca. 0,005 angenommen werden. [Dauensteiner 2002].

7.3 Kostenabschätzung der Fahrzeugkategorien

Die Fahrzeugkonzepte wurden einer Kostenabschätzung unterzogen für eine Lebensdauer von 20 Jahren und einer Fahrleistung von 200.000km.

Dabei wurde der Ausgangspreis für das Fahrzeug mit VKM jeder ökologischen Kategorie festgelegt (orientiert an den Vergleichsfahrzeugen). Durch diverse Änderungen mit steigendem Elektrifizierungsgrad wurde dieser Ausgangspreis abgeändert und die Betriebskosten (ohne Wartungskosten und eventuellen Gebührenbefreiungen) eingerechnet.

Die Betriebskosten beziehen sich auf den simulierten Verbrauch der Fahrzeugkonzepte. Da Versicherungskosten auch aus zahlreichen Faktoren, die sich nicht auf das Fahrzeugkonzept beziehen berechnet werden, wird hier eine Abschätzung bezogen auf einen einheitlichen Nutzer und einheitliche Bonusstufe durchgeführt. Haftpflichtversicherung und motorbezogene Versicherungssteuer wurden mit [VAV 2009] für die verwendeten Motorleistungen berechnet. Für PHEV und PHEV-RE steht eine geringere Motorleistung im jeweiligen Fahrbetrieb zur Verfügung. Aus diesem Grund wird eine geringe Steuerbefreiung der Elektromotorleistung berücksichtigt (eigene Abschätzung).

In Österreich bekommen Alternativantriebe einen Bonus von 500 Euro, es fällt keine Kfz-Steuer und keine Nova (erhöhte Steuer für Neuwagen) an, was sich durch den Wegfall der motorbezogenen Versicherungssteuer besonders bei den laufenden Kosten auswirkt. Zusätzlich gibt es noch Förderungen in einigen Bundesländern und Gemeinden mit einem lenkenden Steuersatz für ökologische Fahrzeuge. Dieser lenkende Steuersatz wurde hier mit 1000€ für PHEV-RE und 2000€ für ein Elektrofahrzeug angenommen um die höheren Anschaffungskosten zu entlasten.

In Tabelle 9 wird exemplarisch die Berechnung für Mittelklassewagen dargestellt. Die Berechnungen für alle Konzepte befinden sich im Anhang 7.

Tabelle 9: Kostenabschätzung der Mittelklassewagen in [€]

Fahrzeugbezeichnung Type	Mittelklassewagen				
	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV
Fahrzeugkosten [€]	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto
	24000				
Batteriekapazität [kWh]		1.036	4.44	10.132	20.264
Batteriekosten (500 € / kWh)		518	2220	5066	10132
Emot, LE, Steuerung ect.(Schätzung) [€]		2500	2500	2500	2500
VKM Kosten (Schätzung) [€]			-500	-1000	-2000
Zusatzkosten pro Fahrzeug	0	3018	4220	6566	10632
Verbrauch VKM [l / 100 km]	4.86	3.92	3.29	1.39	0.00
Verbrauch Elektrisch [kWh/100 km]			2.64	12.96	20.42
Kraftstoffkosten (1€/Liter) [€/km]	0.049	0.039	0.033	0.014	0.000
Stromkosten (0.20€/kWh) [€/km]	0.000	0.000	0.005	0.026	0.041
Kraftstoffkosten für 200000km [€]	9730	7834	7642	7973	8169
Versicherungskosten für 20 Jahre [€]	17660	17660	12520	11060	5800
Staatliche Prämie [€]		500	500	1000	2000
Betriebskosten pro Lebensdauer [€]	27390	25494	20162	19033	13969
Fahrzeugkosten pro Lebensdauer [€]	51390	52012	47882	48599	46601

Das Ergebnis der Mittelklassewagen zeigt, dass bei steigendem Elektrifizierungsgrad auch die Kosten in der Fahrzeuganschaffung steigen. Durch die niedrigeren Betriebskosten und geringere steuerliche Belastung sinken die Kosten ab dem Hybrid wieder und können bereits mit geringen staatlichen Prämien für die gesamte Lebensdauer preislich attraktiver gestaltet werden.

8 Ergebnisse der Simulation

Die Simulationsergebnisse werden hier für Verbrauch und die einzelnen Emissionskomponenten grafisch dargestellt und interpretiert. Die Verbrauchs- und Emissionswerte beziehen sich auf die Summe aus Treibstoff und Strom. Die Ergebnisse werden jeweils für NEDC und CADC in allen Fahrzeugkategorien vergleichend dargestellt. Einzelwerte können in den Ergebnislisten im Anhang 6 gefunden werden.

Die anteiligen Kraftwerksemissionen durch den Stromverbrauch werden in der Simulation durch GEMIS Daten [GEMIS 2007] berücksichtigt und vorweg in Tabelle 10 übersichtlich festgehalten:

Tabelle 10: Emissionsdaten verschiedener Stromnetze [GEMIS 2007]

Option [kg/MWh] inkl. Stromnetz	CO₂-Äquivalent	CO₂	CH₄	N₂O	SO₂	NO_x	Staub	CO
Jahresstrommix 2007 (Österreich)	230	205.42	0.90	0.01	0.08	0.35	0.02	0.29
Winterstrommix 2007 (Österreich)	309	277.74	1.18	0.01	0.12	0.40	0.03	0.31
UCTE-Mix	390	352.70	1.45	0.00				

Quelle: Kraftwerke: GEMIS -Österreich, Umweltbundesamt Wien 2008

Treibhausrelevante Emissionen aus der Stromaufbringung im Jahr 2007 (Strompark in Österreich + Stromimporte)

CO ₂ -Äquivalent-Emissionen	369.86
CO ₂ -Emissionen	332.59

Strommix Österreich	Jahresmittel	Winter
Wasserkraft	60%	50%
Wärmekraft	32%	42%
Rest	8%	8%
Summe	100%	100%

Quelle: Strommix 2007 aus Erzeugungsstruktur 2007

UTCE-Mix 2006

Wasserkraft	11.74%
sonstige erneuerbare	4.29%
fossile Energieträger	52.78%
nukleare Energie	30.82%
sonstige	0.37%

Quelle: e-control

8.1 Antriebsarbeit und Verbrauch

Antriebsarbeit

Vorab soll hier die Antriebsarbeit der verschiedenen Fahrzeugkonzepte in [kWh/km] gezeigt werden. Eine anschließende Analyse der einzelnen Anteile der Antriebsarbeiten soll eine detaillierte Ergebnisinterpretation ermöglichen.

In Abbildung 72 wird dargestellt wie die Antriebsarbeit mit der Elektrifizierung in der jeweiligen ökologischen Fahrzeugkategorie durch die Gewichtserhöhung leicht zunimmt. Im Vergleich der jeweiligen ökologischen Kategorien erkennt man eine deutliche Verminderung

der Antriebsarbeit vom Mittelklassewagen mit ca. 0,16kWh/km hin zum Greenwagen mit ca. 0,1kWh/km im CADC. Diese wird durch Veränderung von Gewicht, c_w -Wert, Querschnittsfläche, Trägheitsmasse des Motors und Reifengewicht erzielt.

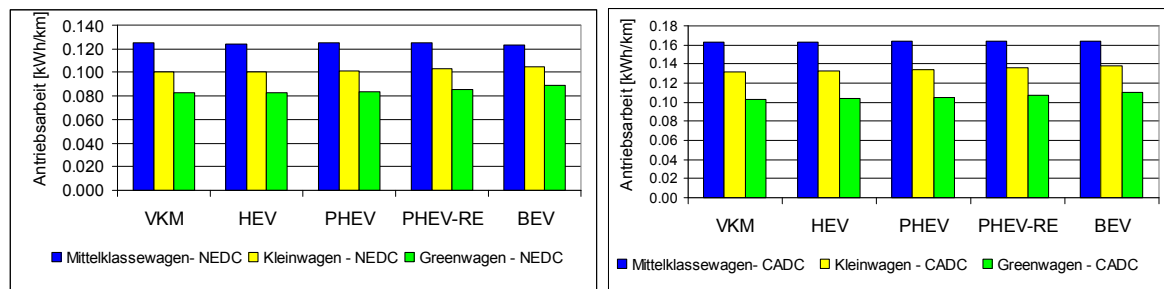


Abbildung 72: Gesamte Antriebsarbeit unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte in [kWh/km] im NEDC (links) und CADC (rechts)

Exemplarisch wird in Abbildung 73 die Aufteilung der Antriebsarbeit für Mittelklassewagen und Greenwagen im CADC gegenübergestellt. Dabei kann festgestellt werden, dass der Anteil des Rollwiderstands an der gesamten Antriebsarbeit zunimmt (wurde nicht verändert bei der Konzeptzusammenstellung). Die Beschleunigungsarbeit nimmt im Vergleich zum Mittelklassewagen beim Greenwagen durch das geringere Fahrzeuggewicht anteilig ab.

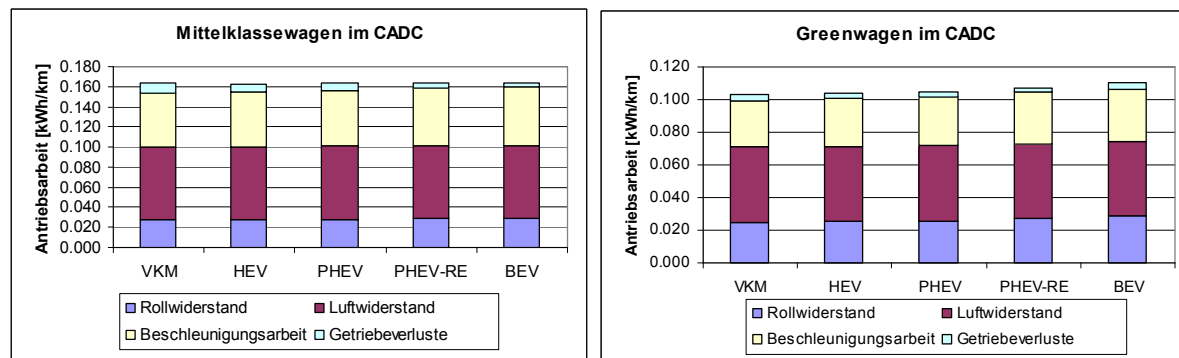


Abbildung 73: Anteile an der Antriebsarbeit für verschiedene Elektrifizierungsstufen im CADC beim Mittelklassewagen (links) und Greenwagen (rechts)

Im Anhang 8 können alle Werte für die Antriebsarbeiten und deren Anteil nachgelesen werden.

Verbrauch

Aus dem Simulationsergebnis in [kg/h] Verbrauch wurde für den jeweiligen Zyklus der Verbrauch in [l/100km] berechnet und dieser mit 9,8 kWh/l_Diesel multipliziert in [kWh/100km] umgerechnet. Der elektrische Verbrauch wird aus den SOC Werten und der Batteriekapazität errechnet.

HEV wurden mit einer Differenz von SOC_Start zu SOC_End von kleiner 0,002 kWh gerechnet. D.h. das Ergebnis wurde durch übermäßig be- oder entladene Batterie über den Zyklus nicht verfälscht (gilt für alle Ergebnisse).

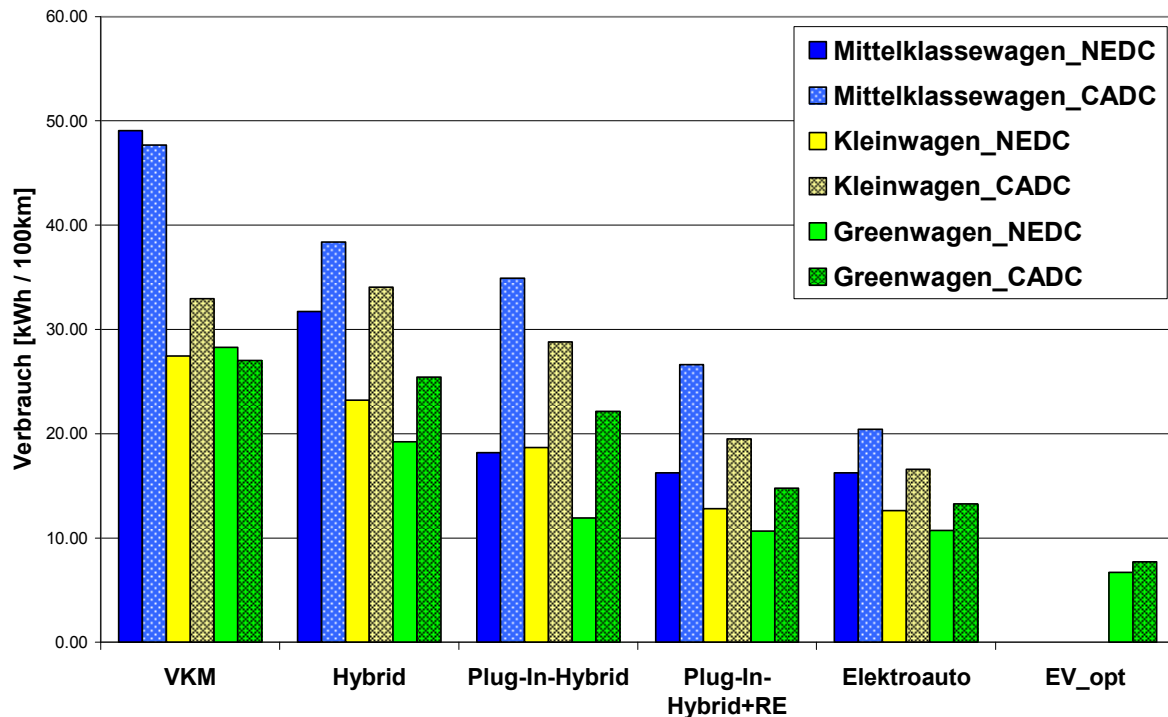


Abbildung 74: PHEM Simulationsergebnis - Verbrauch verschiedener Fahrzeugkonzepte

Ergebnisinterpretation Verbrauch:

Ein eindeutiger Trend hin zu weniger Verbrauch bei steigendem Elektrifizierungsgrad kann festgestellt werden. (Abbildung 74)

Das Einsparpotential im CADC des Elektroautos gegenüber dem PKW-VKM beträgt bei Mittelklassewagen 57%, Kleinwagen 50% und Greenwagen 51%. Im NEDC kann bei Betrachtung der Einzelwerte generell eine höhere Verbesserung verwirklicht werden als im CADC, selbst wenn vom Plug-In-Hybrid zum Elektroauto im NEDC keine nennenswerten Veränderungen im Verbrauch auftreten. Der Grund ist, dass ab dem Plug-In-Hybrid fast der gesamte NEDC elektrisch gefahren werden kann. Das EV_opt kommt auf eine Verbesserung im NEDC von 76% und im CADC von 71%.

Die Verbrauchsverbesserung von Hybridfahrzeugen (Mittelklassewagen) kann durch Gewichtsreduktion und kleinere Motoren (auch niedrigeren Kosten) ebenfalls realisiert werden. Die Kategorie der Greenwagen ist in der vorhergehenden technischen Entwicklungsstufe (kleinerer Elektrifizierungsgrad) immer besser im Verbrauch als ein Mittelklassewagen in einer bereits stärker elektrifizierten Version. Teilweise kann dieser Trend auch schon bei den Kleinwagen festgestellt werden.

Die Ergebnisse aus NEDC und CADC stimmen meist nicht überein, wobei für eine realitätsnahe Aussage, wie oben bereits erläutert, die Ergebnisse des CADC besser mit der Realität übereinstimmen.

Bei Mittelklasse- und Greenwagen mit VKM wird eine Verbrauchsverbesserung pro Kilometer vom NEDC zum CADC simuliert. Diese ergibt sich durch die unterschiedliche Lage im Kennfeld. Gegeben durch, Motorgröße, cw-Wert, Querschnittsfläche und Masse der Fahrzeugkonzepte ergeben sich die Unterschiede. Der Kleinwagen ist schon im NEDC nahe einem verbrauchsoptimalen Kennfeldbereich und dieser wird durch die höheren Beschleunigungen und Geschwindigkeiten im CADC nicht weiter verbessert.

8.2 CO₂ Emissionen

Aus dem Verbrauch in [l/100km] kann direkt mit 2,65kgCO₂/l_Diesel die CO₂ Emission errechnet werden. Diesel hat bei der Verbrennung somit 270gCO₂/kWh, wobei die vorgelagerten CO₂ Emissionen (WTT) nicht berücksichtigt sind. Lt. [Engel 2007] sind die WTW-CO₂ Emissionen von Diesel 300gCO₂/kWh. Es entstehen also ca. 10% der Emissionen in der Kraftstofferzeugung. In diesem Ergebnis werden sie nicht berücksichtigt, da Vergleichswerte für andere Emissionen fehlen.

Die kWh_elektrisch wird für einen europäischen Mix (UCTE-Mix) mit 352,7gCO₂/kWh bewertet. Ein Österreichischer Strommix wäre mit 277gCO₂/kWh (Winterstrommix 2007) und 205gCO₂/kWh (Jahresstrommix 2007) zwar bedeutend besser, es muss aber zwingend nach einer europäischen Lösung gesucht werden. Wenn die Stromimporte Österreichs mit berücksichtigt werden, sind die Werte mit 332gCO₂/kWh ohnehin in der Größenordnung des UCTE-Mix.

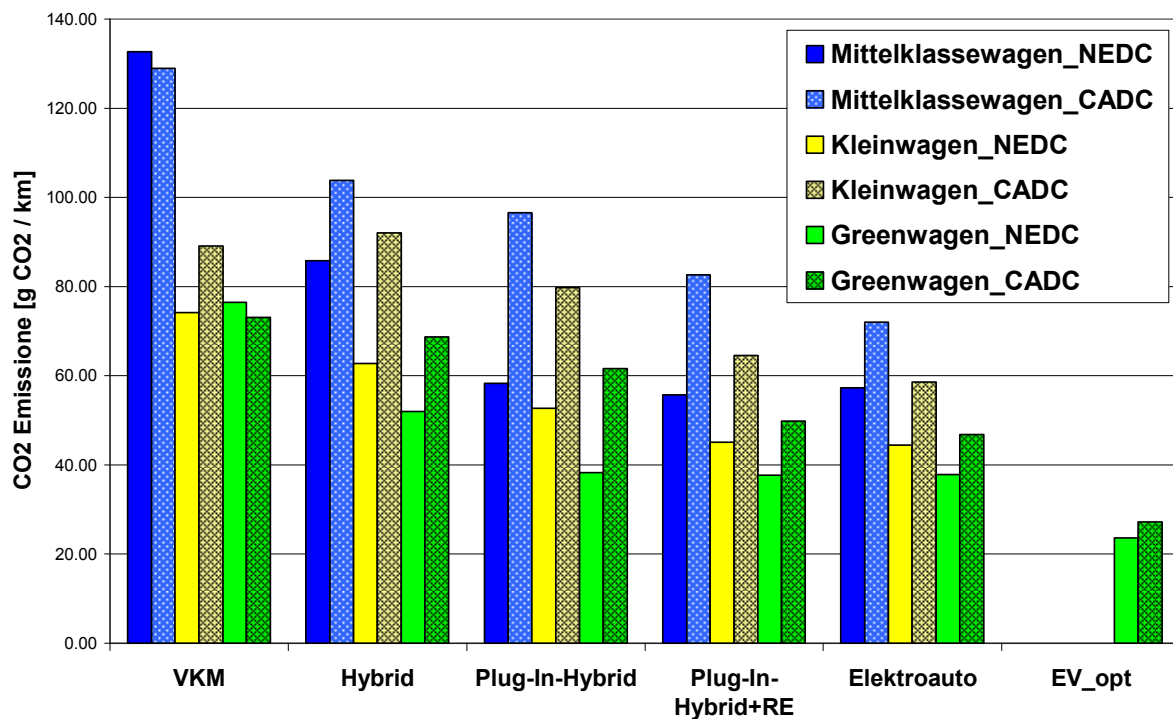


Abbildung 75: PHEM Simulationsergebnis – CO₂ Emissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte

Ergebnisinterpretation CO₂ Emissionen:

Das Einsparpotential im CADC vom Elektroauto zum PKW-VKM bei Mittelklassewagen beträgt 44%, bei Kleinwagen 34% und bei Greenwagen 36%. Die Verbesserung fällt im Vergleich zum Verbrauch niedriger aus, da die CO₂ Emissionen der Kilowattstunde Strom in der Bewertung höher liegen, als die des Treibstoffs mit 270gCO₂/kWh_Diesel (Abbildung 75).

Es wird nur mehr auf die Ergebnisse des CADC eingegangen. Genaue Werte finden sich im Anhang 6. Bei VKM wird bei Mittelklasse- und Greenwagen eine Verbesserung vom NEDC zum CADC simuliert. Diese ergibt sich wie beim Verbrauch beschrieben durch die unterschiedliche Lage im Kennfeld, bedingt durch Motorgröße und Geschwindigkeitsverlauf.

8.3 NO_x Emissionen

Die durch PHEM berechneten NO_x Emissionen in [gNO_x/h] oder über den Zyklus in [gNO_x/km], werden durch 0,4gNO_x/kWh für den getankten Strom aus dem Netz ergänzt.

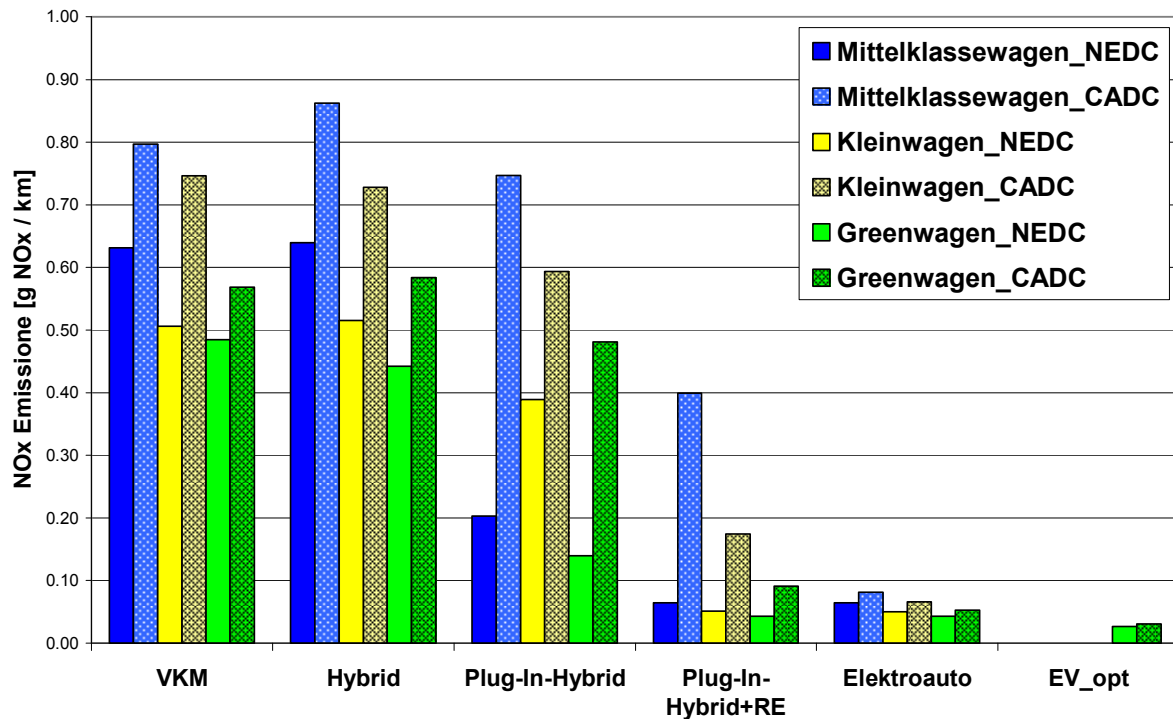


Abbildung 76: PHEM Simulationsergebnis – NO_x Emissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte

Ergebnisinterpretation NO_x Emissionen:

Die NO_x Emissionen nehmen im CADC erst bei PHEV-RE deutlich ab. (Abbildung 76)

Bei allen Fahrzeugen mit VKM ist im CADC eine höhere NO_x Belastung festgestellt worden.

Das Einsparpotential im CADC vom Elektroauto zum PKW-VKM beträgt in allen ökologischen Stufen ca. 90%. Durch die geringen NO_x Emissionen des Strombeitrages schafft es das EV_opt sogar auf 95% Einsparung.

Die Ergebnisse aus NEDC und CADC stimmen v.a. bei PHEV und PHEV-RE nicht überein, denn es kann bei diesen Konzepten fast der gesamte NEDC elektrisch gefahren werden.

Der Mittelklasse Hybrid hat durch die strategiebedingten Lastpunktanhebungen mit 0,86gNO_x/km mehr NO_x Emissionen als der VKM mit 0,8 gNO_x/km. Die Hybridstrategie wurde hier nur auf Verbrauchsoptimum, ohne Rücksicht auf Abgaswerte durchgeführt.

Der Grenzwert für EURO 5 (gültig ab 1. Sept. 2009) ist für NO_x Emissionen bei Diesel 0,18g/km. Dieser kann mit den hier simulierten Fahrzeugkonzepten nur mit dem KW- und GW- PHEV-RE und allen Elektroautos eingehalten werden. Die Typenprüfung ist aber mittels eines Kaltstarts zu prüfen. Durch die Simulation wie hier in betriebswarmem Zustand ist das Ergebnis bei NO_x Emissionen generell höher als bei einem Kaltstart und müsste für eine genaue Aussage auch bei Kaltstart untersucht werden.

8.4 HC Emissionen

Die durch PHEM berechneten HC Emissionen in [gHC/h] oder über den Zyklus in [gHC/km], werden aufgrund fehlender Daten nicht durch die verwendete Kilowattstunde Strom belastet.

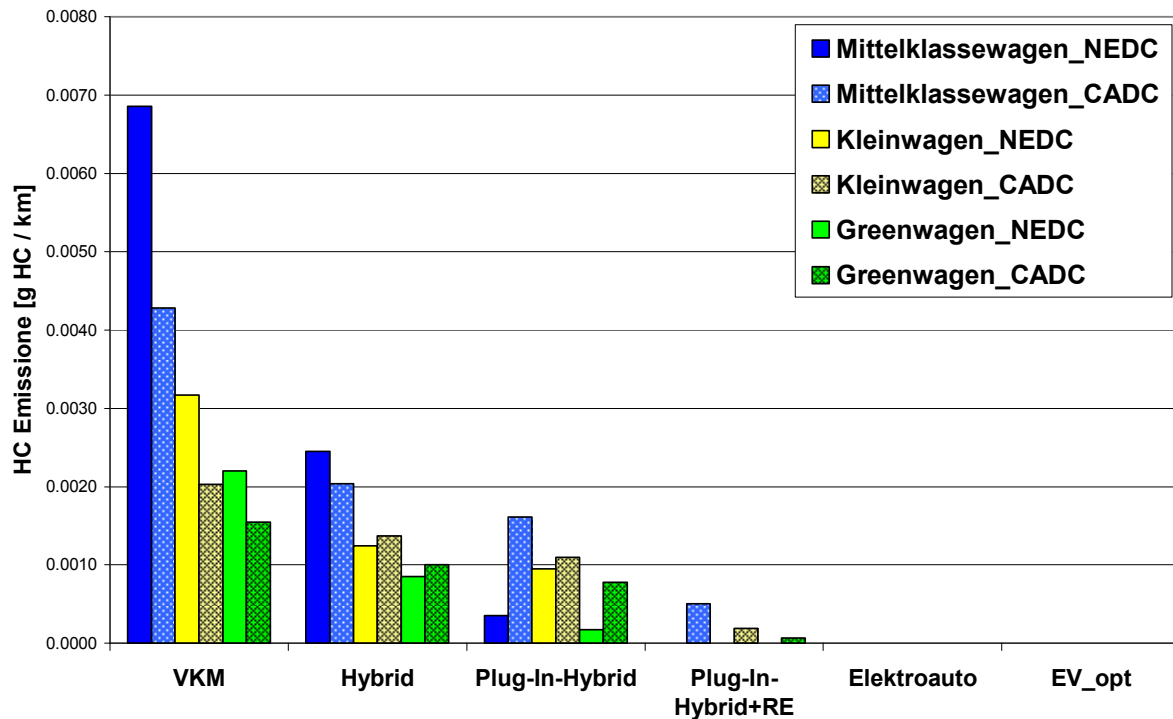


Abbildung 77: PHEM Simulationsergebnis – HC Emissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte

Ergebnisinterpretation HC Emissionen:

Das Ergebnis wird der Vollständigkeit halber angeführt und zeigt die Abnahme der HC Emissionen bis auf Null-Emission bei einer rein elektrischen Fahrt.

Alle Fahrzeuge befinden sich unter dem EURO 5 (gültig ab 1. Sept. 2009) Grenzwert für Diesel von 0,23gHC/km.

8.5 CO Emissionen

Die durch PHEM berechneten CO Emissionen in [g HC/h] oder über den Zyklus in [gCO/km], werden durch 0,31gCO/kWh für den geladenen Strom aus dem Netz ergänzt.

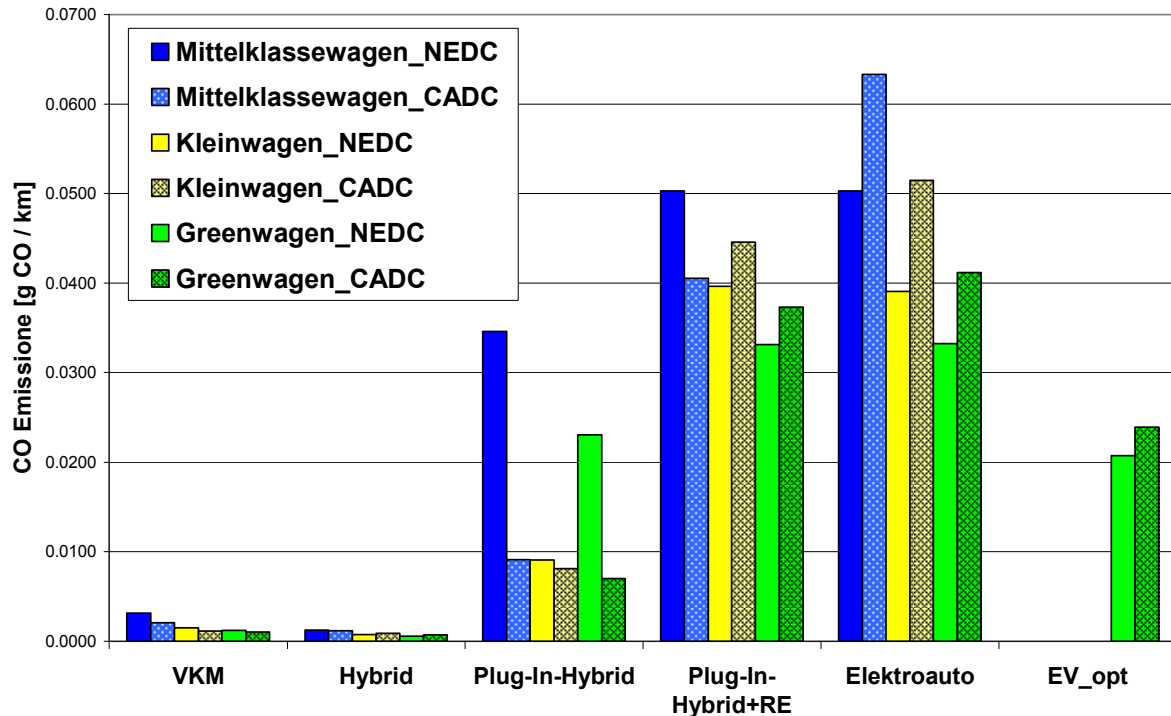


Abbildung 78: PHEM Simulationsergebnis – CO Emissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte

Ergebnisinterpretation CO Emissionen:

Die CO Emissionen nehmen ab der Bewertung des geladenen Stroms (ab PHEV) besonders rasant zu (Abbildung 78). Dies begründet sich vorwiegend daraus, dass bei den simulierten VKM-Diesel das Niveau der CO Emissionen bereits sehr gering ist.

Eine Verschlechterung vom PKW-VKM zum Elektroauto bei Mittelklassewagen beträgt 2920%, bei Kleinwagen 4423% und bei Greenwagen 1602%. Wird im NEDC ein großer Anteil rein elektrisch gefahren ergeben sich höhere CO Emission als beim CADC.

Diese Verschlechterung wird nicht durch das Fahrzeug selbst sondern nur durch den Strommix bestimmt. Eine Verbesserung vom VKM zum Hybrid ist je nach ökologischer Entwicklungsstufe zw. 20 und 40% möglich.

Bei einem Vergleich mit Institutsdaten für den gesamten Innlandsverkehr und Fahrzeugen mit Diesel- und Ottomotor ergibt sich 2008 folgendes Bild: PKW Ottomotor mit Katalysator = 3,77gCO/km, PKW Ottomotor ohne Katalysator = 22,33gCO/km und PKW Dieselmotor = 0,12gCO/km. Der Anteil von Dieselfahrzeugen startet somit bei einem Niveau das von Ottomotoren auch mit Katalysator im Flottendurchschnitt nicht erreicht wird.

Wie sich diese CO Emissionen in punktuell höherer Konzentration (bei den Kraftwerken) auf die menschliche Gesundheit auswirkt kann aus dieser Arbeit nicht abgeschätzt werden. Eine verbesserte Abgasnachbehandlung bei Kraftwerken könnte Abhilfe schaffen.

Alle Fahrzeuge befinden sich unter dem EURO 5 (gültig ab 1. Sept. 2009) Grenzwert für Diesel von 0,5gCO/km.

8.6 Partikel Emissionen

Die durch PHEM berechneten Partikel Emissionen in [gPM/h] oder über den Zyklus in [gPM/km], werden durch 0.03gStaub/kWh für den getankten Strom aus dem Netz ergänzt.

Im PHEM werden Partikel nach PM₁₀-Standard simuliert, welche auf den einatembaren Anteil der Immissionen fokussiert. Der Wert der Staubemissionen pro kWh_elektrisch schließt auch größere Partikel mit ein. Somit ergibt sich in der Vergleichbarkeit dieser Faktoren eine Unschärfe die in der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss. Neben der Partikelart und Partikelgröße ist aber auch der Ort der Emission bzgl. der Feinstaubproblematik von Bedeutung.

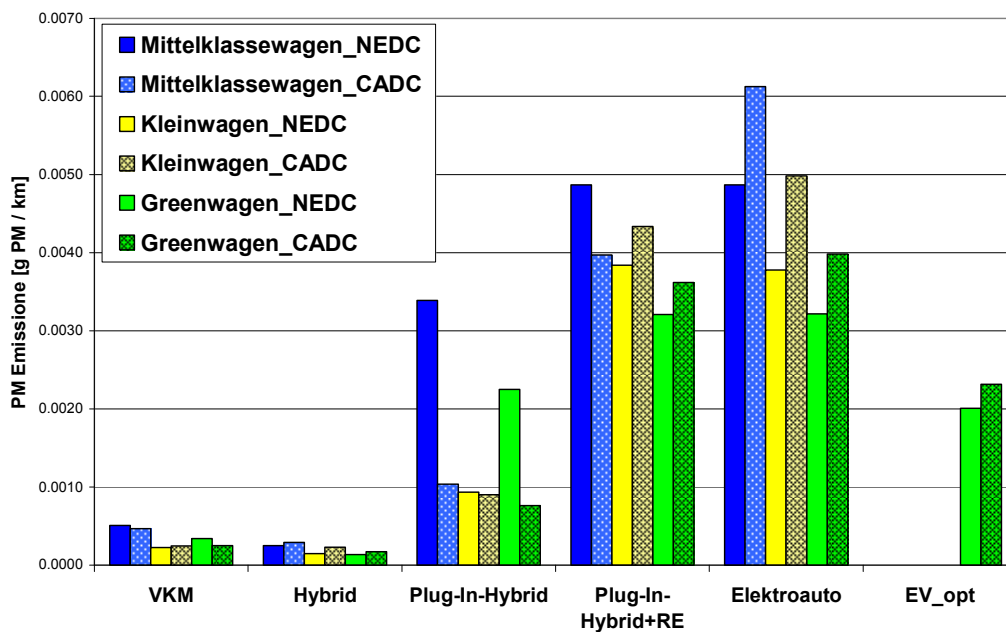


Abbildung 79: PHEM Simulationsergebnis – PM Emissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte

Ergebnisinterpretation Partikel Emissionen:

Die Partikel Emissionen nehmen ab der Bewertung des geladenen Stroms besonders rasant zu (Abbildung 78). Eine Verlagerung der Energiebereitstellung auf den Kraftwerkspark würde bei diesen Ausgangsbedingungen und mit heutigem Strommix eine Verschlechterung bei Partikel Emissionen bedeuten. Eine Verbesserung vom VKM zum Hybrid ist je nach ökologischer Entwicklungsstufe zw. 6 und 38% möglich. Da der VKM mit Partikelfilter simuliert wurde, ist die Vergleichsbasis sehr nieder.

Bei einem Vergleich mit Institutsdaten für den gesamten Inlandsverkehr und Fahrzeugen mit Diesel- und Ottomotor ergibt sich 2008 folgendes Bild: PKW Ottomotor mit und ohne Katalysator = 0,003gPM/km und PKW Dieselmotor = 0,036gPM/km. Der Beitrag aller Dieselfahrzeuge im Inlandsverkehr 2008 hat somit ein viel höheres Niveau als bei den gemessenen Fahrzeugen mit Partikelfilter.

Bei einem Austausch alter Fahrzeuge ohne Partikelfilter würde ein Umstieg auf Elektrofahrzeuge trotzdem eine Verbesserung bedeuten. Eine verbesserte Abgasnachbehandlung bei Kraftwerken könnte diese Partikel Problematik bei Bedarf in Analogie zu den CO Emissionen weiter Verbessern. Nur das Mittelklassewagen Elektrofahrzeug im CADC überschreitet den EURO 5 (gültig ab 1. Sept. 2009) Grenzwert für Diesel von 0,005gPM/km.

9 Energieversorgung - Analyse des Sektors Elektromobilität

Die Wichtigkeit eines Umstiegs auf 100% erneuerbare Energien wurde bereits in den ersten Kapiteln deutlich gemacht und ist Voraussetzung für die Möglichkeit sich dem Ideal einer 100% erneuerbaren Mobilität anzunähern. Vorbereitend bedarf es einer Überprüfung der Energiebereitstellung v.a. im Ökostromsektor, der für die Herstellung wie auch den Betrieb der Elektrofahrzeuge entscheidend ist.

Dieses Kapitel widmet sich den Daten zum Energieverbrauch, Berechnungen zur Elektromobilität sowie dem Potential erneuerbarer Energien.

9.1 Potentiale erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung

Aus den drei globalen Energiequellen entstehen folgende für den Menschen nutzbaren erneuerbaren Energieströme:

- Strahlung aufgrund von Kernfusion in der Sonne,
- vorhandene Erdwärme (Geothermie),
- der Erdrotation und den damit verbundenen Effekten (Gezeiten).

Auf der Erde können diese Energiequellen in Form von Sonnenlicht und -wärme, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse und Erdwärme genutzt werden.

Daten zur Ausgangssituation

Aus [REN21 2007] können folgende Daten zur erneuerbaren Energie entnommen werden:

- Erneuerbare Energien haben einen Anteil von 18% am globalen Endenergieverbrauch. Biomasse hat dabei den größten Anteil mit 13%. (Abbildung 80, links)
- Erneuerbare Stromerzeugung erreichte 2007 weltweit ca. 240 GW. Erneuerbare haben einen Anteil von 5% an der globalen Förderleistung und 3.4% an der gesamten globalen Stromerzeugung (ohne Großwasserkraft mit 15%). (Abbildung 80, rechts)
- Größten Anteil an der erneuerbaren Stromerzeugung hat Windkraft.
- Die am schnellsten wachsende Technologie ist Photovoltaik (Netzgebunden).

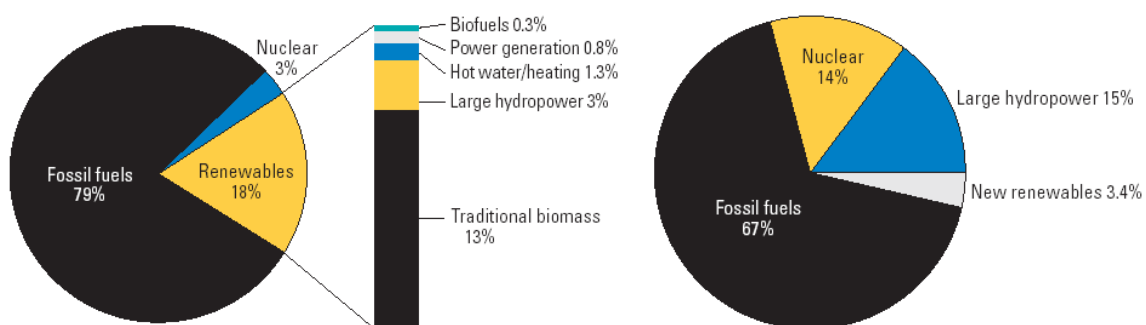


Abbildung 80: Erneuerbare Energien für globalen Endenergieverbrauch (links) und Anteile erneuerbarer Energien an der globalen Elektrizitätserzeugung im Jahr 2006 [REN21 2007]

Daten zur erneuerbaren Stromförderleistung für einzelne Regionen und Länder werden in Tabelle 11 aufgelistet. Diese soll noch einmal deutlich machen, welch großer weltweiter Herausforderung sich die Menschheit stellen muss, in ihrer derzeitigen Abhängigkeit von fossiler Energie.

Tabelle 11: Verfügbare erneuerbare Stromförderleistung 2006 [REN21 2007]

Technology	World Total	Developing Countries	EU-25	China	Germany	United States	Spain	India	Japan
gigawatts									
Wind power	74	10.1	48.5	2.6	20.6	11.6	11.6	6.3	1.6
Small hydropower	73	51	12	47	1.7	3.0	1.8	1.9	3.5
Biomass power	45	22	10	2.0	2.3	7.6	0.5	1.5	> 0.1
Geothermal power	9.5	4.7	0.8	~ 0	0	2.8	0	0	0.5
Solar photovoltaic-grid	5.1	~ 0	3.2	~ 0	2.8	0.3	0.1	~ 0	1.5
Solar thermal power-CSP	0.4	0	~ 0	0	0	0.4	< 0.1	0	0
Ocean (tidal) power	0.3	0	0.3	0	0	0	0	0	0
Total renewable power capacity (excluding large hydro)	207	88	75	52	27	26	14	10	7
For comparison									
Large hydropower	770	355	115	100	7	95	17	35	45
Total electric power capacity	4,300	1,650	720	620	130	1,100	79	140	290

Note: Small amounts, on the order of a few megawatts, are designated by “~ 0.” Biomass power, large hydropower, and total electric power capacity are approximate. Global estimate for 2007 total renewable power capacity is 240 GW. *Source:* See Endnote 10.

Stromerzeugung

Eine Analyse des gesamten europäischen Stromsektors würde für diese Arbeit zu weit führen. Darum werden verfügbare Daten von Europa und Österreich verwendet, die das Potential zur elektrischen Stromerzeugung einschätzbar machen.

Bei der Potentialanalyse ist es wichtig, grundsätzlich zwischen mehreren Arten von Potentialen zu unterscheiden. Dabei können das theoretische, geographische, technische, ökonomische und marktspezifische Potential unterschieden werden [vgl. Hoogwijk et al. 2008]. Diese Sammlung muss zumindest noch um das moralische Potential erweitert werden.

Zuerst soll das theoretische Potential aus erneuerbaren Energieressourcen abgeschätzt werden. Dazu dient eine Tabelle aus [Keywan 2007], in der ebenfalls das technische Potential und der momentane Verbrauch aus dem Jahr 2000 angeführt werden. In Tabelle 12 wird ersichtlich, dass das theoretische Potential um Größenordnungen über dem heutigen Verbrauch liegt. Aus dieser Erkenntnis kann geschlossen werden, dass bei einem momentanen Weltprimärenergieverbrauch von ca. 500 EJ, das theoretische Potential, ohne Problem auch in den einzelnen Kategorien, ausreichen würde um die Welt mit erneuerbarer Energie zu versorgen.

Tabelle 12: Erneuerbare Energieressourcen in EJ (10^{18} J) pro Jahr (2000)[Keywan 2007]

Resource	Current use ^a	Technical potential	Theoretical potential
Hydropower	9	50	147
Biomass energy	50	>276	2,900
Solar energy	0.1	>1,575	3,900,000
Wind energy	0.1	640	6,000
Geothermal energy	0.6	5,000	140,000,000
Ocean energy	~0	n.e.	7,400
Total	~60	>7,600	>144,000,000

n.e. Not estimated
a. The electricity part of current use is converted to primary energy with a factor of 0.385 (subst.equivalent).

Aktuelle Zahlen zum technischen Potential liefert die Studie [Hoogwijk et al. 2008] in der das technische Potential weltweit für verschiedene Regionen berechnet wurde. Die Zahlen zeigen eindeutig, dass bereits mit einzelnen erneuerbaren Energiearten der gesamte Weltenergiebedarf gedeckt werden könnte. (Tabelle 13)

Tabelle 13: Langfristiges technisches Potential von erneuerbaren Energien [Hoogwijk et al. 2008]

	Technical potential EJ/y electric power							EJ/y heat		EJ/y primary		Current (2002) primary energy supply
	Solar CSP	Solar PV	Hydro-power	Wind onshore	Wind off-shore	Ocean	Geothermal electric	Geothermal direct uses	Solar Water Heating	Biomass residues	Biomass energy crops	
North America	21	72	5	156	2	68	5	626	23	17	38	93
OECD Europe	0.5	13	7	16	5	20	2	203	23	5	12	72
Non-OECD												
Europe and FSU	25	120	5	67	4	27	6	667	6	5	80	39
Africa and Middle East	679	863	8	33	1	19	5	1,217	12	7	38	44
Asia	22	254	14	10	3	103	12	1,080	45	23	53	100
Latin America	59	131	10	40	5	32	11	836	12	15	34	24
Oceania	187	239	1	57	3	51	4	328	2	1	16	31
WORLD	992	1693	50	379	22	329	45	4955	123	73	271	402

Das Technische Potential soll hier in der Argumentation noch um eine ökonomische Darstellung erweitert werden. Dabei muss beachtet werden, dass moralische und ökologische Werte in einer Entscheidung ebenfalls zu berücksichtigen sind.

Abbildung 81 zeigt, dass vor allem die Photovoltaik und die thermischen Solarkraftwerke vergleichsweise hohe Kosten für die Stromproduktion haben.

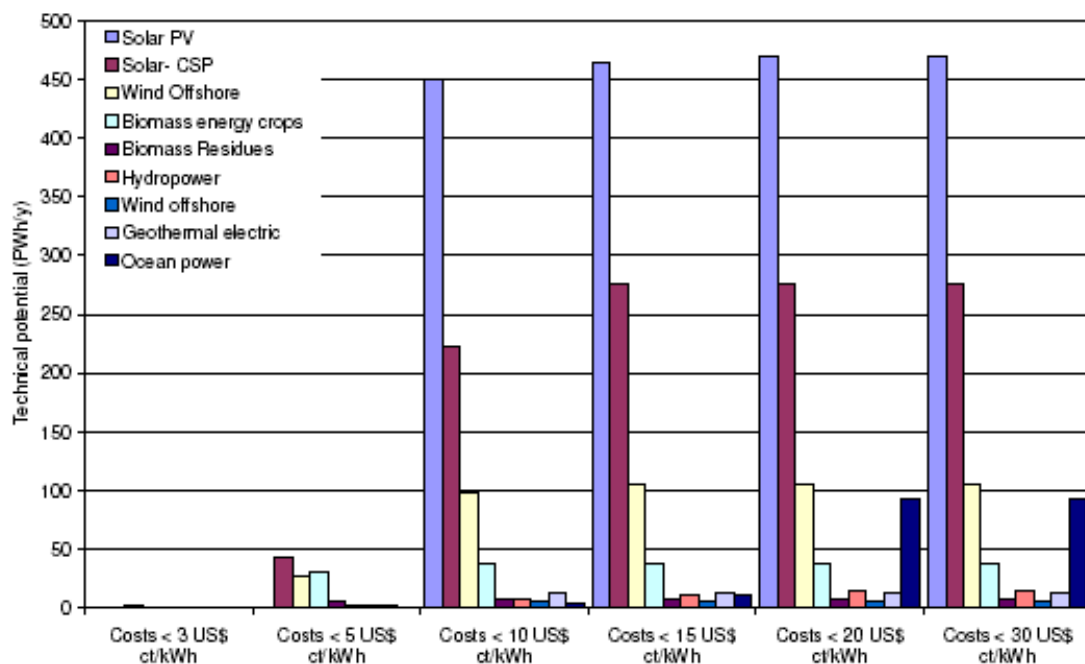


Abbildung 81: Globales Potential erneuerbarer Energien aufgliedert in Kostenkategorien (Produktionskosten) [Hoogwijk et al. 2008]

Stromerzeugung in Österreich

Bei der Betrachtung der Anteile von Energieträgern an der Stromerzeugung wird deutlich, welche einzigartige Ausgangslage Österreich mit seinem hohen Wasserkraftanteil hat. (Abbildung 82)

Derzeit ist die EU zu ca. 50% von Energieimporten abhängig. Europaweit, aber auch weltweit, verfügt die Photovoltaik lt. [Fechner 2007] über das technisch größte Potential zur elektrischen Stromerzeugung aus erneuerbarer Energie und somit einer Senkung der Abhängigkeit bei der Stromversorgung.

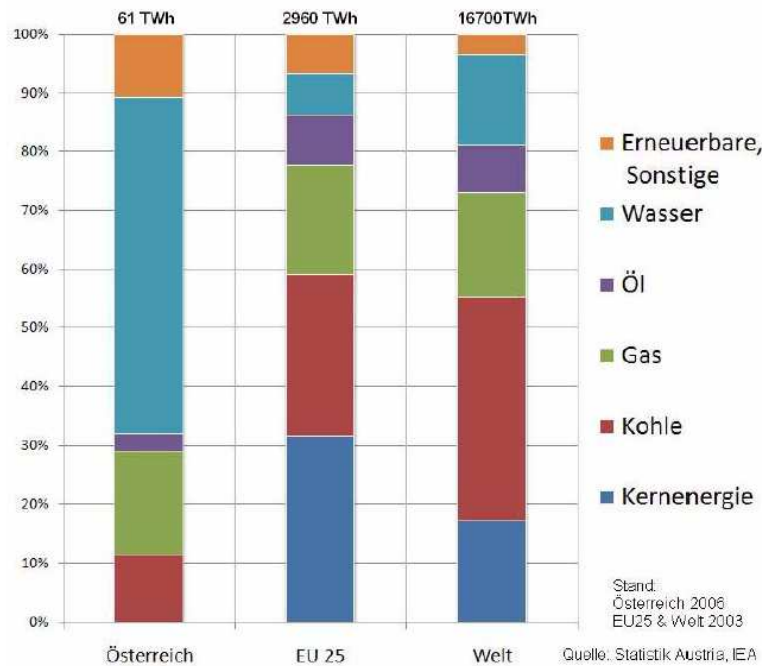


Abbildung 82: Anteil der Energieträger zur Stromerzeugung [Karl 2008]

Ein Vergleich von Potentialen und aktueller Nutzung der erneuerbaren elektrischen Stromerzeugung in Österreich, soll die Möglichkeiten bzgl. Energiebereitstellung aus Photovoltaik zeigen (Abbildung 83). Der erwartete Stromverbrauch im Jahr 2020 kann vollständig gedeckt werden, durch das Ausnützen vom Gesamtpotential erneuerbarer Energien.

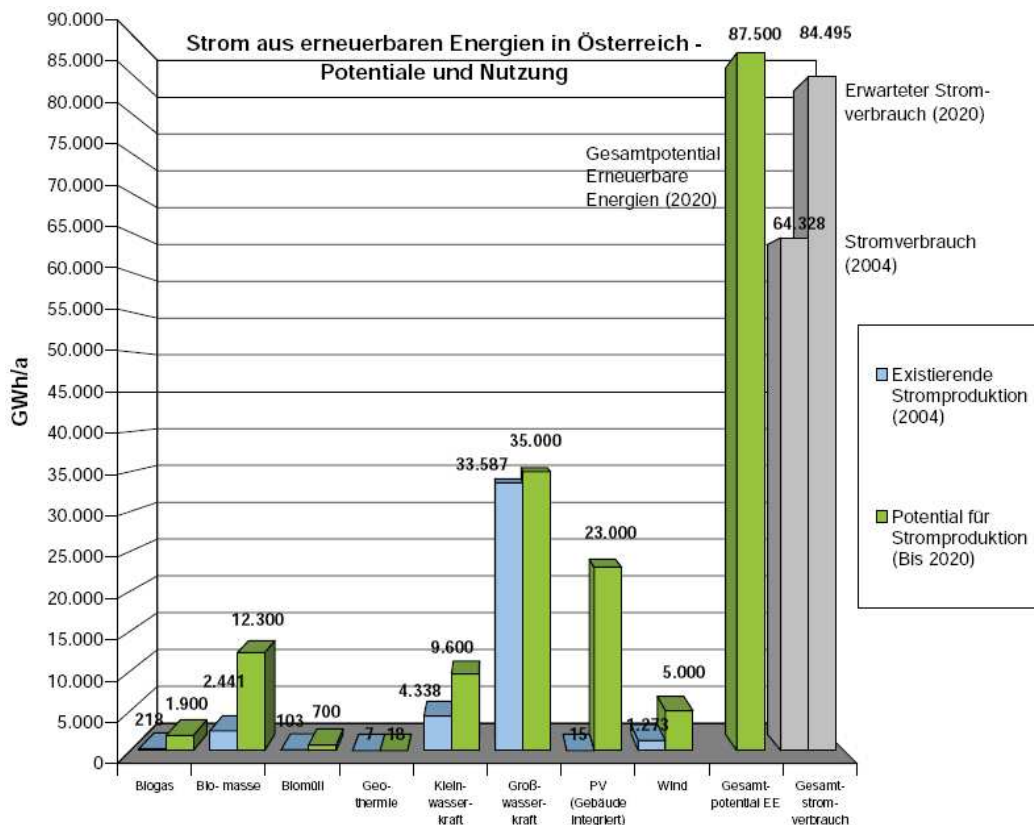


Abbildung 83: Strom aus erneuerbaren Energien in Österreich – Potentiale und Nutzung [Fechner 2007]

Im Bezug auf den Elektromobilitätssektor kann für die Photovoltaik auch anders argumentiert werden. Die bioproductive Fläche ist global begrenzt, womit auf eine höchste Flächeneffizienz bei der Energiebereitstellung geachtet werden muss. Das begrenzte Potential für die Nutzung von Biomasse im Mobilitätsbereich wird in [Podewils, 2007] anschaulich dargelegt. Mit dem Ertrag von einem Hektar Land, kann unter Verwendung von Strom aus Photovoltaik-Freiflächenanlagen, für Elektrofahrzeug eine Reichweite von 3.250.000km erreicht werden. Bei der Nutzung dieses Hektars mit Energiepflanzen, kann z.B. bei Biodiesel eine Reichweite von nur 21.500km erreicht werden (Abbildung 84). Für Biodiesel ist dies ein Hektarertrag pro Jahr von ca. 1.400Liter/ha und für die Stromerzeugung mit Photovoltaik pro Jahr 520.000 kWh_elektrisch/ha (durchschnittlicher Anlagewirkungsgrad 15%, Anlage bedeckt weniger als ein Drittel der Fläche für zusätzliche landwirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten).

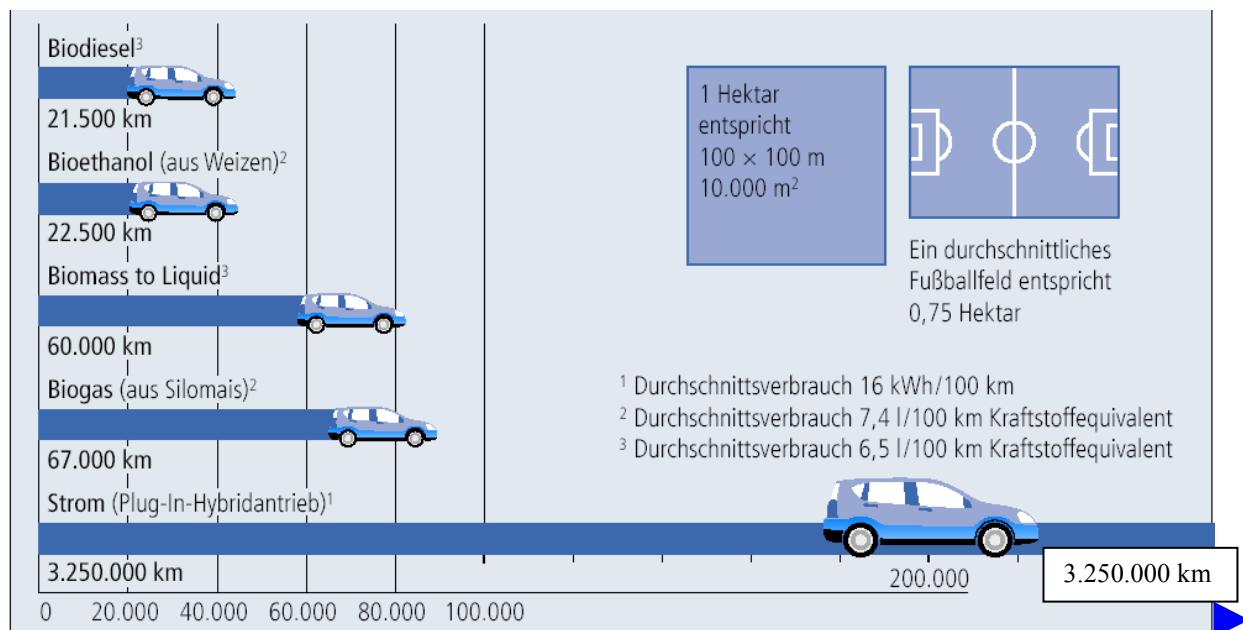


Abbildung 84: Durch Energieproduktion erzielte Reichweite auf einem Hektar Land (Energiepflanzen vs. Photovoltaikinstallation). Der Strombalken des Plug-In-Hybridantrieb hat in der Zeitschrift eine Länge von 6 Seiten. [Podewils, 2007]

Aus heutiger Sicht ist bei „Agrotreibstoffen“ das Potential der erneuerbaren Biomasse nicht ausreichend, um die derzeitige Treibstoffnachfrage zu decken. [vgl. Rose, Larivé 2008]

Berechnungen für ein Elektrofahrzeug

Ein Greenwagen-Elektrofahrzeug braucht im Betrieb ca. 13 kWh/100km. Bei einem Ladewirkungsgrad von 0,85 sind dies ca. 15 kWh/100km die elektrisch zur Verfügung stehen müssen. Der spezifische Stromertrag in Österreich kann mit ca. 875 kWh/kWp*a und einem Flächenbedarf von ca. 8m²/kWp pro Jahr angenommen werden bei.

Daraus ergibt sich ein Jahresenergiebedarf für 10.000km mit 1.500kWh. Die dafür erforderliche Photovoltaikfläche bei einem Fahrzeug mit 15kWh/100km ist rund 14m².

Die Kosten pro installierter Nennleistung unter standardisierten Testbedingungen (kWp) liegen derzeit bei etwa 5.000-7.000 Euro [Fechner 2007].

9.2 Versorgungssicherheit für die Elektromobilität

Hier soll berechnet werden wie viel zusätzlicher Strom in Österreich benötigt würde wenn alle oder nur ein Teil der PKW-VKM durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden.

Annahmen:

- Verbrauch eines durchschnittlichen Elektrofahrzeugs ca. 15kWh/100km (Gemittelter Verbrauch der simulierten Fahrzeuge aus NEDC und CADC)
- 4.300.000 Personenkraftwagen in Österreich
- Durchschnittliche Jahresfahrleistung von 10.000km (geringe Absenkung der derzeitigen Jahresfahrleistung von ca.13750km durch höheren ÖPNV Anteil)

Ergebnis:

Der gesamte zusätzliche Stromverbrauch bei Austausch aller PKW-VKM beträgt 6,45TWh (ohne Berücksichtigung des V2G Potentials). Bei 1 Million Fahrzeuge die bereits ca. 1/4 der derzeitigen Personenkraftwagen in Österreich ausmachen würden, wäre dies ein zusätzlicher Stromverbrauch von 1,5TWh.

Der derzeitige Stromverbrauch in Österreich beträgt ca. 65TWh [Statistik Austria_b 2009]. Womit eine Umstellung aller Fahrzeuge ca. 10% des derzeitigen Stromverbrauchs bedeutet und bei einer Million Fahrzeuge wäre der Anteil nur 2,3%. Aus dem Inlandsstromverbrauch 1990 (49.951MW) und 2006 (70.769MW) ergibt sich eine durchschnittliche Stromverbrauchserhöhung pro Jahr von 2,6%, ohne signifikanten Anteil für Elektrofahrzeuge.

Eine Vergleichszahl für Deutschland kann in [Pehnt et al. 2007] nachgelesen werden. Es wird berechnet, dass eine Million Voll-Elektrofahrzeuge einen Verbrauch ergeben von 2TWh, was etwa 1/300 des gesamtdeutschen Stromverbrauchs sein würde.

9.3 Energetische Gesamtbilanzierung am Fahrzeug

Für eine energetische Betrachtung der individuellen Mobilität mit Kraftfahrzeugen muss im Sinne einer ganzheitlichen Analyse neben der Nutzungsphase auch die Fahrzeugproduktion, die Treibstoffproduktion und die Entsorgung des Fahrzeugs berücksichtigt werden. (Abbildung 85)

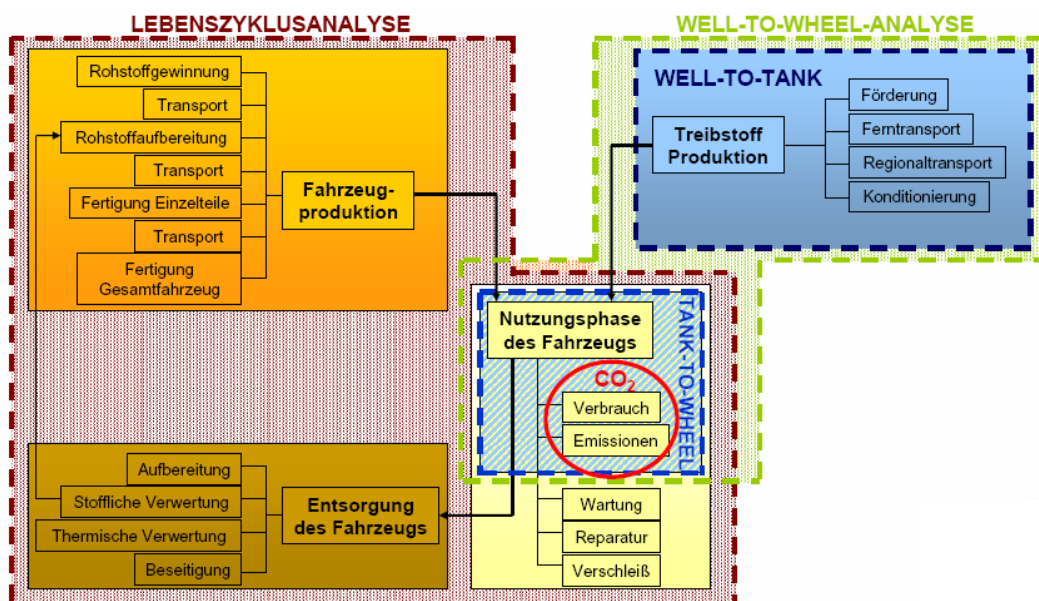


Abbildung 85: Energetische Gesamtbilanzierung [Göschel 2008]

Diese Betrachtung greift aber für eine gesellschaftliche Relevanz immer noch zu kurz. Der gesamte Einflussbereich des Verkehrsektors wie: Infrastruktur, von s.g. externen Kosten verursachte Handlungen (Unfall, Lärm, Gesundheit, Gebäudesanierungen, sonstige Schadstoffkosten, Klimakosten ect.), angebotsinduzierte Nachfrage, Werbeaufwand, bürokratischer Aufwand ect. darf aus mehrerer Hinsicht nicht vernachlässigt werden. Es bedarf eines s.g. "Integrierten Ansatzes“, was bezogen auf den Verkehrssektor bedeutet, dass neben der Automobilindustrie auch zum Beispiel Mineralölindustrie, Zulieferer, Endverbraucher, Gesetzgeber und Individuen gefordert sind, das Ihre zu leisten.

In allen hier genannten Bereichen können Vermeidungs- und Einsparungspotentiale ausgenutzt werden, auf die jedoch in der Arbeit nicht im Detail eingegangen werden kann.

Produktionsenergien

Um eine Verbesserung beurteilen zu können, die vorerst hauptsächlich für die Nutzungsphase eines Elektrofahrzeuges zu tragen kommt, muss bekannt sein, wie groß der Produktionsaufwand ist. Die anteiligen Produktionsenergien an der gesamten Nutzungsdauer eines Fahrzeuges werden hier erarbeitet.

Aus mehreren Quellen konnten unterschiedliche Werte entnommen werden, deren Herkunft und Genauigkeit nicht überprüft wurde.

In [Göschel 2008] wird der Lebenszyklus eines Fahrzeuges auf 8600 – 22000 Liter Benzin Äquivalent angegeben. Im Detail sind dies für die Entstehung 3200 – 9800 Liter Benzin Äquivalent, für die Nutzung 5200 – 12000 Liter Benzin Äquivalent und die Fahrzeugverwertung 200 Liter Benzin Äquivalent. Diese Studie war nur in ihren Ergebnissen verfügbar. Aus diesen Daten kann ein Wert von ca. 40% für die Herstellung gemittelt werden, welcher durch eigene Berechnungen als zu hoch angesehen wird. Die Nutzungsphase z.B. kann bei 200000km Gesamtfahrleistung und 8l/100km Verbrauch auf bereits 16000 Liter Benzin abgeschätzt werden.

Der Energiebedarfsanteil für die PKW Herstellung wurde mit GEMIS 2008 vom Joanneum Research mit einem Anteil von etwa 10% bei Diesel und 8% bei Benzin berechnet und zur Verfügung gestellt. In Abbildung 86 wird der Verbrauch im gesamten Lebenszyklus im Vergleich zum Energieverbrauch für die Kfz-Herstellung dargestellt. Die gewählten Mittelklassefahrzeuge wurden mit einer Lebensdauer von 225.000km angenommen.

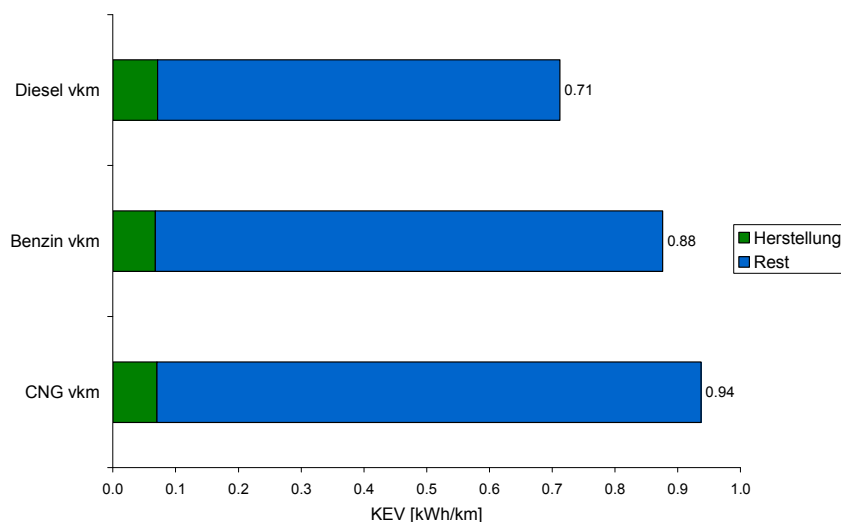


Abbildung 86: Anteil der Herstellenergie eines Mittelklasse PKW zum Energieeinsatz im Lebenszyklus aus einer Berechnung mit GEMIS 2008 Daten

Verbesserungspotential

Der Verbrauch eines Mittelklasse Elektrofahrzeugs hat mit ca. 0,20kWh/km nur mehr 40% vom Verbrauch eines Mittelklassewagens (VKM) mit ca. 0,5kWh/km. Unter der Annahme von einem konstanten zusätzlichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch von 0,21kWh/km (Herstellung, Recycling, Wartung etc.) erhalten wir einen Gesamtenergieverbrauch von 0,41kWh/km beim Elektrofahrzeug und 0,71kWh/km beim PKW-VKM. Somit ergibt sich für den gesamten Lebenszyklus eine Verbesserung des Elektrofahrzeuges auf 58% des Verbrauchs von einem Mittelklassewagens (VKM). D.h. das Verbesserungspotential beim Gesamtenergiebedarf PKW Sektor, durch den Umstieg auf Elektromobilität, ist ca. 42%.

Generell ist eine Kilowattstunde Strom mit einer Kilowattstunde Kraftstoff nicht eindeutig vergleichbar. Bei der Erzeugung von Strom aus Kraftstoff kann unter Berücksichtigung von einem Kraftwerkswirkungsgrad aus einer Kilowattstunde Kraftstoff die Kilowattstunde errechnet werden. Der zusätzliche Strombedarf kann für Elektrofahrzeuge aber erneuerbar realisiert werden, darum wird kein Wirkungsgradverlust für das Verbesserungspotential beim Gesamtenergiebedarf berücksichtigt.

Gewichtsreduktion als Beispiel

Allgemein wirken die Komfortzunahmen im Fahrzeugausbau den Maßnahmen zur Gewichtsoptimierung entgegen. Die Mittel die für eine Gewichtsoptimierung eingesetzt werden sind ebenfalls von größter Bedeutung. Als Beispiel wird bei [Doka 2003] der Lupo angeführt. Im Lupo wurde eine Reduktion an Gewicht erreicht mit dem Austausch von Stahlwerkstoffen durch Aluminium- und Magnesiumlegierungen. Diese Werkstoffe haben pro Kilogramm aber eine höhere Umweltbelastung als Stahl. Das bedeutet, der Aufwand für die Fahrzeugherstellung steigt im Bestreben die Umweltbelastung im Betrieb zu senken. Wiegt man diese Be- und Entlastungen gegeneinander ab, erhält man eine s.g. ökologische Rückzahldauer, die typischerweise zw. 4 und 8 Jahren liegt. Diese Zeiträume entsprechen etwa ein bis zwei Drittel der gesamten Fahrzeuglebensdauer je nach Fahrzeugmodell und dessen erzielten Einsparungen und der jährlich zurückgelegten Fahrstrecke.

Eine allumfassende Lebenszyklusanalyse mit oben genannten Einflussbereichen konnte in einer Literaturrecherche nicht gefunden werden.

Einflussnahme des Nutzers

Der Nutzer eines Fahrzeuges selbst hat grundsätzlich bei der Wahl des Mobilitätsverhaltens, des Verkehrsmittels, des Fahrzeugkaufes, des Fahrstils und der Nutzungsdauer Einfluss auf die Höhe des entstandenen Energieeinsatzes. Diese indirekte Einflussnahme des Einzelnen an gesamtgesellschaftlichen Bedingungen, kann durch eine aktive politische oder sonstige gesellschaftliche Teilnahme unterstützt werden, was wiederum rückwirkend Einfluss auf die vorhandene Verkehrslösung und somit auf den benötigten Energieeinsatz des Individuums hat.

Die Vermeidung einer Fahrt oder des Fahrzeugkaufs selbst ist nach wie vor ungeschlagen, was die Senkung des Energieeinsatzes betrifft.

10 Diskussion

Dieses Kapitel wird die Ergebnisse und Vorgehensweise dieser Arbeit mit anderen Arbeiten aus der Literatur vergleichen und persönliche Kommentare und Sichtweisen zur Diskussion stellen. Dazu gehören Aspekte einer gesamtheitlichen Betrachtung, die einen Einblick in die Vielfalt wichtiger Kriterien für Mobilitätsentscheidungen bieten und Visionen, die als Orientierungshilfe für heutige Entscheidungen dienen sollen.

Dass die Verbrauchsverbesserung von Hybridfahrzeugen (Mittelklassewagen) mit Hilfe von Gewichtsreduktion und kleinere Motoren bei niedrigeren Kosten realisiert werden kann, ist schon seit längerem bei den Automobilherstellern und Verkehrstechnikern bekannt [vgl. Hohenberg et al. 2007]. Die Kategorie der Greenwagen (tw. auch der Kleinwagen), welche die ökologische Wagenkategorie dieser Arbeit repräsentiert, bestätigt diese Verbesserung. In der vorhergehenden technischen Entwicklungsstufe (kleinerer Elektrifizierungsgrad) ist der Greenwagen immer besser im Verbrauch als ein Mittelklassewagen in einer bereits stärker elektrifizierten Version. Warum SUV's und andere hochgewichtige Personenkraftfahrzeuge von den Herstellern unter dem ökologischen Deckmantel „hybridisiert“ und gerade für den städtischen Betrieb angepriesen werden, kann nur mit engstirniger Wirtschaftslogik nachvollzogen werden. Schwere Fahrzeuge zu fahren muss - ohne „echten“ Bedarf - als nicht mehr Zeitgemäß erkannt werden. Eine Fahrt im gut mit öffentlichen Verkehrsmitteln erschlossenen städtischen Gebieten verschärft diesen respektlosen Umgang mit Ressourcen und Umwelt.

Studien wie *Solare Mobilität 2030* [Brauner 2008] oder *Plug-in Hybrids* [Engel 2007] rechnen Verbrauch und CO₂ Emissionen elektrifizierter Fahrzeuge aus und leiten Zukunftsszenarios davon ab. Die Größenordnungen für Verbrauch und CO₂ Emissionen decken sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit. Andere Emissionskomponenten wurden in diesen Studien aber nicht behandelt. Die Simulationsergebnisse der Emissionen NO_x, HC, CO, Partikel gelten als wichtige Erkenntnisse und müssen v.a. in ihren Auswirkungen bei der Energiebereitstellung für zukünftige Mobilität beachtet werden. Eine saubere Mobilität wird von den Vorbereitungen im Energiesektor abhängen.

Was es heißen kann sich nur auf den Fahrbetrieb zu beschränken, zeigen die Ergebnisse [Abe 2008], die bereits unter Abbildung 7 gezeigt wurden. Die gCO₂/km sowie gNO_x/km (TTW) werden dabei beim Elektrofahrzeug mit jeweils Null angegeben. Die Chancen eines Elektrofahrzeuges zu hoch zu stapeln wird für unsere Zukunft als gefährlich eingeschätzt. Diese Arbeit soll zeigen, dass es zwar möglich ist diese Nullemission zu erreichen, nicht aber durch auswechseln der Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmotor durch Elektrofahrzeuge.

Bei einer Annahme von 20kWh/100km Verbrauch für ein Elektrofahrzeug liegen die Treibhausgas-Emissionen lt. [Pehnt et al. 2007] bei Steinkohlestrom-Aufladung bei 5 bis 6 Liter Benzinverbrauch. Mit 950gCO₂/kWh für Steinkohle aus Lebenszyklusanalysen [Engel 2007] wären dies 190 gCO₂/km und ein Verbrauch an Diesel von ca. 7,1 Liter/100km. Das Ergebnis kann also nicht nachvollzogen werden und kann als Entscheidungsgrundlage negative ökologische Auswirkungen hervorrufen. Der derzeitige Durchschnittsverbrauch von Neuwagen in Österreich wird vom VCÖ mit 6,5 Liter/100km angegeben (EU-Durchschnitt: 6,3 l/100km) [VCÖ 2008]. Somit wurde nachgewiesen, dass, bei CO₂ intensivster Stromerzeugung, ein insgesamt schlechteres Verbrauchsergebnis als mit einem heutigen Durchschnittsneuwagen erreicht wird. Die Vorteile wie lokale Umwelteinwirkung und Lärm würden bei einem Umstieg auf Elektromobilität jedoch zu tragen kommen.

Bei einem Vergleich mit Daten vom Umweltbundesamt 2004 [zitiert nach Global2000 2009], von CO₂ Emissionen verschiedener Verkehrsmittel, kann festgestellt werden, dass sich ein Elektrofahrzeug zwischen einem herkömmlichen PKW und den öffentlichen Verkehrsmitteln (Bus und Bahn) einreicht. In Tabelle 14 wurden Werte aus [Global2000 2009] durch eigene Ergebnisse ergänzt. Ein simuliertes Elektrofahrzeug mit ca. 40 bis 70gCO₂/km, je nach Fahrzeugkonzept und Strommix, hinter Bus, Bahn, Gehen und Radfahren zurück. Für die Vergleichbarkeit mit Personenkilometer beziehen sich die Werte für das Elektrofahrzeug auf einen Besetzungsgrad von 1,25. Bei höherem Besetzungsgrad kann sich das Elektrofahrzeug wie auch andere PKW je Personenkilometer noch entscheidend verbessern.

Tabelle 14: CO₂ Emissionen in Gramm je Kilometer für verschiedene Verkehrsmittel und Fahrzeugkonzepte nach [Global2000 2009] und eigenen Berechnungen

Verkehrsmittel	je Personenkilometer	je Tonnenkilometer
Fußgänger und Radfahrer	0 g/km	
Bahn	11 g/km	4,5 g/km
Bus	30 g/km	
Elektrofahrzeug	44 g/km	
PKW	106 g/km	
LKW		123 g/km
Flugzeug	194 g/km	1400 g/km

10.1 Aspekte einer gesamtheitlichen Betrachtung

Eine vollständige Gesamtbetrachtung ist im Rahmen einer Diplomarbeit natürlich nicht möglich. An dieser Stelle wird versucht auf wichtige Faktoren hinzuweisen, welche die rein technokratische Problemlösung entscheidend ergänzt. Für eine ernst gemeinte Lösung im Mobilitätsbereich müssen folgende Punkte vom Verkehrstechniker mitbeachtet werden:

Mobilität ist nicht die Summe der Kilometer

Nur wenn wir es schaffen Mobilität und Verkehr begrifflich zu trennen, können wir das Ziel erreichen, dass lautet: „Mehr Mobilität mit weniger Verkehr“. So klingt die „Warnung“ von H. Topp in seinem Beitrag „*Verkehr im Jahr 2030*“ [Topp 2003]. Dabei wird die räumliche Mobilität als Grundvoraussetzung für eine Teilnahme an gesellschaftlichen Prozessen gesehen. Dass diese jedoch nicht mit der Anzahl zurückgelegter Kilometer verwechselt werden darf, ist wichtig. Interessensvertreter stellen diese Tatsache aber zu oft in den Schatten. Die Folge ist: „von mehr Mobilität mit weniger Verkehr sind wir weit entfernt“. Motorisierung, billige Raumüberwindung, abnehmende Dichte räumlicher Strukturen, geringere Fertigungstiefen in der Produktion, Individualisierung von Lebensstilen werden als Gründe für mehr Verkehrsaufwand und größere Autoabhängigkeit gesehen.

Topp kommt zu dem Schluss: Nachhaltige Mobilität ist ohne übergeordnete verkehrspolitischen Rahmenbedingungen nicht zu erreichen. Es braucht Kostenwahrheit im Verkehr - einschließlich der heute nicht gedeckten „externen“ Kosten [vgl. BMVIT 2007] aus Umweltschäden, Gesundheitsschäden und volkswirtschaftlichen Verlusten durch Stau. Wichtigste Herausforderung ist eine Vernetzung der Verkehrsmittel, nicht zuletzt weil Mobilität und Verkehr in der modernen Welt eng miteinander verknüpft sind.

Abschließend wird die räumliche Mobilität um die intellektuelle Mobilität ergänzt, die sich bekanntlich auch weder in Pferdestärken noch Kilometeranzahl messen lässt.

Welche Wege sind für die Existenz notwendig

Wenn wir ernsthaft die Klimaproblematik lösen möchten und deren Dringlichkeit respektieren, müssen wir uns Gedanken machen, welche Wege für eine funktionierende Gesellschaft notwendig bleiben. Auf die Gefahr hin, dass diese Gedanken in einer subjektiven Bewertung festfahren könnten, beschränken sich diese Überlegungen auf die Grundbedürfnisse der Menschen und den Bedarf einer globalen Gesellschaft.

Sämtliche Wege, die der Nahrungsmittelproduktion und der Nahrungsmitteldistribution dienen, müssen gewährleistet sein. Ohne auf die sinnvolle Länge der Pendlerstrecke einzugehen, wird es notwendig sein, Arbeitsplätze weiter erreichen zu können. Weitere Beispiele (nicht vollständig) sind Krankentransporte, internationale Zusammenarbeit zu Friedenszwecken und internationaler Warenhandel für Waren die regional nicht bereitgestellt werden können.

Die benötigte Anzahl und Länge der Wege braucht in jedem Fall ein global verträgliches Maß, welches sich am Bedarf orientiert. Es gibt keine existenzielle Notwendigkeit für „Spritztouren“ und andere „sinnlos“ zurückgelegte Wege. Unsere „Freiheit“, eine beliebige Art der Mobilität (Lebensstil) zu wählen, endet dort, wo unsere Lebensart die Freiheit Anderer beschneidet, ein menschenwürdiges Leben zu führen.

Verkehrssicherheit und Geschwindigkeit

Die Hauptursache für tödliche Verkehrsunfälle ist das Fahren mit überhöhter Geschwindigkeit [BMVIT 2007]. Die technische Möglichkeit Fahrzeuge, je nach Geschwindigkeitsbeschränkung automatisch zu drosseln mag noch Zukunftsmusik sein, eine Zulassungsbeschränkung von Fahrzeugen die schneller fahren können als die erlaubten 130km/h auf österreichischen Autobahnen, würde definitiv Leben retten und insgesamt ökologische Vorteile bringen.

Länder wie z.B. Deutschland, die über keinerlei Tempolimit auf diversen Straßen verfügen, blockieren eine europaweite ökologische Entwicklung im Verkehrsbereich. Dieses Versäumnis kann ökologisch nicht durch Effizienzmaßnahmen am Fahrzeug wieder gut gemacht werden - von den zusätzlichen Verkehrstoten ganz abgesehen.

Stehzeiten

Nicht umsonst kommt Knoflacher in „*Stehzeuge - Fahrzeuge*“ [Knoflacher 2001] zu dem Gedanken, dass unsere individuellen „Fortbewegungsmittel“ hauptsächlich stehen. Für eine Durchschnittsfahrleistung eines österreichischen Haushalts ergeben sich lt. [Statistik Austria_a 2009] für 2007/2008 rund 13.500km/Pkw und Jahr. Eine Durchschnittsgeschwindigkeit wählen wir, für diese Betrachtungsweise optimistisch, mit 50km/h.

So erhalten wir mit: $t = s / v$ eine Fahrzeit von insgesamt 270 Stunden pro Jahr. Ein Jahr hat insgesamt 8760 Stunden, womit 8490 Stunden Stehzeit verbleiben.

Diese Investition gilt bei einer wirtschaftlichen Betrachtung ohne Zweifel als Fehlinvestition. Damit es in der Praxis trotzdem funktioniert wird Stillstand und eigener „Fahrspaß“ gnadenlos über die Sinnfrage erhoben. Lösungsansätze mit z.B. Carsharing würden sofort nicht nur ökonomische sondern auch ökologische Entlastung bei gleicher Mobilität bringen.

Rebound Effekt

Es gibt tatsächlich ein gewaltiges Potenzial zur Energieeffizienzsteigerung im Bereich Verkehr. Doch leider führen in der Realität Effizienzerhöhungen nicht automatisch zu einer entsprechenden Reduktion des Verbrauchs. Schuld daran ist der so genannte Rebound-Effekt.

Menschen reagieren i.A. auf Effizienzerhöhungen mit einer Zunahme des Verbrauchs. Diese Effizienzerhöhung bedeutet nämlich, dass z.B. die Fahrt billiger wird. Ein Produkt das billiger wird, wird auch vermehrt nachgefragt.

Drei Stufen von Rebound-Effekten können unterschieden werden [ETH 2008]:

Direkter Rebound-Effekt: Konsumation der gleichen Ressource

Indirekter Rebound-Effekt: Anderer Konsum mit dem freigewordenen Geld

Makro-Level Rebound-Effekt: Anpassung der Produktions- und Distributionsstrukturen

Beim direkten Rebound-Effekt wird also öfter oder länger gefahren mit größeren Fahrzeugen. Der indirekte Rebound-Effekt könnte sich in einer zusätzlichen Flugreise zeigen, nach eingesparten Treibstoffkosten vom Fahren mit dem PKW.

Wenn sich z.B. schnellere Zugverbindung in Erhöhung der Pendlerdistanz (gleiche Fahrzeit) und Umfahungsstrassen in mehr Verkehr (gleiche Fahrzeit) auf diesen Straßen auswirken, müssen alle Verkehrsentscheidungen wohl überlegt sein und der Rebound-Effekt in generationengerechte Entscheidungen mit einbezogen werden.

10.2 Visionen

An dieser Stelle werden einige Visionen angeführt, vor allem für jene, die durch heutige Entscheidungen bereits unsere Zukunft lenken können (sollen).

Die Mobilität von heute ist auf den gleichen Säulen aufgebaut wie die Mobilität von morgen. Eine Säule ist das zugrunde liegende Wirtschaftssystem und seine Zielorientierungen. Das vorrangige Streben nach Gewinn und Wachstum birgt eine Gefahr, welche sich meist negativ auf arme Bevölkerungsschichten, die Natur und nachkommende Generationen auswirkt - Teile unserer Gesellschaft die noch keine Macht und keine Stimme im Parlament haben. Mobilitätslösungen brauchen, wie auch alle anderen Bereiche des Lebens, an der Basis eine Wertentscheidung - gewissenhaft darf als Wert niemals alleine der Preis verstanden werden.

Bei erkennen dieser Zusammenhänge werden sich die Ziele unseres Wirtschaftens ändern. Eine Umorientierung von unreflektiertem Fahrspaß zu einer neuen Mobilität, welche sich am Gemeinwohl orientiert kann kommen. Dieses wird eine Beweglichkeit schaffen die unsere Lebensgrundlage - die Natur - respektiert und schützt. Unser Planet Erde mit seiner Begrenztheit wird in jedem Fall ein stärkeres Argument haben als die Wachstumslogik unseres derzeitigen Wirtschaftssystems. Es wird genügend Menschen geben die sich dessen bewusst werden und neue wirtschaftliche „Spielregeln“ können festgelegt werden. Ein achtsamer Umgang mit individuellen Verkehrsmitteln gehört dazu.

Die Elektromobilität wird diese Wirtschaftsmechanismen positiv beeinflussen. Großräumige Strukturen führen zu einem Abfließen der Gelder in ferne Regionen und deren anonymen Körperschaften. Durch begrenzte Reichweiten werden wirtschaftliche Vorteile für regionale Strukturen entstehen. Elektromobilität fördert und stärkt regionales Wirtschaften. Durch dezentrale Versorgung (Nahversorgung) sinkt das Verkehrsaufkommen erneut.

Für Energielieferanten entsteht ein neues Absatzsegment, das bei ökologisch nachhaltiger Orientierung, auch für die Elektromobilität, auf Ökostrom basiert. Es wird ein kombiniertes Leasingangebot vom Energielieferanten, in Kooperation mit Automobilherstellern, geben. Dabei werden die Investitionskosten für z.B. Photovoltaik, Windkraft, Elektrofahrzeug (inkl. Batterie) und Ladestation durch Leasingangebote bereitgestellt und stellen kein finanzielles Hindernis mehr für den Einzelnen dar. Kaufkräftige Kunden werden die Vorteile und Chancen der Energieautarkie sofort ergreifen.

Die Einflüsse, die wir durch unseren Lebensstil (indirekt) auf das Verkehrsaufkommen haben, werden in den Schulen bereits gelehrt. Indem bewusst die Lebensmittel, eine naturnahe Bauweise und effizient transportierte Güter gewählt werden, wird sich das Verkehrsaufkommen auf ein natürliches Maß reduzieren.

Um die Verkehrsbelastung durch Elektrofahrzeuge in Städten gering zu halten, wird es Kooperationen oder gut gelenkte politische Maßnahmen in Zusammenarbeit mit dem Öffentlichen Verkehr geben. Eine Jahreskarte für die Benutzung von Straßen in Österreich inkludiert neben anteiligen externen Kosten für alle Fahrzeuge auch eine Gratisnutzungsmöglichkeit von öffentlichen Verkehrsmitteln. Elektrofahrzeuge sind durch ihre ökologischen Vorteile und den daraus resultierendem geringeren Anteil an externen Kosten hier preislich attraktiver. Durch ein verbessertes *Park & Ride* Angebot oder dem verbesserten Angebot in Städten für *Carsharing*, werden Fahrten mit Bus oder Bahn forciert. Dadurch wird europaweite Elektromobilität ohne Reichweitenproblem möglich.

Gewisse viel frequentierte Strecken werden mit Überkopfleitungen ausgestattet, um vor allem eine Umstellung auf elektrische Antriebe im LKW Verkehr möglich zu machen. Dafür wird es Abschnitte auf europäischen Straßen geben die ein Fahren und das Laden der Batterien gleichzeitig möglich machen. Kontaktlose Energieübertragungssysteme können hierfür ebenfalls genutzt werden.

Einige Visionen beziehen sich, stärker als andere, auf die Gegenwart und beziehen alle Entscheidungsträger mit ein! Rahmenbedingungen für zukünftige Mobilität müssen jetzt diskutiert, geplant und zeitgerecht entschieden werden! Die Elektromobilität wird als fixer Bestandteil zukünftiger Mobilität mitberücksichtigt und folgendes lenkend vorbereitet: neue Road-Pricing Systeme, durchdachte Parkgebührenregelung, lärm- und emissionsgeregelte City Maut, reale Fahrzeugprüfzyklen, die Vermeidung von Anreizen für Tanktourismus, Nullemissionskennzeichnung, eine ökologische Fahrzeugsteuer, ein neues attraktives Fahrradwegnetz in den Städten, eine Kennzeichnung von Ökostromtankstellen, freie Fahrbahnen für alle öffentlichen Verkehrsmittel und gezielte Geschwindigkeitsbeschränkungen.

Schritt für Schritt kommen wir der gemeinsamen Entwicklung hin zu einer zukunftsfähigen Mobilität, sozial gerecht für alle Menschen, näher.

11 Zusammenfassung

Die Elektromobilität stellt eine große Chance für unsere Zukunft dar. Die Elektrifizierung der Antriebe ist als Einzelmaßnahme nicht ausreichend um eine CO₂ freie Mobilität zu realisieren, jedoch ein wesentlicher Bestandteil eines Gesamtverkehrskonzeptes. Selbst bei Ausklammerung der Klima- und Energieproblematik kann die Elektromobilität einen entscheidenden Beitrag zur Lösung von verkehrsbedingten Problemen wie Lärm und NO_x Emissionen leisten und dabei durch ein neues Verständnis von PKW-Reichweiten auch die regionale Wirtschaft unterstützen. Die Unabhängigkeit von Energieimporten und fossiler Energie wird durch die Elektromobilität möglich, da die Energiebereitstellung von Strom für den Fahrzeugbetrieb aus einem regionalen erneuerbaren Energiemix erfolgen kann.

Es werden hier einige wichtige Erkenntnisse dieser Arbeit aufgelistet (grafische Darstellungen können in den entsprechenden Kapiteln gefunden werden):

Aus der Literatur (Kapitel 4 - 7):

- Aus Studienmaterial und der „I=PAT“ Formel (Impact = Population * Affluence * Technology) wird festgestellt, dass es zu wenig ist auf Energieeffizienzsteigerungen zu hoffen. Eine konsequente und zeitgerechte Lösung, mit treibhausgasneutralem Energieeinsatz, ist im gesamten Mobilitätsbereich notwendig und für die Menschheit eine Frage der Existenzsicherung.
- Die Ausgangsbedingung von Elektromobilität in Österreich ist ein sehr hoher Motorisierungsgrad (5.873.281 Kraftfahrzeuge bei ca. 8,3 Mio. Einwohnern im Jahr 2008) bei keinem signifikanten Anteil an Elektrofahrzeugen (146 im Jahr 2008). Dies führt zu einer „freien Bahn“ für lenkende politische Entscheidungen im Sektor Elektromobilität.
- Im ARTEMIS Stadt- bzw. Freiland - Fahrzyklus erreichen Dieselmotoren Wirkungsgrade von 21% bis 27%, Ottomotoren erzielen in den realen Fahrzyklen Wirkungsgrade von 15% bis 20,5%.
- Im realen Fahrbetrieb (CADC) kann durch die Rekuperation ca. 2kWh/100km an Einsparpotential genutzt werden.
- Die Li-Ionen Batterietechnik gilt als zukunftssträchtige Lösung. Neue Technologien, wie z.B. *Lithium Titanat* oder *Lithium-Eisen-Phosphat*, ermöglichen längere Lebensdauer und kürzere Ladezeiten. Als neuer Preisrichtwert am Markt kann 350€/kWh für eine Elektrofahrzeugbatterie herangezogen werden. Die Differenzierung zwischen Hybrid- und Elektrofahrzeugbatterie wird bei Preisen die auf eine Kilowattstunde bezogen werden und bei dem nutzbaren SOC Bereich als besonders wichtig erkannt.
- Kombinationsmöglichkeiten der Batterietechnik mit Doppelschicht-Kondensatoren könnten zukünftig zahlreiche Vorteile für das Energiemanagement im Fahrzeug bringen. Auch hier gibt es neueste technologische Entwicklungen, die über 60Wh/kg und mehr als 100kW/kg versprechen.
- *Vehicle to grid* gilt als wichtiges Konzept für zukünftiges Energiemanagement - nicht nur am Fahrzeug, sondern im gesamten Energiebereitstellungsbereich. Bereits 6-10% an Elektrofahrzeugen in Österreich könnten einen Großteil der benötigten Netzregelung übernehmen.
- Mit der Nutzung von *Vehicle to grid* kann das geparkte Elektrofahrzeug geladen oder als Energiespeicher genutzt werden. Zusätzlich kann dabei eine geringe Energiemenge

für das Temperaturmanagement der Batterie aufgewendet werden, um die Lebensdauer, die durch hohe Temperaturen stark eingeschränkt wird, zu erhalten.

Simulation der Fahrzeugkonzepte (Kapitel 8 - 9):

- Bei der Beurteilung der Verbesserungspotentiale ist der gesamte Lebenszyklus entscheidend. Wird die Systemgrenze zu „eng“ gewählt werden Ergebnisse verfälscht.
- Das Einsparpotential bei Verbrauch [kWh Kraftstoff bzw. kWh Strom] im realen Fahrbetrieb (CADC) des Elektroautos gegenüber dem PKW mit Verbrennungskraftmotor beträgt mindestens 50%. Die Verbrauchsverbesserung von Hybridfahrzeugen kann durch Gewichtsreduktion, kleinere Motoren und somit niedrigeren Kosten auch ohne Hybridisierung realisiert werden.
- Eine Ausnützung des heute möglichen technischen Potentials würde eine Verbrauchsreduktion des Elektroautos gegenüber dem PKW mit Verbrennungskraftmotor um mehr als 70% bringen.
- Das Einsparpotential bei CO₂ Emissionen im realen Fahrbetrieb (CADC) des Elektroautos gegenüber dem PKW mit Verbrennungskraftmotor beträgt, mindestens 34%. Die Verbesserung fällt im Vergleich zum Verbrauch niedriger aus, da die CO₂ Emissionen der Kilowattstunde Strom in der Bewertung höher liegen, als die des Treibstoffs mit 270gCO₂/kWh_Diesel.
- Die NO_x Emissionen nehmen - unter Berücksichtigung der Emissionen der Stromerzeugung - im realen Fahrbetrieb (CADC) erst bei Plug-In-Hybrid mit Range-Extender deutlich ab. Das Einsparpotential im CADC vom Elektroauto zum PKW-VKM beträgt in allen ökologischen Fahrzeugkategorien ca. 90%.
- CO Emissionen und Partikel Emissionen sind bei modernen Diesel-PKW bereits sehr gering und werden durch Elektroautos nicht gesenkt.

Energieversorgung - Sektor Elektromobilität (Kapitel 10):

- Sowohl die Elektromobilität als auch die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien birgt ein enormes Wachstumspotential; mit einer politisch einzigartigen Situation, aus der zwingend notwendige Entwicklungen bereits jetzt in richtige Bahnen gelenkt werden können. Als besonders wichtig aus ökologischer Sicht erscheinen: neue Road-Pricing Systeme, durchdachte Parkgebührenregelung, lärm- und emissionsgeregelte City Maut, reale Fahrzeugprüfzyklen, die Vermeidung von Anreizen für Tanktourismus, Nullemissionskennzeichnung, eine ökologische Fahrzeugsteuer, ein neues attraktives Fahrradwegnetz in den Städten, eine Kennzeichnung von Ökostromtankstellen, freie Fahrbahnen für alle öffentlichen Verkehrsmittel oder Elektrofahrzeuge und gezielte Geschwindigkeitsbeschränkungen.
- Eine Umstellung aller PKW auf Elektroautos würde ca. 10% des derzeitigen österreichischen Stromverbrauchs von ca. 65TWh benötigen. Bei einer Million Fahrzeugen wäre der Anteil 2,3%, in der Größenordnung der durchschnittlichen Stromverbrauchserhöhung von 1990 bis 2006 mit 2,6% pro Jahr.
- Der Anteil der Herstellungsenergien für Mittelklassewagen mit Verbrennungskraftmotoren ist ca. 10% vom Gesamtenergieeinsatz im Lebenszyklus. Daraus ergibt sich ein Verbesserungspotential beim Gesamtenergiebedarf im PKW Sektor durch den Umstieg auf Elektromobilität von ca. 42%.

12 Verzeichnisse

12.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kohlenstoffkreislauf in Milliarden Tonnen Kohlenstoff [UNEP 2009]	10
Abbildung 2: Weltölproduktion (Erdöl- und Flüssiggas-Förderung), Szenario 2004 [ASPO 2004].....	11
Abbildung 3: Kfz Bestand ab 1950 im Überblick [Hausberger 2008].....	12
Abbildung 4: Relatives Wachstum des Bruttoinlandsproduktes, Personentransport und Gütertransport der EU-15 Länder [Energy&Transport 2004].....	12
Abbildung 5: Anteil der Sektoren an den gesamten THG-Emissionen 2006 (links) und Änderungen in den Sektoren zwischen 1990 und 2006 (rechts) [Umweltbundesamt 2008]	14
Abbildung 6: Übersicht der Energiebereitstellung von ICE, E-Motor und Brennstoffzelle [Leopold 2008]	15
Abbildung 7: CO ₂ und NO _x Emissionen im Fahrzeugbetrieb zeigen Entwicklungsmöglichkeiten vom Hybrid- hin zum Elektrofahrzeug [Abe 2008]	16
Abbildung 8: Kombinationsmöglichkeiten von Verbrennungsmotor und Elektromotor [IFEU 2009].....	16
Abbildung 9: Momentenverlauf von Verbrennungskraftmotor und Elektromotor [Wallentowitz et al. 1999]	18
Abbildung 10: Aufbau eines parallelen Hybridfahrzeuges [Wallentowitz et al. 1999 zitiert nach Back 2005]	19
Abbildung 11: Beispielhafte Strukturvarianten von Hybridfahrzeugen [Back 2005, S6]	19
Abbildung 12: Drehmomentenverlauf von Elektromotor und Verbrennungsmotor [Göschel 2004].....	20
Abbildung 13: Übersicht der Hybridisierungsstufen und ihre Funktionen [Küçükay 2008]...	20
Abbildung 14: Verschiedene Plug-In-Hybrid Konzepte und deren Eigenschaften [Mohr dieck 2007].....	21
Abbildung 15: Elektrischer Leiter - Lorenzkraft.....	25
Abbildung 16: Momenten-Drehzahl-Betriebsdiagramm für elektrische Maschinen [Hofmann 2008, S70]	26
Abbildung 17: Prinzipskizze einer Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik am Beispiel einer Asynchronmaschine	26
Abbildung 18: Neugeordnete Bewertungsmatrix von Elektromotoren nach [Wallentowitz 2003] erweitert durch Angaben von [Naunin 2007]	28
Abbildung 19: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien der Asynchronmaschine [Hofer 2006]....	30
Abbildung 20: Gebiete maximalen Wirkungsgrads der unterschiedlichen Antriebskonzepte (PM=Permanentmagnetm., GRM=Gleichstromm. ASM=Synchronmaschine) [Naunin 2007].....	30
Abbildung 21: Typische Struktur eines elektrischen Drehstromantriebs [Böcker 2007, S71] 31	

Abbildung 22: Übersicht über mögliche Energiespeicher	32
Abbildung 23: Heizwerte und Gemischheizwerte bei $\lambda=1$ für verschiedene Brennstoffe [Eichelseder 2005].....	33
Abbildung 24: Reichweitenvergleich verschiedener Batteriesysteme zum VKM-Benzin [VDI Bericht_b 2008].....	34
Abbildung 25: Energie- und Leistungsnachfrage in Batteriesystemen für verschiedene Fahrzeugkonzepte. [Köhler 2007].....	35
Abbildung 26: Ragone-like plot: Spezifischen Leistungen und spezifische Energien von verschiedenen Energiespeichersystemen [Köhler 2007].....	35
Abbildung 27: Ragone-Diagramm mit typischen Entladezeiten von elektrischen Energiespeichern[Böcker 2007, S37].....	36
Abbildung 28: Ruhespannungsverlauf beim Einsatz verschiedener Materialien in Lithiumionenbatterien. [VDI Bericht_b 2008].....	36
Abbildung 29: Entwicklung der Batteriesysteme von Konversion bei Blei-Säure zu Interkalation bei Nickel-Metallhydrid und Lithium-Ionen [VDI Bericht_b 2008].....	37
Abbildung 30: Abhängigkeit der Lebensdauer von Temperatur und der Zyklenanzahl vom genutzten SOC Bereich für PHEV [Mohrdieck 2007].....	39
Abbildung 31: Reversible Selbstendladung S und irreversibler Kapazitätsverlust KV in Abhängigkeit vom Ladezustand (SOC) und der Temperatur für eine Lithium-Ionen Zelle [Jossen et al. 2006]	40
Abbildung 32: Verhalten der Kapazität einer Lithium-Ionen Batterie bei niedrigen Temperaturen (Entladung mit 1C) [EnerDel 2009]	40
Abbildung 33: Temperatureinfluss einer VL 12 V Zelle auf die Zellspannung bei konstantem Ladestrom als Funktion der Nennkapazität in [%] [Saft 2009]	40
Abbildung 34: Innenwiderstand bei verschiedenen Temperaturen als Funktion der Spannung [Saft 2009].....	41
Abbildung 35: Einfluss des Ladestroms einer VL 12 V Zelle auf die Zellspannung bei 25°C als Funktion der C-Rate in [%] (entspricht SOC) [Saft 2009]	41
Abbildung 36: Kosten und Kostenprognose für Li-Ionen Traktionsbatterien [Biermann 2009]	42
Abbildung 37: Erforderliche Leistung, Energie und Spannung in Funktion der Hybridfunktion [VDI Bericht_a 2007].....	44
Abbildung 38: Blockschaltbild eines Li-Ionen Batteriesystems [VDI Bericht_c 2006].....	44
Abbildung 39: Aufbautechnische Funktionsstruktur des Batteriesystems [VDI Bericht_b 2007].....	45
Abbildung 40: Schematische Darstellung eines Li-Ion Batteriesystems mit elektrischem und thermischem Management [Köhler 2007].....	46
Abbildung 41: Aktive Kühlungsvarianten (Luft- und Flüssigkeitssysteme) mit Einbindung ins Fahrzeug [VDI Bericht_c 2006].....	47
Abbildung 42: Batteriesystem mit Kühlung und Lastkreis [VDI Bericht_b 2007, S75]	47

Abbildung 43: Typisches Verhalten der Batteriespannung in Abhängigkeit von Ladegrad und Strom [Böcker 2007, S49].....	48
Abbildung 44: Lade- und Entladerarbeiten über einen Lade-Entlade-Zyklus [Böcker 2007, S51]	49
Abbildung 45: Hauptkomponenten für das Laden eines Elektroautos [Tesla 2009, S 5-6].....	49
Abbildung 46: Ladezeiten für eine Lithium-Polymer Zelle (Hochstromtyp) in Abhängigkeit vom Ladestrom [Jossen et al. 2006].....	50
Abbildung 47: Vehicle to grid Konzept [PWC 2009].....	51
Abbildung 48: Verteilung der täglichen Batteriemengen auf Basis des durchschnittlichen Fahrverhaltens [PWC 2009].....	51
Abbildung 49: Prinzipieller Zusammenhang einer elektrischen und hydraulischen Bremsung.	52
Abbildung 50: Fahrgeschwindigkeit und Bremsleistung im NEDC.....	53
Abbildung 51: Abhängigkeit der Zyklenzahl von der Entladetiefe für eine NiMH-Batterie [Quelle: Saft Batterien GmbH, Stand 2006 übernommen aus Böcker 2007, S52].....	55
Abbildung 52: Abhängigkeit der Zyklenzahl von der Entladetiefe für eine Li-Ionen-Batterie [Quelle: Saft Batterien GmbH, Stand 2006 übernommen aus Böcker 2007, S52].....	55
Abbildung 53: Schema eines PKW Rollenprüfstandes mit CVS-Abgasanalyseanlage [Hausberger, 2007].....	57
Abbildung 54: Schematische Darstellung des Modells PHEM	58
Abbildung 55: Geschwindigkeitsverlauf NEDC (New European Driving Cycle, Neuer Europäischer Fahrzyklus).....	59
Abbildung 56: Geschwindigkeitsverlauf CADC Gesamt	60
Abbildung 57: Hybridmodell in PHEM	62
Abbildung 58: Ladewirkungsgrad, Batterieladeverluste und Batterieladung in Abhängigkeit von der Zellenanzahl bei $U_0=3,65V$ und $R_i=0,004\Omega$ je Zelle	63
Abbildung 59: Ladewirkungsgrad in Abhängigkeit der Motorleistung bei zwei verschiedenen Klemmspannungen und Innenwiderständen.	63
Abbildung 60: Schnittpunkt der Verbrauchswirkungsgradkurven.....	64
Abbildung 61: TUG-Eta _{el} -Kennfeld für HEV	65
Abbildung 62: TUG-Eta _{el} -Kennfeld für PHEV	66
Abbildung 63: TUG-Eta _{el} -Kennfeld für PHEV-RE	66
Abbildung 64: TUG-Eta _{el} -Kennfeld für BEV	66
Abbildung 65: Hybrid Mittelklassefahrzeug simuliert im CADC	67
Abbildung 66: PHEV Mittelklassefahrzeug simuliert im CADC	67
Abbildung 67: Übersichtsmatrix der Fahrzeugkategorien	70
Abbildung 68: Specific power and specific energy of rechargeable cells [Saft 2009]	73
Abbildung 69: Durchschnittliche Weglänge in [km] nach Wegzweck und Geschlecht [BMVIT 2007].....	74

Abbildung 70: Weglänge in Klassen nach hauptsächlich benutztem Verkehrsmittel am Beispiel Vorarlberg 2003 [BMVIT 2007].....	74
Abbildung 71: Gegenüberstellung Fahrtlängenverteilung und Fahrleistungsverteilung [Brauner 2008]	74
Abbildung 72: Gesamte Antriebsarbeit unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte in [kWh/km] im NEDC (links) und CADC (rechts)	81
Abbildung 73: Anteile an der Antriebsarbeit für verschiedene Elektrifizierungsstufen im CADC beim Mittelklassewagen (links) und Greenwagen (rechts).....	81
Abbildung 74: PHEM Simulationsergebnis - Verbrauch verschiedener Fahrzeugkonzepte ...	82
Abbildung 75: PHEM Simulationsergebnis – CO ₂ Emissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte.....	83
Abbildung 76: PHEM Simulationsergebnis – NO _x Emissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte.....	84
Abbildung 77: PHEM Simulationsergebnis – HC Emissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte.....	85
Abbildung 78: PHEM Simulationsergebnis – CO Emissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte.....	86
Abbildung 79: PHEM Simulationsergebnis – PM Emissionen verschiedener Fahrzeugkonzepte.....	87
Abbildung 80: Erneuerbare Energien für globalen Endenergieverbrauch (links) und Anteile erneuerbarer Energien an der globalen Elektrizitätserzeugung im Jahr 2006 [REN21 2007].....	88
Abbildung 81: Globales Potential erneuerbarer Energien aufgeschlüsselt in Kostenkategorien (Produktionskosten) [Hoogwijk et al. 2008]	90
Abbildung 82: Anteil der Energieträger zur Stromerzeugung [Karl 2008]	91
Abbildung 83: Strom aus erneuerbaren Energien in Österreich – Potentiale und Nutzung [Fechner 2007]	91
Abbildung 84: Durch Energieproduktion erzielte Reichweite auf einem Hektar Land (Energiepflanzen vs. Photovoltaikinstallation). Der Strombalken des Plug-In-Hybridantrieb hat in der Zeitschrift eine Länge von 6 Seiten. [Podewils, 2007].....	92
Abbildung 85: Energetische Gesamtbilanzierung [Göschel 2008]	93
Abbildung 86: Anteil der Herstellerenergie eines Mittelklasse PKW zum Energieeinsatz im Lebenszyklus aus einer Berechnung mit GEMIS 2008 Daten.....	94

12.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kfz-Bestand 2008 nach Fahrzeugarten [Statistik Austria_b 2009].....	13
Tabelle 2: Vergleich von negativen Aktivmaterialien [Winter 2006].....	37
Tabelle 3: Messergebnisse Rollenprüfstand und PHEM Simulationsergebnisse eines VW Golf V GT TDI 125 kW im CADC	68
Tabelle 4: Fahrzeugkategoriedaten der Mittelklassewagen	71

Tabelle 5: Gewichtskalkulation der Konzepte	71
Tabelle 6: Fahrzeugkategoriedaten der Kleinwagen	75
Tabelle 7: Fahrzeugkategoriedaten der Greenwagen	77
Tabelle 8: Fahrzeugkategoriedaten EV_opt und Vergleichsfahrzeuge zu Greenwagen	77
Tabelle 9: Kostenabschätzung der Mittelklassewagen in [€]	79
Tabelle 10: Emissionsdaten verschiedener Stromnetze [GEMIS 2007]	80
Tabelle 11: Verfügbare erneuerbare Stromförderleistung 2006 [REN21 2007]	89
Tabelle 12: Erneuerbare Energieressourcen in EJ (10^{18} J) pro Jahr (2000)[Keywan 2007]	89
Tabelle 13: Langfristiges technisches Potential von erneuerbaren Energien [Hoogwijk et al. 2008]	90
Tabelle 14: CO ₂ Emissionen in Gramm je Kilometer für verschiedene Verkehrsmittel und Fahrzeugkonzepte nach [Global2000 2009] und eigenen Berechnungen	97

12.3 Formelverzeichnis

Formel 1: "I=PAT" Formel	9
Formel 2: "I=PAT" Formel bzgl. energiebedingter CO ₂ -Emissionen	9
Formel 4: Drehmoment eines Elektromotors	25
Formel 5: Induktionsgesetz	25
Formel 6: Berechnung der Scheinleistung	27
Formel 7: Batterie Lade- Enladewirkungsgrad	48
Formel 8: Speicherkapazitätsberechnung	49
Formel 9: Ladeleistungen am Netz	50
Formel 10: Rekuperationswirkungsgrad	53
Formel 11: Antriebswirkungsgrad	53
Formel 12: Fahrwiderstandsgleichung	57
Formel 13: Batteriemodell Formeln	62
Formel 14: Ladewirkungsgrad	63
Formel 15: Wirkungsgrad für Verbrauchsregelung beim Assistieren	64
Formel 16: Wirkungsgrad für Verbrauchsregelung beim Generieren	64
Formel 17: Skalierung der Emissionen im Kennfeld auf die Nennleistung	72
Formel 18: Widerstand einer Parallelschaltung	73
Formel 19: Spannungsberechnung einer Parallelschaltung	73

12.4 Literaturverzeichnis

- Abe S. 2008: Toyota Hybrid Systems – Review of 10 years of mass production, aus Proceedings: Engine & Environment 2008: 120g CO₂/km – what about driving fun and costs, 20th international AVL Conference “Engine & Environment”, Graz, September 2008.
- ALTAIRNANO 2009: Homepage von ALTAIRNANO, www.altairnano.com, 3.02.2009.
- ASPO 2004: Homepage von Association for the study of Peak Oil&Gas ASPO, <http://www.peakoil.net/uhdsg>, letzter Zugriff 7.4.2009.
- Autoblog 2008: Homepage von Autobloggreen, <http://www.autobloggreen.com/2008/08/26/enerdel-ramping-up-battery-production-to-supply-th-nk>, letzter Zugriff 10.03.2009.
- Back M. 2005: Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen, Dissertation, Universität Karlsruhe, Universitätsverlag Karlsruhe, ISBN 3-86644-031-6, S5 ff, 2005.
- Bauer R., Raste T., Rieth P. 2007: Systemvernetzung von Hybridantrieben, ATZ Elektronik 04/2007.
- Biermann J. 2009: Speicherung elektrischer Energie in Kraftfahrzeugen - Anforderungen und Zielsetzungen aus der Praxis, Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen, 13. Fachkongress Zukunftsenergien E-world energy & water in Essen, 10. Februar 2009
- BMVIT 2007: Verkehr in Zahlen - Ausgabe 2007, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Abteilung V/Infra 5, Wien, November 2007.
- Böcker J. 2007: Skript: Antriebe für umweltfreundliche Fahrzeuge, Universität Paderborn, 21.10.2007.
- Brauner G. 2008: Solare Mobilität 2030 – Machbarkeitsstudie zur solaren Vollversorgung im Verkehrsbereich 2030, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der TU-Wien, 25.Mai.2008.
- Dauensteiner, A. 2002: Der Weg zum Ein-Liter-Auto: Minimierung aller Fahrwiderstände mit neuen Konzepten / Alexander Dauensteiner - Berlin [u.a.]: Springer, 2002.
- Der Standard 2009: Homepage Der Standard, <http://derstandard.at/>, Artikel: „Automarkt bricht in Europa ein“ vom 11.Februar 2009.
- Doka G. 2003: Ressourcenverbrauch und Ressourcenschonung beim Automobil, Kurzfassung eines Vortrages am PUSCH Hasenstrick Seminar am 14. November 2003, Zürich, November 2003, www.doka.ch/Hasenstrick03TextDoka.pdf, download am 15.02.2009.
- Ehrlich & Holdren 1971: Ehrlich, P.R., Holdren, J., 1971. Impact of population growth. Science 171, 1212–1217.
- Eichlseder H. 2005: Verbrennungskraftmaschinen - Vertiefte Ausbildung, Vorlesungsskript, TU-Graz, Februar 2005.
- Eichlseder H., Blassnegger J. 2008: Der zukünftige Ottomotor – überlegener Wettbewerber zum Dieselmotor?, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz.
- EnerDel 2009: Homepage EnerDel Lithium Power Systems, <http://www.enerdel.com/>, Technical Presentation, Letzter Zugriff: 10.3.2009.
- Energy&Transport 2004: Energy&Transport Report 2000 - 2004, by European Commission, ISBN 92-894-7457-2, Brüssel, 5 Juli 2004.
- Engel T. 2007: Plug-in Hybrids – Studie zur Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO₂ – Emission im PKW-Verkehr, ISBN 978-3-89963-327-6, 2007.
- Engel T. 2008: Zeitschrift: Sonnenenergie - Schwerpunkt E3-Mobil, Artikel: Genf, London, Paris, L.A., ISSN-Nr.: 0172-3278, S19f, Nov. - Dez. 2008.
- ETH 2008: Rebound-Effekte allgemein, Vorlesungsunterlagen der Vorlesung Energie und Mobilität an der ETH Zürich, 20.11.08.

- Fechner H. et al. 2007: Technologie-Roadmap für Photovoltaik in Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 28/2007.
- Feustel H. 2005: Leistungselektronik für zukünftige Antriebskonzepte, Vortragsunterlagen - Bayern Innovativ - Kooperationsforum Trends in der Motorentechnologie, Passau, 9.11.2005.
- GEMIS 2007: GEMIS - Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme; Strommix 2007 aus Erzeugungsstruktur 2007, Kraftwerke: GEMIS - Österreich, Umweltbundesamt Wien 2008, gerechnet 02.2009.
- Global2000 2009: Homepage von Global2000, Mobilität, <http://www.global2000.at/site/de/aktivitaeten/verkehr/schulprojekt/article-schulprojekt.htm>, letzter Zugriff 15.04.2009.
- Göschel B. 2004: Einsatzmöglichkeiten für Hybridantriebe in BMW Fahrzeugen, 25. Internationales Wiener Motorensymposium Wien, 30. April 2004.
- Göschel B. 2008: Elektrifizierung Antrieb, Vortragsunterlagen der Vorlesung: Ausgewählte Kapitel der Verbrennungskraftmaschinen, 16.6.2008.
- Göschel B. 2009: Vortrag: Electric Vehicle - The Future of the Automotive Industry? am Frank Stronach Institute in Graz, 24.3.2009.
- Graaf R. 2000: Simulation hybrider Antriebskonzepte mit Kurzzeitspeicher für Kraftfahrzeuge. Dissertation am Institut für Kraftfahrzeugwesen Aachen, RWTH Aachen, 2000.
- Hausberger S. 2003: Simulation of real world vehicle exhaust emissions, Mitteilungen des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz; 82, Graz, 2003. ISBN 3-901351-74-4.
- Hausberger S. 2007: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil II, Abgasmesstechnik und Abgasnachbehandlung, Skriptum, Institut für Verbrennungskraftmaschinen, TU Graz, Dezember 2007.
- Hausberger S. 2008: Straßenverkehrsemissionen und Emissionen sonstiger mobiler Quellen Österreichs für die Jahre 1990 bis 2007; Erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes GmbH; Bericht Nr. FVT-55/08/ Haus Em 10/08-6790 vom 04.11.2008.
- Hausberger S., Rexeis M. 2005: ARTEMIS – Assessment and Reliability of Transport Emission Models in Inventory Systems, Final Report of the WP400 – Heavy Duty Vehicles Emissions; Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU-Graz, 2005
- Herry/Sammer 1998: Mobilitätserhebung Österreichischer Haushalte, Österreichischer Bundesverkehrswegeplan, Arbeitspaket A3-H2, März 1998.
- Hofer Klaus 2006: Elektrotraktion: elektrische Antriebe in Fahrzeugen, ISBN: 978-3-8007-2860-2 Berlin [u.a.], 2006.
- Hofmann P. 2008: Skriptum zur Vorlesung: Hybridfahrzeuge, Auflage SS 2008, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau der TU-Wien, Mai 2008.
- Hohenberg G., Lenzen B 2007: Vorlesung: Hybridtechnologie Antrieb der Zukunft, Verbrennungskraftmaschinen an der TU-Graz, 18.06.2007.
- Hoogwijk M., Graus W. 2008: Global potential of renewable energy sources, by REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, März 2008.
- Hybrid-Autos 2009: Hybrid-Autos.Info Homepage: <http://www.hybrid-autos.info/Technik.html>, 20.01.2009.
- IEAHEV 2009: Homepage International Energy Agency Implementing Agreement on Hybrid and Electric Vehicles, www.ieahev.org, 20.01.2009.
- IFEU 2009: Homepage vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Elektromobilität, <http://www.ifeu.org>, letzter Zugriff 10.03.2009.
- Ingruber R. 2006: Elektrischer Traktionsbetrieb im Kfz - Fachübergreifende Vorlesungsreihe: Innovative Fahrzeugantriebe, Institut für Elektrische Maschinen und Antriebstechnik der TU-Graz, 28.März.2006

- IPCC 2007a: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Working Group I Report "The Physical Science Basis", Summary for Policymakers, www.ipcc.ch, S1 ff, download: 7.02.2009.
- IPCC 2007b: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Working Group III Report "Mitigation of Climate Change", Chapter 5: Transport and its infrastructure, www.ipcc.ch, download: 7.02.2009.
- Jossen A., Weydanz W. 2006: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, ISBN 3-937536-01-9, Neusäß, Ubooks, 2006.
- Jungmeier G., Hausberger S., Canella L. 2003: Treibhausgas-Emissionen von Transportsystemen – Vergleich von biogenen und fossilen Treibstoffen, Graz, 20.03.2003.
- Karl J. 2008: Vorlesung: Energiewirtschaft, Teil 2: Grundlagen der Strom- und Wärmerzeugung, Graz, SS 2008.
- Keywan R. 2007: Vorlesungsunterlagen: Energy systems analysis, an der TU-Graz, Sommersemester 2007.
- Knoflacher H. 2001: Stehzeuge - Fahrzeuge, Der Stau ist kein Verkehrsproblem, ISBN - 3-205-98988-0, Böhlau, Wien, 2001.
- Köhler Uwe 2007: Li-Ion battery systems for the next generation of hybrid electric vehicles, in 19th International AVL Conference "Engine & Environment", September 6th - 7th, Graz, Austria, 2007
- Koller S. 2009: Mitarbeiter des Institutes für Chemische Technologien von Materialien der TU-Graz, persönliches Gespräch am 16.2.2009.
- Kötz R. 2002: Doppelschichtkondensatoren – Technik, Kosten, Perspektiven, Forschungsbereich Allgemeine Energie - Paul Scherrer Institut, Schweiz, 2002.
- Küçükay F. 2008: Präsentationsunterlagen der Vorlesung: Alternativ- und Hybridantriebe am Institut für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig, 2008.
- LEES 2009: Homepage des Laboratory for Electromagnetic and Electronic Systems LEES, <http://lees-web.mit.edu/lees/ultracapacitors.htm>, letzter Zugriff: 11.03.2009.
- Leopold J. 2008: Vortragsunterlagen: Elektrisch unter 40 Gramm?, Veranstaltungsreihe "Mobil im Dialog", Berlin, 22. April 2008.
- Machatscheck M. 2008: Dr. Michael Machatscheck ist Publizist und leitet die Forschungsstelle für Landschafts- und Vegetationskunde, Gedanke aus einem persönlichen Gespräch, Dezember 2008.
- Mohrdieck C. 2007: Are Plug-In-Hybrids the future, in 19th International AVL Conference "Engine & Environment", September 6th - 7th, Graz, Austria, 2007
- Naunin, D. 2007: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, Technik, Strukturen und Entwicklungen; 4. Aufl., Expert-Verl. ISBN-13: 978-3-8169-2625-2, Renningen 2007.
- Pehnt M., Höpfner U., Merten F. 2007: Elektromobilität und erneuerbare Energien, Arbeitspapier Nr. 5 im Rahmen des Projektes „Energiebalance - Optimale Systemlösungen für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz“, Heidelberg, Wuppertal, November 2007.
- Podewils, C. 2007: Organisierte Verschwendung, in Photon, April 2007, Seite 28-35.
- PWC 2009: Auswirkungen von Elektrofahrzeugen auf die Stromwirtschaft Programm- und PR-begleitende Studie, www.pwc.at, 03.2009.
- REN21 2007: Renewables 2007 – Global Status Report, www.ren21.net, 2007.
- Rose K. D., Larivé J. 2008: Fuels and biofuels: future demand and quality, aus Proceedings: Engine & Environment 2008: 120g CO₂/km – what about driving fun and costs, 20th international AVL Conference "Engine & Environment", Graz, September 2008.
- Saft 2009: Homepage von Saft, www.saftbatteries.com, letzter Zugriff: 25.03.2009.
- Schmitzberger M. 2007: Diplomarbeit: Emissionsverhalten von SUV's und Potential einer Hybridisierung, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz, Oktober 2007.

- Standard 2009: Artikel in *Der Standard*, MIT – Forscher verkünden Akku-Revolution, 12.03.2009.
- STATISTIK AUSTRIA_a 2009: Homepage Statistik Austria, www.statistik.at, Datei: fahrleistungen_und_treibstoffeinsatz_privater_pkw_nach_bundeslaender_2000__034835.pdf, download: 7.02.2009.
- Statistik Austria_b 2009: Homepage Statistik Austria, www.statistik.at, letzter Zugriff: 13.03.2009.
- Tesla 2009: Homepage von TESLA MOTORS, <http://www.teslamotors.com>, Owners Manual, letzter Zugriff 10.03.2009.
- Topp H. 2003: Internationales Verkehrswesen, Artikel: Verkehr im Jahr 2030, S.456f., 10/2003.
- TREATISE 2008: TREATISE Homepage, <http://www.treatise.eu.com/downloads-materialien.html>, Alternative und saubere Treibstoffe & Antriebe - Ein Überblick über Treibstoffe und Technologien im Straßenverkehr aus ökologischer Perspektive, August 2005, 23.12.2008
- Umweltbundesamt 2008: Klimaschutzbericht 2008, www.umweltbundesamt.at, ISBN 3-85457-947-0, Wien, 2008
- UNEP 2009: GRID-Arendal Homepage, Datei: <http://www.grida.no/publications/vg/climate/page/3066.aspx>, Download: 2.03.2009.
- VAV 2009: Homepage der VAV Versicherungs-Aktiengesellschaft, www.vav.at, Letzter Zugriff 28.04.2009.
- VCÖ 2008: Homepage des Verkehrsclub Österreich, <http://www.vcoe.at/start.asp?ID=4108&b=92>, Letzter Zugriff 15.04.2009.
- VDI Bericht 1998: VDI - Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge, Rahmenbedingungen und Zukunft des E-Mobils aus der Sicht eines Herstellers von Quissek F., Lück P., Köhle S., Wolfsburg, S1f, 1998.
- VDI Bericht_a 2006: VDI - Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Innovative Fahrzeugantriebe, Bedeutung der Komponentenauslegung für den Nutzen eines hybriden Antriebssystems von Casals P. [et al.], S121, ISBN 3-18-091975-2, Düsseldorf, 9./10. November 2006.
- VDI Bericht_a 2007: VDI - Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug, 13. Internationaler Kongress, ISBN- 978-3-18-092000-9, Neue Energiespeicherkonzepte im Kraftfahrzeug von Schneuwly A. [et al.], Baden-Baden, Oktober 2007.
- VDI Bericht_a 2008: VDI - Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Innovative Fahrzeugantriebe, ISBN 987-3-18-092030-6, Thermoelektrische Modellierung eines Lithium-Ionen-Energiespeichers für den Fahrzeugeinsatz von Morawietz L. [et al.], Dresden, November 2008.
- VDI Bericht_b 2007: VDI - Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug, 13. Internationaler Kongress, ISBN- 978-3-18-092000-9, Intelligente Lithium-Ionen Hochleistungsbatterie für Traktionsanwendungen von Decius N. [et al.], Baden-Baden, Oktober 2007.
- VDI Bericht_b 2008: VDI - Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Innovative Fahrzeugantriebe, ISBN 987-3-18-092030-6, Lithium-Ionen Batteriesysteme für Hybrid- und Elektrofahrzeuge von Grotendorst J. [et al.], Dresden, November 2008.
- VDI Bericht_b, 2006: VDI - Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Innovative Fahrzeugantriebe, Elektrisch leistungsverzweigte Stufenlosgetriebe für Hybridfahrzeuge von Canders W. R. [et al.], S195, Düsseldorf, 9./10. November 2006.
- VDI Bericht_c, 2006: VDI - Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Innovative Fahrzeugantriebe, Energiespeichersysteme in Lithium-Ionen Technologie für Hybridantriebe

- von MAGNA STEYR von Heidenbauer O. [et al.], S485, Düsseldorf, 9/10. November 2006.
- Wallentowitz H. 2003: Unkonventionelle Kraftfahrzeugantriebe. Schriftenreihe Automobiltechnik, Vorlesungsumdruck, Institut für Kraftfahrwesen Aachen ifa RWTH, 2003.
- Wallentowitz H. et al. 1999: Strukturvarianten von Hybridantrieben, In VDI-Bericht 1459: Hybridantriebe, 1999.
- Weidauer, J. 2008: Elektrische Antriebstechnik : Grundlagen, Auslegung, Anwendungen, Lösungen, ISBN 978-3-89578-308-1, S65ff, Erlangen, 2008.
- Wiki_1 2009: Wikipedia Homepage:
http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromotor#Elektromotoren_in_mobilen_Anwendungen,
 Letzter Zugriff: 13.01.2009
- Wiki_2 2009: Wikipedia Homepage: <http://de.wikipedia.org/wiki/Erdatmosph%C3%A4re>,
 Letzter Zugriff: 02.03.2009
- Wiki_3 2009: Wikipedia Homepage: <http://de.wikipedia.org/wiki/Asynchronmotor>, Letzter Zugriff: 07.03.2009.
- Willberger J. 2009: Persönliches Gespräch mit Johann Willberger, Mitarbeiter des Instituts für Fahrzeugtechnik an der TU-Graz am 05.03.2009.
- Winter M., Möller K. 2006: Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien, Script zum Praktikum Anorganisch-Chemische Technologie, am Institut für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe der TU-Graz, Februar 2006.

13 Anhang

Anhang 1: Fahrzeugkategoriedaten der Mittelklassewagen

Fahrzeugbezeichnung	Mittelklassewagen					Vergleichs-FZ
	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV	VW Golf 103kW ¹⁾
Type	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	VKM
Anzahl der Sitzplätze	5	5	5	5	5	5
Fahrzeugmasse [kg]	1300	1317	1342	1368	1378	1299
Beladung [kg]	0	0	0	0	0	
max. Zuladung [kg]	600	583	558	532	522	611
Zulässiges Gesamtgewicht [kg]	1900	1900	1900	1900	1900	1910
Luftwiderstandswert Cw [-]	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Querschnittsfläche [m²]	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22
Trägheitsmoment Motor [kg m²]	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5
Reifengewicht (4x) [kg Reifen]	40	40	40	40	40	40
Getriebe [kg m²]	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Raddurchmesser [m]	0.6343	0.6343	0.6343	0.6343	0.6343	
Achsübersetzung	3.684	3.684	3.684	3.684	3.684	
Übersetzungsv. 1 Gang [-]	3.769	3.769	3.769	3.769		
Übersetzungsv. 2 Gang [-]	2.087	2.087	2.087	2.087		
Übersetzungsv. 3 Gang [-]	1.324	1.324	1.324	1.324		
Übersetzungsv. 4 Gang [-]	0.919	0.919	0.919	0.919		
Übersetzungsv. 5 Gang [-]	0.712	0.712	0.712	0.712		
Übersetzungsv. 6 Gang [-]	0.598	0.598	0.598	0.598		
Verbrennungsmotor	diesel	diesel	diesel	diesel		diesel
VKM Nennleistung [kW]	103	76	76	53		103
VKM Nenndrehzahl [rpm]	4200	4200	4200	4200		4200
max. Drehmoment [Nm]	320	320	320	~95		320
Drehmoment bei Drehzahl [rpm]	1750 - 2500	1750 - 2500	1750 - 2500	1750 - 2500		1750 - 2500
Leerlaufdrehzahl [rpm]	800	800	800	800		800
Getriebart (0=man; 1=auto):	manuell	manuell	manuell	manuell	auto	manuell
Elektromotor						
Typ		ASM	ASM	ASM	ASM	
Nennleistung [kW]		27	27	50	76	
Max. Leistung [kW]		54 (10Sek)	54 (10Sek)	100 (10Sek)	152 (10Sek)	
Batterie						
Typ der Li-Ion Batterie (Saft)		VL12 V	VL12 V	VL 45 E	VL 45 E	
Zellen-Kapazität [Wh/Ah]		74	74	149	149	
Zellen -Dauerleistung [W]		1500	1500	664	664	
Zellenanzahl		14	60	68	136	
Kapazität [kWh]		1.036	4.440	10.132	20.264	
Leistung [KW]		21.0	90.0	45.2	90.3	
Zellen-Leerlaufspannung [V]		3.65	3.65	3.60	3.60	
"Mittlere-Spannung" [V]		51.10	219.00	244.80	489.60	
Zellen-Innenwiderstand [mOhm]		4	4	4	4	
Ges. Innenwiderstand [mOhm]		56	240	272	544	
Nutzbarer SOC-Hub [%]		40 (40-80)	40 (40-80)	80 (10-90)	80 (10-90)	
Zellen-Gewicht [kg]		0.64	0.64	1.07	1.07	
Spezifische Energie [Wh/kg]		115.63	115.63	139.25	139.25	
Batterie-Gesamtgewicht [kg]		8.96	38.40	72.76	145.52	

1) http://www.volkswagen.de/vwcms/master_public/virtualmaster/de3/modelle/golf/golf/zahlen___fakten/daten.detail.1.3.html

Anhang 2: Fahrzeugkategoriedaten der Kleinwagen

	Kleinwagen					Vergleichs-FZ
Fahrzeugbezeichnung	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV	Audi A2 1,2l TDI ²⁾
Type	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	VKM
Anzahl der Sitzplätze	4	4	4	4	4	4
Fahrzeugmasse [kg]	900	918	936	968	993	855
Beladung [kg]	0	0	0	0	0	
max. Zuladung [kg]	350	332	314	282	257	390
Zulässiges Gesamtgewicht [kg]	1250	1250	1250	1250	1250	1245
Luftwiderstandswert Cw [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Querschnittsfläche [m²]	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18
Trägheitsmoment Motor [kg m²]	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	
Reifengewicht (4x) [kg Reifen]	35	35	35	35	35	
Getriebe [kg m²]	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	
Raddurchmesser [m]	0.5876	0.5876	0.5876	0.5876	0.5876	
Achsübersetzung	3.3333	3.3333	3.3333	3.3333	3.3333	
Übersetzungsv. 1 Gang [-]	3.455	3.455	3.455	3.455		
Übersetzungsv. 2 Gang [-]	1.955	1.955	1.955	1.955		
Übersetzungsv. 3 Gang [-]	1.182	1.182	1.182	1.182		
Übersetzungsv. 4 Gang [-]	0.813	0.813	0.813	0.813		
Übersetzungsv. 5 Gang [-]	0.642	0.642	0.642	0.642		
Übersetzungsv. 6 Gang [-]						
Verbrennungskraftmotor	diesel	diesel	diesel	diesel		diesel
VKM Nennleistung [kW]	45	30	30	15		45
VKM Nenndrehzahl [rpm]	4000	4000	4000	4000		4000
max. Drehmoment [Nm]	140	140	140	~65		140
Drehmoment bei Drehzahl [rpm]	1800-2400	1800-2400	1800-2400	1800-2400		1800-2400
Leerlaufdrehzahl [rpm]						
Getriebeart (0=man; 1=auto):	auto	auto	auto	auto		auto
Elektromotor						
Typ		ASM	ASM	ASM	ASM	
Nennleistung [kW]		15	15	30	30	
Max. Leistung [kW]		30(10Sek)	30 (10Sek)	60 (10Sek)	60 (10Sek)	
Batterie						
Typ der Li-Ion Batterie (Saft)		VL12 V	VL12 V	VL 45 E	VL 45 E	
Zellen-Kapazität [Wh/Ah]		74	74	149	149	
Zellen -Dauerleistung [W]		1500	1500	664	664	
Zellenanzahl		14	50	60	122	
Kapazität [kWh]		1.036	3.700	8.940	18.178	
Leistung [KW]		21.0	75.0	39.8	81.0	
Zellen-Leerlaufspannung [V]		3.65	3.65	3.60	3.60	
"Mittlere-Spannung" [V]		51.10	182.50	216.00	439.20	
Zellen-Innenwiderstand [mOhm]		4	4	4	4	
Ges. Innenwiderstand [mOhm]		56	200	240	488	
Nutzbarer SOC-Hub [%]		40 (45-75)	40 (40-80)	80 (10-90)	80 (10-90)	
Zellen-Gewicht [kg]		0.64	0.64	1.07	1.07	
Spezifische Energie [Wh/kg]		115.63	115.63	139.25	139.25	
Batterie-Gesamtgewicht [kg]		8.96	32.00	64.20	130.54	

2) <http://www.audia2museum.de/4.html>

Anhang 3: Fahrzeugkategoriedaten der Greenwagen

	Greenwagen ³⁾				
Fahrzeugbezeichnung	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV
Type	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto
Anzahl der Sitzplätze	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2
Fahrzeugmasse [kg]	650	667	679	715	750
Beladung [kg]	0	0	0	0	0
max. Zuladung [kg]	200	183	171	135	100
Zulässiges Gesamtgewicht [kg]	850	850	850	850	850
Luftwiderstandswert Cw [-]	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Querschnittsfläche [m²]	2	2	2	2	2
Trägheitsmoment Motor [kg m²]	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Reifengewicht (4x) [kg Reifen]	30	30	30	30	30
Getriebe [kg m²]	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Raddurchmesser [m]	0.5876	0.5876	0.5876	0.5876	0.5876
Achsübersetzung	5	5	5	5	5
Übersetzungsv. 1 Gang [-]	3.455	3.455	3.455	3.455	
Übersetzungsv. 2 Gang [-]	1.955	1.955	1.955	1.955	
Übersetzungsv. 3 Gang [-]	1.182	1.182	1.182	1.182	
Übersetzungsv. 4 Gang [-]	0.813	0.813	0.813	0.813	
Übersetzungsv. 5 Gang [-]	0.642	0.642	0.642	0.642	
Übersetzungsv. 6 Gang [-]					
Verbrennungskraftmotor		diesel	diesel	diesel	
VKM Nennleistung [kW]	33	21	21	10	
VKM Nenndrehzahl [rpm]	3800	3800	3800	3800	
max. Drehmoment [Nm]	110	110	110	110	
Drehmoment bei Drehzahl [rpm]	2000-2500	2000-2500	2000-2500	2000-2500	
Leerlaufdrehzahl [rpm]					
Getriebeart (0=man; 1=auto):	auto	auto	auto	auto	
Elektromotor					
Typ					
Nennleistung [kW]		12	12	23	23
Max. Leistung [kW]		24 (10Sek)	24 (10Sek)	46 (10Sek)	46 (10Sek)
Batterie					
Typ der Li-Ion Batterie (Saft)		VL12 V	VL12 V	VL 45 E	VL 45 E
Zellen-Kapazität [Wh/Ah]		74	74	149	149
Zellen -Dauerleistung [W]		1500	1500	664	664
Zellenanzahl		14	40	57	114
Kapazität [kWh]		1.036	2.960	8.493	16.986
Leistung [KW]		21.0	60.0	37.8	75.7
Zellen-Leerlaufspannung [V]		3.65	3.65	3.60	3.60
"Mittlere-Spannung" [V]		51.10	146.00	205.20	410.40
Zellen-Innenwiderstand [mOhm]		4	4	4	4
Ges. Innenwiderstand [mOhm]		56	160	228	456
Nutzbarer SOC-Hub [%]		40 (45-75)	40 (40-80)	80 (10-90)	80 (10-90)
Zellen-Gewicht [kg]		0.64	0.64	1.07	1.07
Spezifische Energie [Wh/kg]		115.63	115.63	139.25	139.25
Batterie-Gesamtgewicht [kg]		8.96	25.60	60.99	121.98

3) ein Kompromiss aus maximaler technischer Machbarkeit zu Markteinführungspotential (Preis)

Fahrzeugbezeichnung

Type

Anzahl der Sitzplätze

Fahrzeugmasse [kg]

Beladung [kg]

max. Zuladung [kg]

Zulässiges Gesamtgewicht [kg]

Luftwiderstandswert Cw [-]

Querschnittsfläche [m²]

Trägheitsmoment Motor [kg m²]

Reifengewicht (4x) [kg Reifen]

Getriebe [kg m²]

Raddurchmesser [m]

Achsübersetzung

Übersetzungsv. 1 Gang [-]

Übersetzungsv. 2 Gang [-]

Übersetzungsv. 3 Gang [-]

Übersetzungsv. 4 Gang [-]

Übersetzungsv. 5 Gang [-]

Übersetzungsv. 6 Gang [-]

Verbrennungskraftmotor

VKM Nennleistung [kW]

VKM Nenndrehzahl [rpm]

max. Drehmoment [Nm]

Drehmoment bei Drehzahl [rpm]

Leerlaufdrehzahl [rpm]

Getriebeart (0=man; 1=auto):

Elektromotor

Typ

Nennleistung [kW]

Max. Leistung [kW]

Batterie

Typ der Li-Ion Batterie

Zellen-Kapazität [Wh/Ah]

Zellen -Dauerleistung [W]

Zellenanzahl

Kapazität [kWh]

Leistung [KW]

Zellen-Leerlaufspannung [V]

"Mittlere-Spannung" [V]

Zellen-Innenwiderstand [mOhm]

Ges. Innenwiderstand [mOhm]

Nutzbarer SOC-Hub [%]

Zellen-Gewicht [kg]

Spezifische Energie [Wh/kg]

Batterie-Gesamtgewicht [kg]

	Vergleichsfahrzeuge			
BEV	Smart Fortwo ⁵⁾	VW 1-Liter-Auto ⁶⁾	Twingo Electrica ⁷⁾	LOREMO-EV ⁸⁾
EV_opt ⁴⁾	VKM	VKM	BEV	BEV
2	2	2	4	2+2
450	799	290	939	450 (?)
0	0	0	0	0
150	251	200 (?)	327	150
600	1050	490 (?)	1262	<600
0.2	0.36	0.159	~0.25	0.2
1.1			~1.8	1.1
0.3				
30				
0.06				
0.5876				
5				
	diesel			
	33	6.3		
	3800	4000		
	110			
	2000-2500			
	auto			
			200-125W	
18			15 / 50 Nm	20
36 (10 Sek)			30 (41) / 124 nm	
Saft VL 45 E			ZEBRA (NaCl+Ni) Z55T-263-ML3X-76	Li-Ion
149			76	
664				
57				
8.493			20.496	
37.8				
3.60			263	
205.20				
4				
228				
80 (10 - 90)				
1.07			183	
139.25			112	
60.99				

4) Technisch machbar (Preis bleibt unberücksichtigt)

5) www.smart.com

6) http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/content/de/innovation/research_vehicles/1_litre_car.html

7) www.mes-dea.ch

8) <http://evolution.loremo.com>

Anhang 4: Gewichtskalkulation für die Fahrzeugkonzepte

	Mittelklassewagen				
Fahrzeugbezeichnung	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV
Type	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto
Fahrzeugmasse [kg]	1300	1317	1342	1368	1378
Beladung [kg]	0	0	0	0	0
max. Zuladung [kg]	600	583	558	532	522
Zulässiges Gesamtgewicht [kg]	1900	1900	1900	1900	1900

VKM Nennleistung [kW]	103	76	76	53	
Emot Nennleistung [kW]		27	27	50	76
Gewicht VKM [kg]	154.5	114	114	79.5	0
Gewicht Emot [kg]	0	54	54	100	152
Abgasnachbehandlung [kg]		-5	-5	-10	-20
Batterie-Gesamtgewicht [kg]		8.96	38.40	72.76	145.52
Leistungselektronik [kg]		5	5	5	5
Tankinhalt + Tank [kg]	50	45	40	25	
Zusatzgewicht Gesamt		17	42	68	78

	Kleinwagen				
Fahrzeugbezeichnung	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV
Type	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto
Fahrzeugmasse [kg]	900	918	936	968	993
Beladung [kg]	0	0	0	0	0
max. Zuladung [kg]	350	332	314	282	257
Zulässiges Gesamtgewicht [kg]	1250	1250	1250	1250	1250

VKM Nennleistung [kW]	45	30	30	15	
Emot Nennleistung [kW]		15	15	30	30
Gewicht VKM [kg]	67.5	45	45	22.5	0
Gewicht Emot [kg]	0	30	30	60	60
Abgasnachbehandlung [kg]		-3	-3	-7	-10
Batterie-Gesamtgewicht [kg]		8.96	32.00	64.20	130.54
Leistungselektronik [kg]		5	5	5	5
Tankinhalt + Tank [kg]	25	25	20	15	
Zusatzgewicht Gesamt		18	36	68	93

	"Greenwagen"					
Fahrzeugbezeichnung	VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV	BEV
Type	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	EV_opt
Fahrzeugmasse [kg]	650	667	679	715	750	450
Beladung [kg]	0	0	0	0	0	0
max. Zuladung [kg]	200	183	171	135	100	150
Zulässiges Gesamtgewicht [kg]	850	850	850	850	850	600

VKM Nennleistung [kW]	33	21	21	10		
Emot Nennleistung [kW]		12	12	23	23	18
Gewicht VKM [kg]	49.5	31.5	31.5	15	0	0
Gewicht Emot [kg]	0	24	24	46	46	36
Abgasnachbehandlung [kg]		-3	-3	-6	-8	-8
Batterie-Gesamtgewicht [kg]		8.96	25.60	60.99	121.98	121.98
Leistungselektronik [kg]		5	5	5	5	5
Tankinhalt + Tank [kg]	15	15	10	8		
Zusatzgewicht Gesamt		17	29	65	100	



Rechargeable lithium-ion battery VL12 V - Very high power cell

Optimized for 2 C to 100 C continuous discharge or up to 250 C pulse power



Benefits

- Excellent power density and specific power
- Power capability at cold temperatures
- 100% columbic efficiency
- Completely maintenance-free
- Operates in any orientation
- Long cycle life:
 - > 80% of initial capacity remaining after 2,000 cycles at 100% DOD
 - > 500,000 cycles during shallow cycling (50% SOC Δ ~3% DOD)
- Projected 15 years calendar life for military hybrid electric vehicle applications
- No memory effect
- Integral safety vent

Main applications

- Military hybrid electric vehicles
- Very high pulse power applications
- Defense

Key features

- Graphite-based negative
- Nickel-oxide based positive
- Hermetically-sealed cells
- Sold only as assembled batteries
- Incorporating electronics for performance efficiency:
 - Charge/floating/discharge management
 - Cell balancing

Cell electrical characteristics

Nominal voltage	3.6 V
Nominal capacity at C rate at 4.1 V/2.5 V & 25° C	12 Ah
Maximum discharge current at 25° C:	
Continuous	1,500 A
2 s Pulse	2,200 A
100 ms Pulse	3,200 A
Specific energy	74 Wh/kg
Energy density ¹	175 Wh/l
Specific power at 25° C, 100% SOC (2.5 V)	
	6,000 W/kg*
	8,000 W/kg**
	12,000 W/kg***
Power density ¹ (25° C/peak pulse/100% SOC)	
	14,000 W/l*
	19,000 W/l**
	29,000 W/l***
2 s pulse at -30° C at 50% SOC (1.9 V)	2,150 W/kg

Cell mechanical characteristics

Diameter max	47 mm
Height max ¹	173 mm
Mass max	0.64 kg
Volume max ¹	0.27 l

Cell operating conditions

Lower voltage limit for discharge:	2.5/2.0 V
Continuous (-20° C to +45° C) pulse	1.9 V
Pulse	

Charging method	Constant current/Constant voltage (CCCV)
Charging voltage	4.1 $\pm$ 0.04 V
Recommended continuous charge current at 25° C	C/1 (2.5 hours)
End of charge detection	100 mA

Total charging time:	
15° C (80% SOC)	20 minutes
5° C (85% SOC)	50 minutes

Operating temperature	
Charge	+5° C to +35° C
Discharge	-40° C to +60° C

Storage and transportation temperature	-50° C to +65° C
¹ includes terminals	
*18 s pulse (2.5 V)	
**2 s pulse (2.5 V)	
***200 ms pulse (2.5 V)	



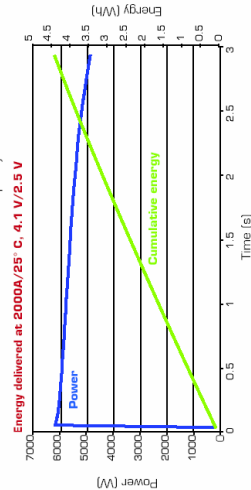
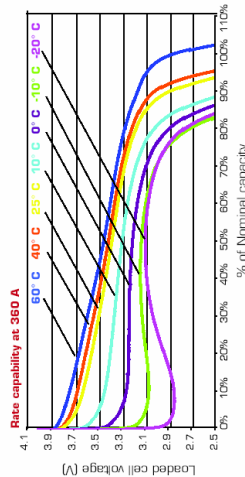
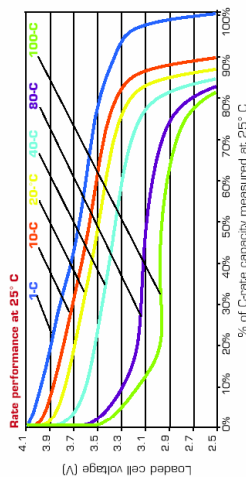
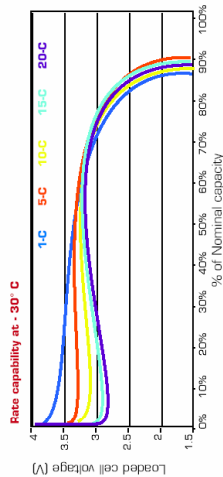
February 2007



VL12 V

Battery-level safety

- Incorporation of several levels of redundant safety features to prevent abuse conditions such as overcharge, over-discharge, and short-circuit including:
 - Battery protection controller at battery pack level
 - CANProbe at module level
 - Vent and shutdown separator at cell level



Doc N° 5405G-2-0207
Edition: February 2007

Data in this document are subject to change without notice and become contractual only after written confirmation by Saft.

Published by the Communications Department

Photo credit: Saft

Produced by Saft America, Inc. - Space & Defense Division



High energy Li-ion VL 45 E cell



High energy lithium-ion cell VL 45 E cell

SAFT VL E cell is highly suited to any charge/discharge cycling application that demands a battery with drastically reduced weight and volume. This cell is proposed in SAFT modules or customized battery system constructions.

SAFT's Battery system :
Individual lithium-ion cells need to be mechanically and electrically integrated into battery systems to operate properly. The battery system include electronic devices for performance, thermal and safety management specific to each application.

Features

- Very high specific energy
- Maintenance free
- Excellent cycle and calendar life

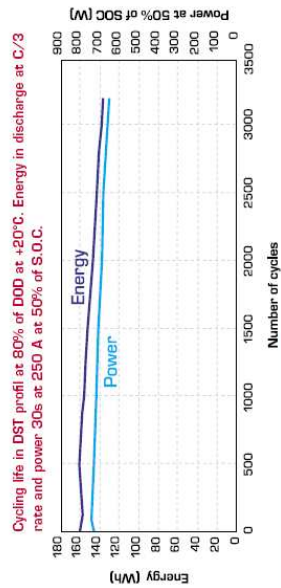
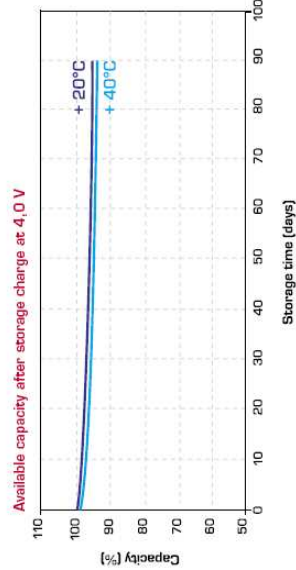
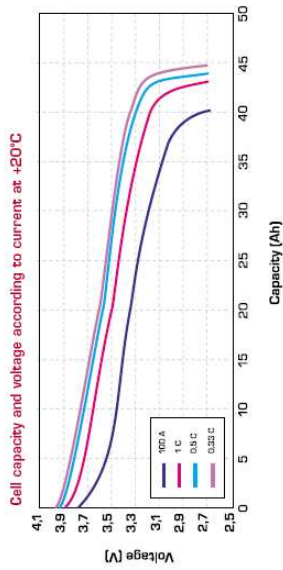
Applications

- Electric and hybrid vehicles
- Telecommunication networks
- Stationary
- Space and Defence
- Any application requiring high energy storage capability

Technology

- Graphite-based anode
- Nickel oxide-based cathode
- Electrolyte: blend of carbonate solvents + LiPF₆

VL 45 E	
Electrical characteristics	
Nominal voltage (V)	3.6
Average capacity C/3 after charge to 4.0 V/cell (Ah)	45
Minimum capacity C/3 after charge to 4.0 V/cell (Ah)	42
Specific energy after charge to 4.0 V/cell (Wh/kg)	149
Energy density after charge to 4.0 V/cell (Wh/dm ³)	313
Specific power (30s peak/50% DOD) (W/kg)	664
Power density (30s peak/50% DOD) (W/dm ³)	1392
Mechanical characteristics	
Diameter (mm)	54.3
Height (mm)	222
Typical weight (kg)	1.07
Volume (dm ³)	0.51
Voltage limits	
Charge (V)	4.0 (4.1 for peak)
Discharge (V)	2.7 (2.3 for peak)
Current limits	
Max continuous current (A)	100
Max peak current during 30 s (A)	250



SAFT
Communication Department
12, rue Sadi Carnot
93170 Bagnolet - France
Phone: +33 (0)1 49 93 19 18
Fax: +33 (0)1 49 93 19 68
www.saftbatteries.com



DOC N° 54041-2-0205

Edition: March 2005

Data in this document are subject to change without notice. The manufacturer only after written confirmation by SAFT.

Photo credit: Stockland

Société anonyme au capital de 31 844 000 €

RCS Batory B 383 705 873

Prepared by JAC/HE & CO



Anhang 6: Detaillierte Simulationsergebnisse

Mittelklassewagen NEDC						
	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	Bemerkung
Verbrauch VKM [l / 100 km]	5.00	3.24	0.72	0.00	0.00	mit 9.8kWh/l HEVΔSOC<0.002
Verbrauch VKM [kWh / 100 km]	49.04	31.71	7.09	0.00	0.00	
Verbrauch Elektrisch [kWh / 100 km]			11.10	16.23	16.23	
Summe Verbrauch	49.04	31.71	18.19	16.23	16.23	
Einsparung zu VKM in [%]		-35.34	-62.91	-66.91	-66.91	
CO2 Emissionen Treibstoff [g CO2/km]	132.62	85.75	19.17	0.00	0.00	Diesel 2.65kgCO2/l) mit 352.7gCO2/kWh
CO2 Emissionen Strom [g CO2/km]			39.15	55.70	57.23	
Summe CO2 Emissionen	132.62	85.75	58.32	55.70	57.23	
Einsparung zu VKM in [%]		-35.34	-56.02	-58.00	-56.85	
NOx Emissionen Treibstoff [g NOx/km]	0.63	0.64	0.16	0.00	0.00	mit 0.4gNOx/kWh
NOx Emissionen Strom [g NOx/km]			0.04	0.06	0.06	
Summe NOx Emissionen	0.63	0.64	0.20	0.06	0.06	
Einsparung zu VKM in [%]		1.28	-67.85	-89.72	-89.72	
HC Emissionen Treibstoff [g HC/km]	0.0069	0.0025	0.0004	0.0000	0.0000	keine Daten verf.
HC Emissionen Strom [g HC/km]						
Summe HC Emissionen	0.0069	0.0025	0.0004	0.0000	0.0000	
Einsparung zu VKM in [%]		-64.26	-94.84	-100.00	-100.00	
CO Emissionen Treibstoff [g CO/km]	0.0032	0.0013	0.0002	0.0000	0.0000	mit 0.31gCO/kWh
CO Emissionen Strom [g CO/km]			0.0344	0.0503	0.0503	
Summe CO Emissionen	0.0032	0.0013	0.0346	0.0503	0.0503	
Einsparung zu VKM in [%]		-59.61	996.04	1492.69	1492.69	
PM Emissionen Treibstoff [g PM/km]	0.0005	0.0003	0.0001	0.00000	0.0000	Staub 0.03g/kWh
PM Emissionen Strom [g PM/km]			0.0033	0.0049	0.0049	
Summe PM Emissionen	0.0005	0.0003	0.0034	0.0049	0.0049	
Einsparung zu VKM in [%]		-50.67	563.91	853.87	853.87	

Mittelklassewagen CADC						
	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	Bemerkung
Verbrauch VKM [l / 100 km]	4.86	3.92	3.29	1.39	0.00	mit 9.8kWh/l bei HEV ΔSOC < 0.002
Verbrauch VKM [kWh / 100 km]	47.68	38.39	32.28	13.66	0.00	
Verbrauch Elektrisch [kWh / 100 km]			2.64	12.96	20.42	
Summe Verbrauch	47.68	38.39	34.91	26.62	20.42	
Einsparung zu VKM in [%]		-19.48	-26.77	-44.16	-57.16	
CO2 Emissionen Treibstoff [g CO2/km]	128.92	103.80	87.28	36.94	0.00	Diesel (2.65kgCO2/l) mit 352.7gCO2/kWh
CO2 Emissionen Strom [g CO2/km]			9.30	45.72	72.03	
Summe CO2 Emissionen	128.92	103.80	96.58	82.66	72.03	
Einsparung zu VKM in [%]		-19.48	-25.08	-35.88	-44.12	
NOx Emissionen Treibstoff [g NOx/km]	0.80	0.86	0.74	0.35	0.00	mit 0.4gNOx/kWh
NOx Emissionen Strom [g NOx/km]			0.01	0.05	0.08	
Summe NOx Emissionen	0.80	0.86	0.75	0.40	0.08	
Einsparung zu VKM in [%]		8.18	-6.31	-49.88	-89.75	
HC Emissionen Treibstoff [g HC/km]	0.0043	0.0020	0.0016	0.0005	0.0000	keine Daten verf.
HC Emissionen Strom [g HC/km]						
Summe HC Emissionen	0.0043	0.0020	0.0016	0.0005	0.0000	
Einsparung zu VKM in [%]		-52.42	-62.33	-88.22	-100.00	
CO Emissionen Treibstoff [g CO/km]	0.0021	0.0012	0.0009	0.0004	0.0000	mit 0.31gCO/kWh
CO Emissionen Strom [g CO/km]			0.0082	0.0402	0.0633	
Summe CO Emissionen	0.0021	0.0012	0.0091	0.0405	0.0633	
Einsparung zu VKM in [%]		-43.83	335.17	1834.67	2921.40	
PM Emissionen Treibstoff [g PM/km]	0.0005	0.0003	0.0002	0.00008	0.0000	mit Staub 0.03g/kWh
PM Emissionen Strom [g PM/km]			0.0008	0.0039	0.0061	
Summe PM Emissionen	0.0005	0.0003	0.0010	0.0040	0.0061	
Einsparung zu VKM in [%]		-37.74	121.50	750.23	1211.33	

Kleinwagen NEDC					
VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	Bemerkung
Verbrauch VKM [l / 100 km]	2.80	2.37	1.62	0.00	0.00
Verbrauch VKM [kWh / 100 km]	27.44	23.20	15.91	0.00	0.00
Verbrauch Elektrisch [kWh / 100 km]			2.75	12.80	12.60
Summe Verbrauch	27.44	23.20	18.65	12.80	12.60
Einsparung zu VKM in [%]		-15.43	-32.01	-53.36	-54.09
CO2 Emissionen Treibstoff [g CO2/km]	74.20	62.75	43.01	0.00	0.00
CO2 Emissionen Strom [g CO2/km]			9.69	45.14	44.43
Summe CO2 Emissionen	74.20	62.75	52.71	45.14	44.43
Einsparung zu VKM in [%]		-15.43	-28.97	-39.17	-40.12
NOx Emissionen Treibstoff [g NOx/km]	0.51	0.52	0.38	0.00	0.00
NOx Emissionen Strom [g NOx/km]			0.01	0.05	0.05
Summe NOx Emissionen	0.51	0.52	0.39	0.05	0.05
Einsparung zu VKM in [%]		1.92	-23.01	-89.88	-90.04
HC Emissionen Treibstoff [g HC/km]	0.0032	0.0012	0.0010	0.0000	0.0000
HC Emissionen Strom [g HC/km]					
Summe HC Emissionen	0.0032	0.0012	0.0010	0.0000	0.0000
Einsparung zu VKM in [%]		-60.82	-70.00	-100.00	-100.00
CO Emissionen Treibstoff [g CO/km]	0.0015	0.0008	0.0006	0.0000	0.0000
CO Emissionen Strom [g CO/km]			0.0085	0.0397	0.0391
Summe CO Emissionen	0.0015	0.0008	0.0091	0.0397	0.0391
Einsparung zu VKM in [%]		-49.13	509.80	2559.48	2517.87
PM Emissionen Treibstoff [g PM/km]	0.0002	0.0001	0.0001	0.00000	0.0000
PM Emissionen Strom [g PM/km]			0.0008	0.0038	0.0038
Summe PM Emissionen	0.0002	0.0001	0.0009	0.0038	0.0038
Einsparung zu VKM in [%]		-33.82	313.46	1599.65	1573.06

mit 9.8kWh/l
bei HEV ΔSOC <
0.002

Diesel (2.65kgCO2/l)
mit 352.7gCO2/kWh

mit 0.4gNOx/kWh

keine Daten verf.

mit 0.31gCO/kWh

mit Staub 0.03g/kWh

Kleinwagen CADC					
VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	Bemerkung
Verbrauch VKM [l / 100 km]	3.36	3.47	2.69	0.53	0.00
Verbrauch VKM [kWh / 100 km]	32.92	34.04	26.40	5.17	0.00
Verbrauch Elektrisch [kWh / 100 km]			2.38	14.34	16.61
Summe Verbrauch	32.92	34.04	28.78	19.50	16.61
Einsparung zu VKM in [%]		3.40	-12.59	-40.76	-49.56
CO2 Emissionen Treibstoff [g CO2/km]	89.03	92.06	71.38	13.97	0.00
CO2 Emissionen Strom [g CO2/km]			8.40	50.57	58.58
Summe CO2 Emissionen	89.03	92.06	79.78	64.54	58.58
Einsparung zu VKM in [%]		3.40	-10.39	-27.50	-34.21
NOx Emissionen Treibstoff [g NOx/km]	0.75	0.73	0.58	0.12	0.00
NOx Emissionen Strom [g NOx/km]			0.01	0.06	0.07
Summe NOx Emissionen	0.75	0.73	0.59	0.17	0.07
Einsparung zu VKM in [%]		-2.45	-20.49	-76.59	-91.10
HC Emissionen Treibstoff [g HC/km]	0.0020	0.0014	0.0011	0.0002	0.0000
HC Emissionen Strom [g HC/km]					
Summe HC Emissionen	0.0020	0.0014	0.0011	0.0002	0.0000
Einsparung zu VKM in [%]		-32.49	-45.81	-90.61	-100.00
CO Emissionen Treibstoff [g CO/km]	0.0011	0.0009	0.0007	0.0001	0.0000
CO Emissionen Strom [g CO/km]			0.0074	0.0445	0.0515
Summe CO Emissionen	0.0011	0.0009	0.0081	0.0446	0.0515
Einsparung zu VKM in [%]		-20.69	612.17	3816.79	4423.12
PM Emissionen Treibstoff [g PM/km]	0.0002	0.0002	0.0002	0.00003	0.0000
PM Emissionen Strom [g PM/km]			0.0007	0.0043	0.0050
Summe PM Emissionen	0.0002	0.0002	0.0009	0.0043	0.0050
Einsparung zu VKM in [%]		-6.36	268.16	1669.58	1933.74

mit 9.8kWh/l
bei HEV ΔSOC <
0.002

Diesel (2.65kgCO2/l)
mit 352.7gCO2/kWh

mit 0.4gNOx/kWh

keine Daten verf.

mit 0.31gCO/kWh

mit Staub 0.03g/kWh

Greenwagen NEDC							
	VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	EV_opt	Bemerkung
Verbrauch VKM [l / 100 km]	2.89	1.96	0.46	0.00	0.00	0.00	
Verbrauch VKM [kWh / 100 km]	28.29	19.23	4.52	0.00	0.00	0.00	mit 9.8kWh/l bei HEV ΔSOC < 0.002
Verbrauch Elektrisch [kWh / 100 km]			7.40	10.68	10.72	6.69	
Summe Verbrauch	28.29	19.23	11.92	10.68	10.72	6.69	
Einsparung zu VKM in [%]		-32.05	-57.88	-62.24	-62.10	-76.35	
CO2 Emissionen Treibstoff [g CO2/km]	76.51	51.99	12.22	0.00	0.00	0.00	Diesel (2.65kgCO2/l) mit 352.7gCO2/kWh
CO2 Emissionen Strom [g CO2/km]			26.09	37.68	37.83	23.60	
Summe CO2 Emissionen	76.51	51.99	38.31	37.68	37.83	23.60	
Einsparung zu VKM in [%]		-32.05	-49.93	-50.75	-50.56	-69.15	
NOx Emissionen Treibstoff [g NOx/km]	0.48	0.44	0.11	0.00	0.00	0.00	mit 0.4gNOx/kWh
NOx Emissionen Strom [g NOx/km]			0.03	0.04	0.04	0.03	
Summe NOx Emissionen	0.48	0.44	0.14	0.04	0.04	0.03	
Einsparung zu VKM in [%]		-8.75	-71.23	-91.18	-91.15	-94.48	
HC Emissionen Treibstoff [g HC/km]	0.0022	0.0009	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	keine Daten verf.
HC Emissionen Strom [g HC/km]							
Summe HC Emissionen	0.0022	0.0009	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	
Einsparung zu VKM in [%]		-61.32	-92.15	-100.00	-100.00	-100.00	
CO Emissionen Treibstoff [g CO/km]	0.0012	0.0006	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	mit 0.31gCO/kWh
CO Emissionen Strom [g CO/km]			0.0229	0.0331	0.0332	0.0207	
Summe CO Emissionen	0.0012	0.0006	0.0231	0.0331	0.0332	0.0207	
Einsparung zu VKM in [%]		-54.06	1793.49	2618.44	2628.97	1602.75	
PM Emissionen Treibstoff [g PM/km]	0.0003	0.0001	0.0000	0.00000	0.0000	0.0000	mit Staub 0.03g/kWh
PM Emissionen Strom [g PM/km]			0.0022	0.0032	0.0032	0.0020	
Summe PM Emissionen	0.0003	0.0001	0.0022	0.0032	0.0032	0.0020	
Einsparung zu VKM in [%]		-59.74	560.68	841.79	845.43	489.91	

Greenwagen CADC						
VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto	EV_opt	Bemerkung
Verbrauch VKM [l / 100 km]	2.76	2.59	2.05	0.28	0.00	
Verbrauch VKM [kWh / 100 km]	27.02	25.41	20.05	2.75	0.00	mit 9.8kWh/l bei HEV ΔSOC < 0.002
Verbrauch Elektrisch [kWh / 100 km]			2.08	12.03	13.28	
Summe Verbrauch	27.02	25.41	22.14	14.77	13.28	
Einsparung zu VKM in [%]	-5.95	-18.07	-45.33	-50.86	-71.44	
CO2 Emissionen Treibstoff [g CO2/km]	73.06	68.72	54.22	7.43	0.00	Diesel (2.65kgCO2/l) mit 352.7gCO2/kWh
CO2 Emissionen Strom [g CO2/km]			7.35	42.41	27.22	
Summe CO2 Emissionen	73.06	68.72	61.58	49.84	46.83	
Einsparung zu VKM in [%]	-5.95	-15.72	-31.78	-35.90	-62.74	
NOx Emissionen Treibstoff [g NOx/km]	0.57	0.58	0.47	0.04	0.00	mit 0.4gNOx/kWh
NOx Emissionen Strom [g NOx/km]			0.01	0.05	0.05	
Summe NOx Emissionen	0.57	0.58	0.48	0.09	0.05	
Einsparung zu VKM in [%]	2.66	-15.39	-83.96	-90.66	-94.57	
HC Emissionen Treibstoff [g HC/km]	0.0015	0.0010	0.0008	0.0001	0.0000	keine Daten verf.
HC Emissionen Strom [g HC/km]						
Summe HC Emissionen	0.0015	0.0010	0.0008	0.0001	0.0000	
Einsparung zu VKM in [%]	-35.16	-49.85	-95.65	-100.00	-100.00	
CO Emissionen Treibstoff [g CO/km]	0.0010	0.0007	0.0006	0.0000	0.0000	mit 0.31gCO/kWh
CO Emissionen Strom [g CO/km]			0.0065	0.0373	0.0412	
Summe CO Emissionen	0.0010	0.0007	0.0070	0.0373	0.0412	
Einsparung zu VKM in [%]	-31.34	587.50	3557.67	3933.52	2244.34	
PM Emissionen Treibstoff [g PM/km]	0.0003	0.0002	0.0001	0.00001	0.0000	mit Staub 0.03g/kWh
PM Emissionen Strom [g PM/km]			0.0006	0.0036	0.0040	
Summe PM Emissionen	0.0003	0.0002	0.0008	0.0036	0.0040	
Einsparung zu VKM in [%]	-31.06	203.30	1336.94	1481.52	819.20	

Anhang 7: Kostenabschätzung der Fahrzeugkonzepte in [€]

Fahrzeugbezeichnung
 Type
 Fahrzeugkosten [€]
 Batteriekapazität [kWh]
 Batteriekosten (500 € / kWh)
 Emot, LE, Steuerung ect.(Schätzung) [€]
 VKM Kosten (Schätzung) [€]
Zusatzkosten pro Fahrzeug
 Verbrauch VKM [l / 100 km]
 Verbrauch Elektrisch [kWh/100 km]
 Kraftstoffkosten (1€/Liter) [€/km]
 Stromkosten (0.20€/kWh) [€/km]
 Kraftstoffkosten für 200000km [€]
 Versicherungskosten für 20 Jahre [€]
 Staatliche Prämie [€]
 Betriebskosten pro Lebensdauer [€]
Fahrzeugkosten pro Lebensdauer [€]

Mittelklassewagen				
VKM	HEV	PHEV	PHEV-RE	BEV
VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto
24000				
	1.036	4.44	10.132	20.264
	518	2220	5066	10132
	2500	2500	2500	2500
		-500	-1000	-2000
0	3018	4220	6566	10632
4.86	3.92	3.29	1.39	0.00
		2.64	12.96	20.42
0.049	0.039	0.033	0.014	0.000
0.000	0.000	0.005	0.026	0.041
9730	7834	7642	7973	8169
17660	17660	12520	11060	5800
	500	500	1000	2000
27390	25494	20162	19033	13969
51390	52012	47882	48599	46601

Type
 Fahrzeugkosten [€]
 Batteriekapazität [kWh]
 Batteriekosten (500 € / kWh)
 Emot, LE, Steuerung ect.(Schätzung) [€]
 VKM Kosten (Schätzung) [€]
Zusatzkosten pro Fahrzeug
 Verbrauch VKM [l / 100 km]
 Verbrauch Elektrisch [kWh/100 km]
 Kraftstoffkosten (1€/Liter) [€/km]
 Stromkosten (0.20€/kWh) [€/km]
 Kraftstoffkosten für 200000km [€]
 Versicherungskosten für 20 Jahre [€]
 Staatliche Prämie [€]
 Betriebskosten pro Lebensdauer [€]
Fahrzeugkosten pro Lebensdauer [€]

Kleinwagen				
VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto
20000				
	1.036	3.7	8.94	18.178
	518	1850	4470	9089
	2500	2500	2500	2500
		-500	-1000	-2000
0	3018	3850	5970	9589
3.36	3.47	2.69	0.53	0.00
		2.38	14.34	16.61
0.034	0.035	0.027	0.005	0.000
0.000	0.000	0.005	0.029	0.033
6719	6948	6339	6790	6643
8560	8560	6660	6000	5460
	500	500	1000	2000
15279	15508	12999	12790	12103
35279	38026	36349	37760	39692

Type
 Fahrzeugkosten [€]
 Batteriekapazität [kWh]
 Batteriekosten (500 € / kWh)
 Emot, LE, Steuerung ect.(Schätzung) [€]
 VKM Kosten (Schätzung) [€]
Zusatzkosten pro Fahrzeug
 Verbrauch VKM [l / 100 km]
 Verbrauch Elektrisch [kWh/100 km]
 Kraftstoffkosten (1€/Liter) [€/km]
 Stromkosten (0.20€/kWh) [€/km]
 Kraftstoffkosten für 200000km [€]
 Versicherungskosten für 20 Jahre [€]
 Staatliche Prämie [€]
 Betriebskosten pro Lebensdauer [€]
Fahrzeugkosten pro Lebensdauer [€]

"Greenwagen" (Technisch machbar und optimiert 2))				
VKM	Hybrid	Plug-In-Hybrid	Plug-In-Hybrid+RE	Elektroauto
12000				
	1.036	2.96	8.493	16.986
	518	1480	4247	8493
	2500	2500	2500	2500
		-500	-1000	-2000
0	3018	3480	5747	8993
2.76	2.59	2.05	0.28	0.00
		2.08	12.03	13.28
0.028	0.026	0.020	0.003	0.000
0.000	0.000	0.004	0.024	0.027
5514	5186	4926	5371	5311
6660	6660	6000	5000	3000
	500	500	1000	2000
12174	11846	10926	10371	8311
24174	26364	25906	27117	27304

Anhang 8: Antriebsarbeit der Fahrzeugkonzepte in [kWh/km]

CADC

Mittelklassewagen [kWh/km]

MK CADC	Rollwiderstand	Luftwiderstand	Beschleunigungsarbeit	Getriebeverluste	Antriebsarbeit gesamt
VKM	0.028	0.073	0.053	0.010	0.0032
HEV	0.028	0.073	0.054	0.008	0.0032
PHEV	0.028	0.073	0.055	0.008	0.0033
PHEV-RE	0.029	0.072	0.057	0.006	0.0033
BEV	0.029	0.072	0.058	0.005	0.0033

Kleinwagen [kWh/km]

KW CADC	Rollwiderstand	Luftwiderstand	Beschleunigungsarbeit	Getriebeverluste	Antriebsarbeit gesamt
VKM	0.034	0.057	0.036	0.004	0.0026
HEV	0.035	0.057	0.037	0.004	0.0026
PHEV	0.036	0.057	0.038	0.004	0.0027
PHEV-RE	0.037	0.057	0.040	0.003	0.0027
BEV	0.038	0.057	0.041	0.003	0.0027

Greenwagen [kWh/km]

GW CADC	Rollwiderstand	Luftwiderstand	Beschleunigungsarbeit	Getriebeverluste	Antriebsarbeit gesamt
VKM	0.025	0.046	0.028	0.004	0.0021
HEV	0.025	0.046	0.029	0.003	0.0021
PHEV	0.026	0.046	0.030	0.003	0.0021
PHEV-RE	0.027	0.046	0.031	0.003	0.0021
BEV	0.028	0.046	0.033	0.003	0.0022

NEDC

Mittelklassewagen [kWh/km]

MK NEDC	Rollwiderstand	Luftwiderstand	Beschleunigungsarbeit	Getriebeverluste	Antriebsarbeit gesamt
VKM	0.030	0.037	0.048	0.010	0.0114
HEV	0.030	0.037	0.049	0.008	0.0113
PHEV	0.031	0.037	0.049	0.008	0.0114
PHEV-RE	0.031	0.037	0.050	0.006	0.0114
BEV	0.031	0.037	0.051	0.004	0.0112

Kleinwagen [kWh/km]

KW NEDC	Rollwiderstand	Luftwiderstand	Beschleunigungsarbeit	Getriebeverluste	Antriebsarbeit gesamt
VKM	0.034	0.029	0.034	0.004	0.0091
HEV	0.034	0.029	0.034	0.003	0.0091
PHEV	0.035	0.029	0.035	0.003	0.0092
PHEV-RE	0.036	0.029	0.036	0.002	0.0094
BEV	0.037	0.029	0.037	0.003	0.0095

Greenwagen [kWh/km]

GW NEDC	Rollwiderstand	Luftwiderstand	Beschleunigungsarbeit	Getriebeverluste	Antriebsarbeit gesamt
VKM	0.024	0.023	0.031	0.005	0.0075
HEV	0.025	0.023	0.031	0.003	0.0075
PHEV	0.025	0.023	0.032	0.003	0.0076
PHEV-RE	0.027	0.023	0.033	0.003	0.0078
BEV	0.028	0.023	0.034	0.004	0.0081

Mehr als Mitleid mit den Armen. Mehr als Wertschätzung für die Reichen.

Mehr als Respekt für die Tiere. Mehr als Bewunderung für die Natur.

Mehr als Durst für das Wasser. Mehr als Hunger für das Brot.

Mehr als UM-MICH, für das IN-MIR!