

Elektrische Antriebe in Fahrzeugen – „die“ Lösung für die Zukunft?

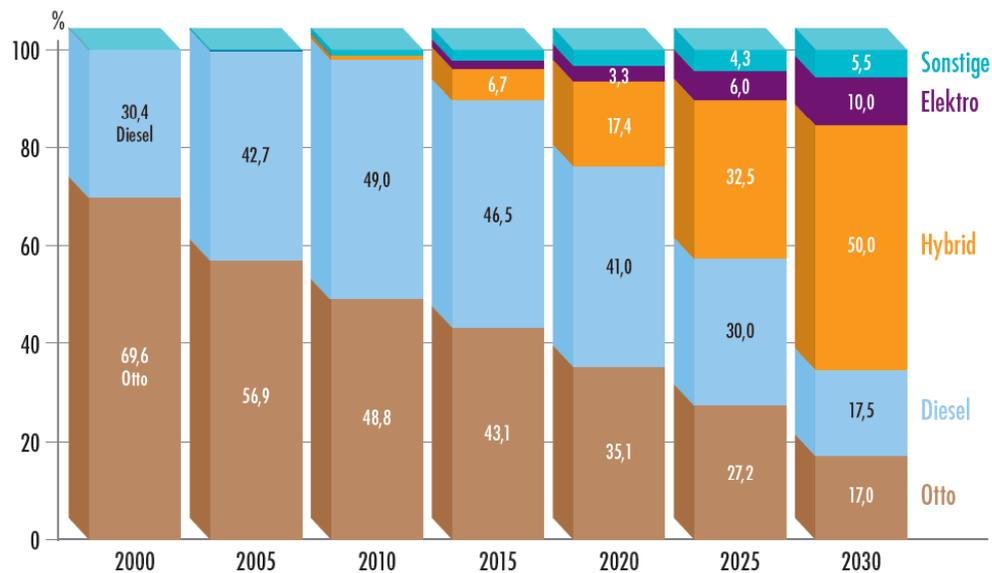


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Antrittsvorlesung 22.10.2009

Priv. Doz. Dr. phil. Dr.-Ing. habil. Harald Neudorfer



Anteil der Hybridfahrzeuge?



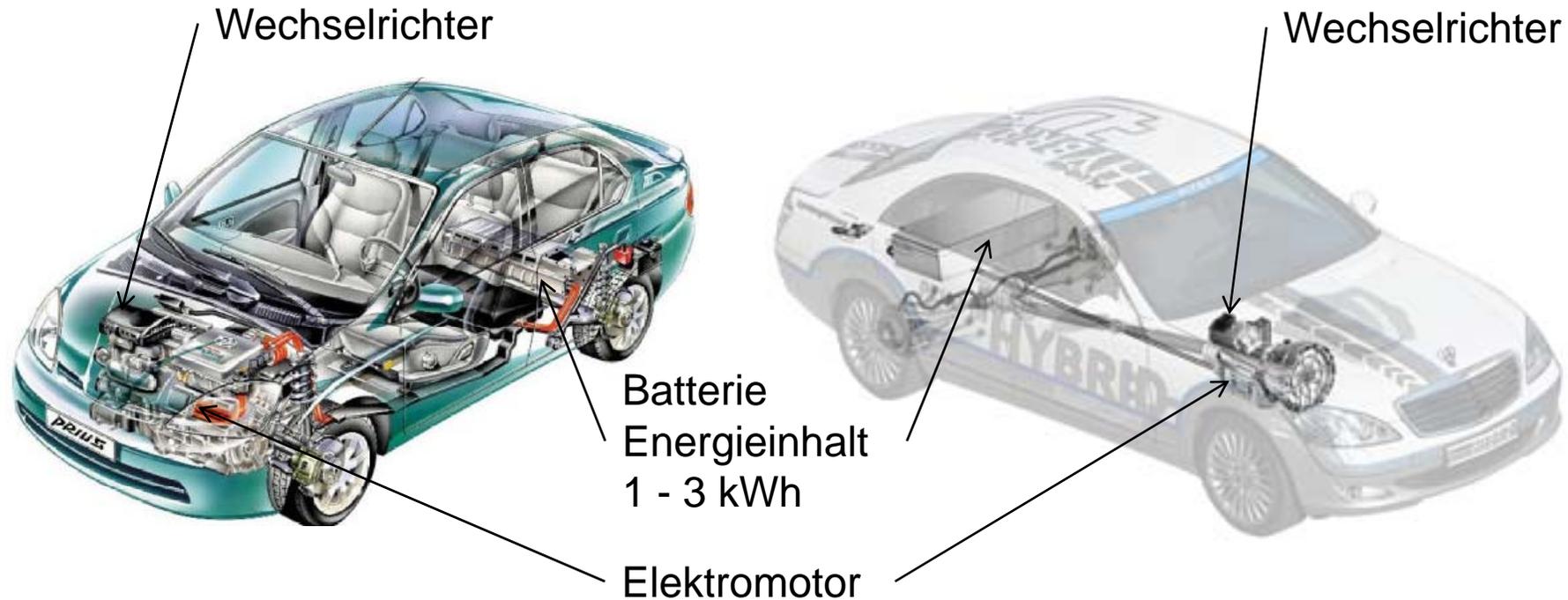
Zukünftige Energieerzeugung für Elektrofahrzeuge?



Übersicht

- Hybridkonzepte – Vor- und Nachteile, funktionale Klassifizierung
- Grundstruktur des elektrischen Antriebsstranges
- Vergleich unterschiedlicher Batteriesysteme
- Vergleich elektrischer Traktionsmaschinen
- PKW-Dichte und Produktion im internationalen Vergleich
- Prognosen der Erdölförderung
- Globale CO₂-Emissionen
- Neuzulassungen nach Antriebsarten in Deutschland
- Energieträger – von der Quelle zum Rad
- Vergleich PKW mit VKM- und E-Antrieb
- Elektrischer Energieverbrauch von E-Fahrzeugen
- Zusammenfassung

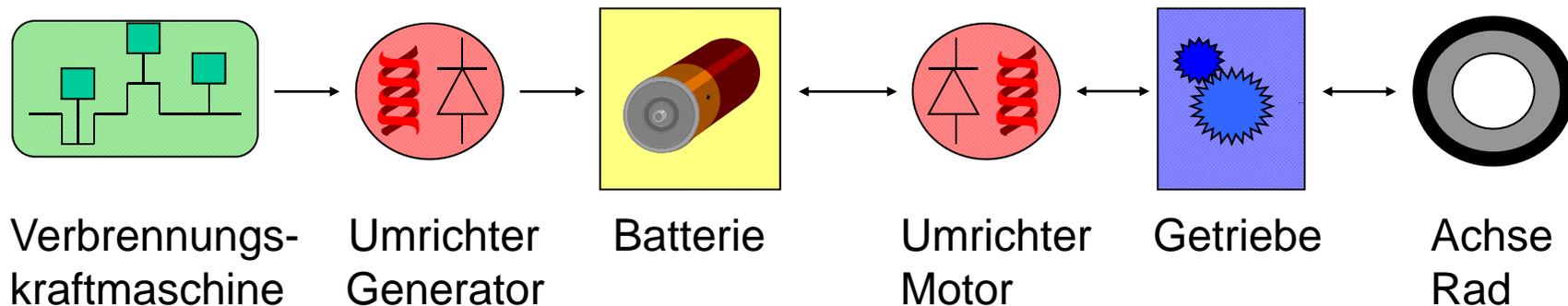
Aufbau Hybridfahrzeug



Mischhybrid mit zwei elektrischen
Maschinen $P = 30 - 60 \text{ kW}$
Vollhybrid

Parallelhybrid mit einer elektrischen
Maschine $P = 10 - 20 \text{ kW}$
Mildhybrid

Serielles Hybridkonzept für den Einsatz in Kraftfahrzeugen



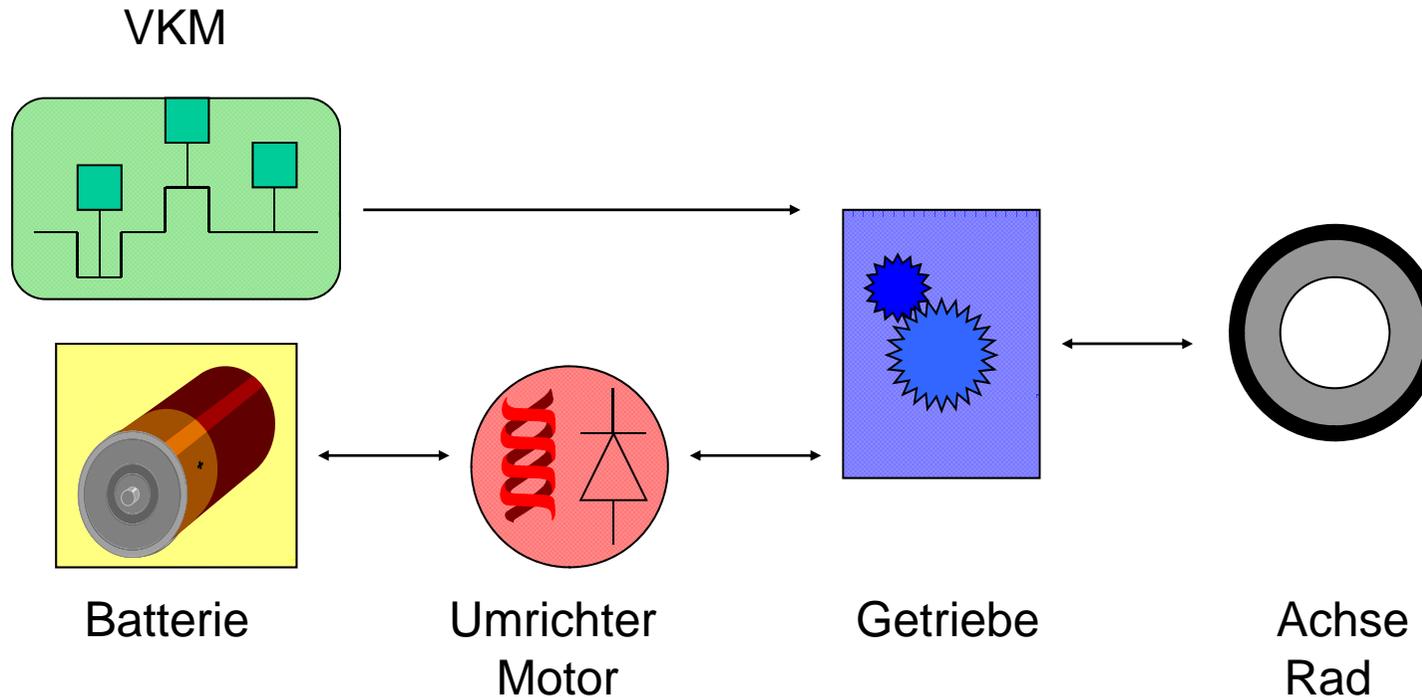
Vorteile:

Lastpunkte der Verbrennungskraftmaschine (VKM) sind antriebsunabhängig

Nachteile:

Keine rein mechanische Antriebsfunktion möglich
Wirkungsgradkette, Mehrgewicht, Mehrkosten, Mehrvolumen

Paralleles Hybridkonzept für den Einsatz in Kraftfahrzeugen



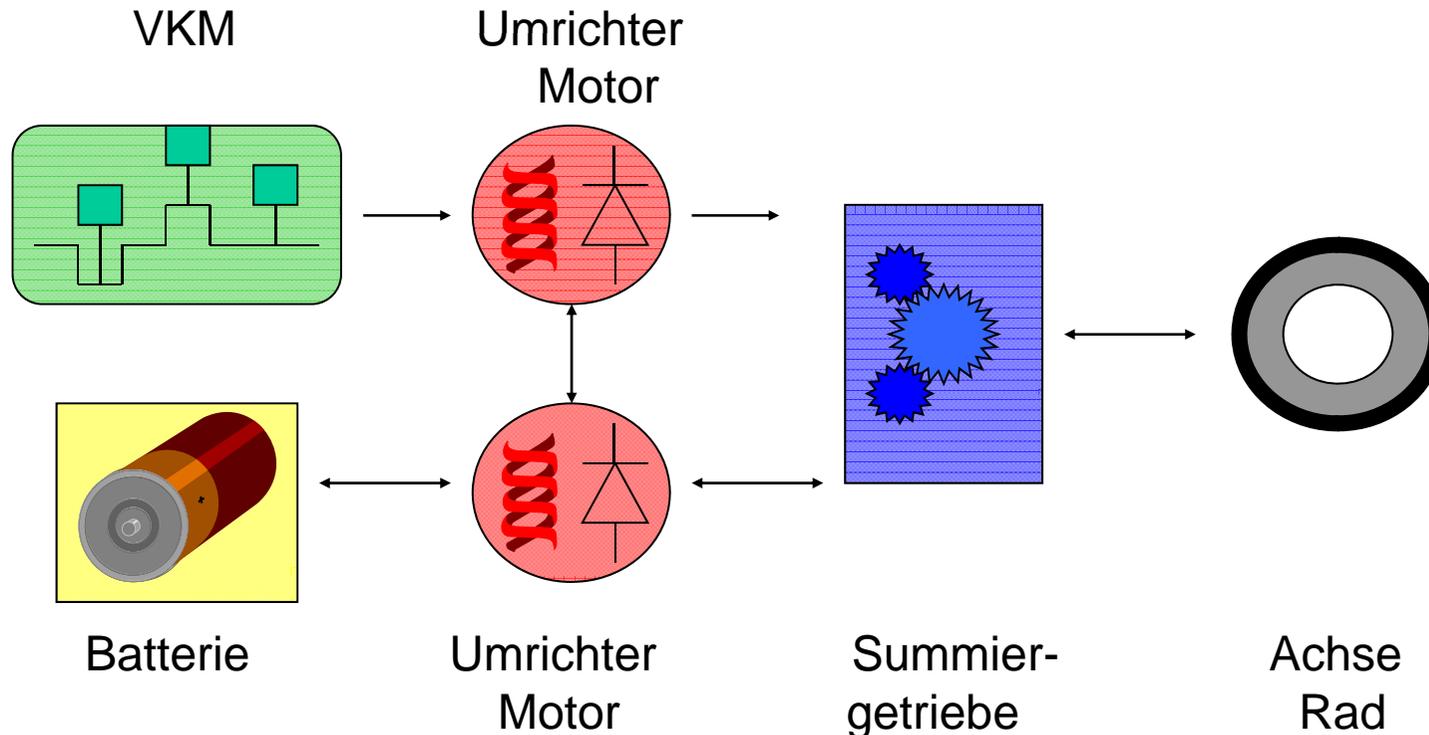
Vorteile:

Optimierungspotential im Verbrauch und Drehmoment
Rekuperation, Downsizing der VKM möglich

Nachteile:

erhöhter Steuerungsaufwand

Misch-Hybridkonzept für den Einsatz in Kraftfahrzeugen



Vorteile:

Optimierungspotential im Verbrauch und Drehmoment
Rekuperation

Nachteile:

erhöhter Steuerungsaufwand

Vergleich von Mono- und Hybridkonzepten



Antrieb	Mono		Hybrid		
	VKM	Elektro	seriell	parallel	misch
Verbrauch	--	++	+	+	+
Emission	--	++	+	+	+
Einbauraum	++	+	--	+/-	+/-
Steuerung	++	++	--	-	--
Kosten	++	+/-	--	-	-
Reichweite	++	--	+/-	+	+
Fahrspaß	+	-	+/-	++	++

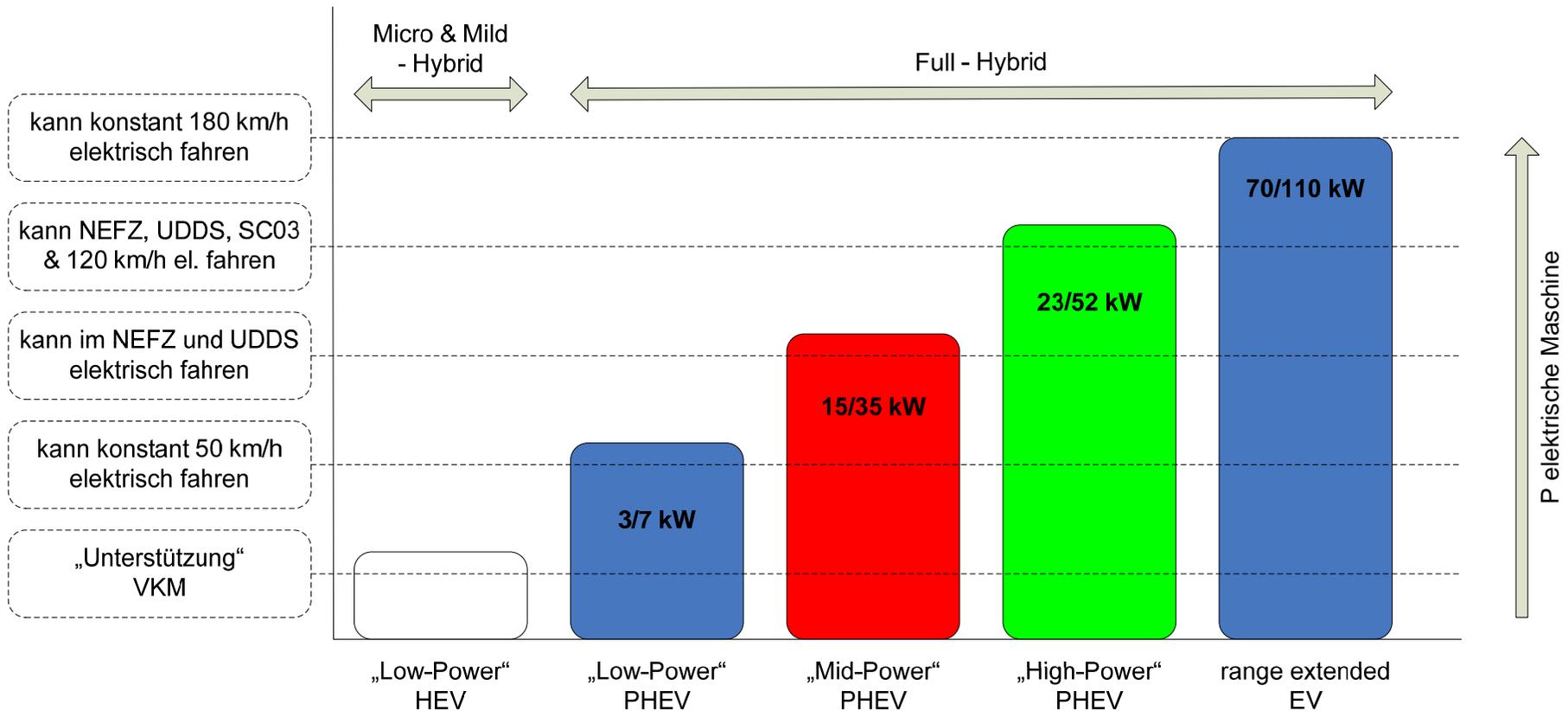
Hybridvarianten

Hybridvarianten	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid		Full-Hybrid	
	Leistung pro Fahrzeugmasse (W/kg)	2,7 – 4	3 – 7	6 – 14	13 – 20
Bordnetz-Spannung (V)	< 42	42 – 96	96 – 192	144 – 288	>192
Funktion	Elektrische Verbraucher				
	Drehmomentunterstützung beim Beschleunigen				
	Start-Stop-Funktion für VKM				
	Rekuperation				
	Leistungsunterstützung				
	Elektroantrieb				

Quellen:

Georgi, U.: *Erstellung einer Marktanalyse des derzeitigen Entwicklungsstandes von hybrid- und batteriebetriebenen Fahrzeugen*, Studienarbeit, TU Darmstadt, 2005
 Canders, W.R.: *Hybridfahrzeuge und Energiemanagement*, 1. Braunschweiger Symposium, TU Braunschweig, 2002

Leistungsklassen für PKW der Kompaktklasse



Leistungsangaben: (S1 - Dauerleistung) / (S2 - Leistung für 2 min.)

HEV Hybrid Electric Vehicle **PHEV** Plug-in Hybrid Electric Vehicle **EV** Electric Vehicle **NEFZ** Neuer Europäischer Fahrzyklus
UDDS Urban Dynamometer Driving Schedule (US-amerikanischer Stadtzyklus) **SC03** Start Control-Zyklus (Innenstadt, mit KA)

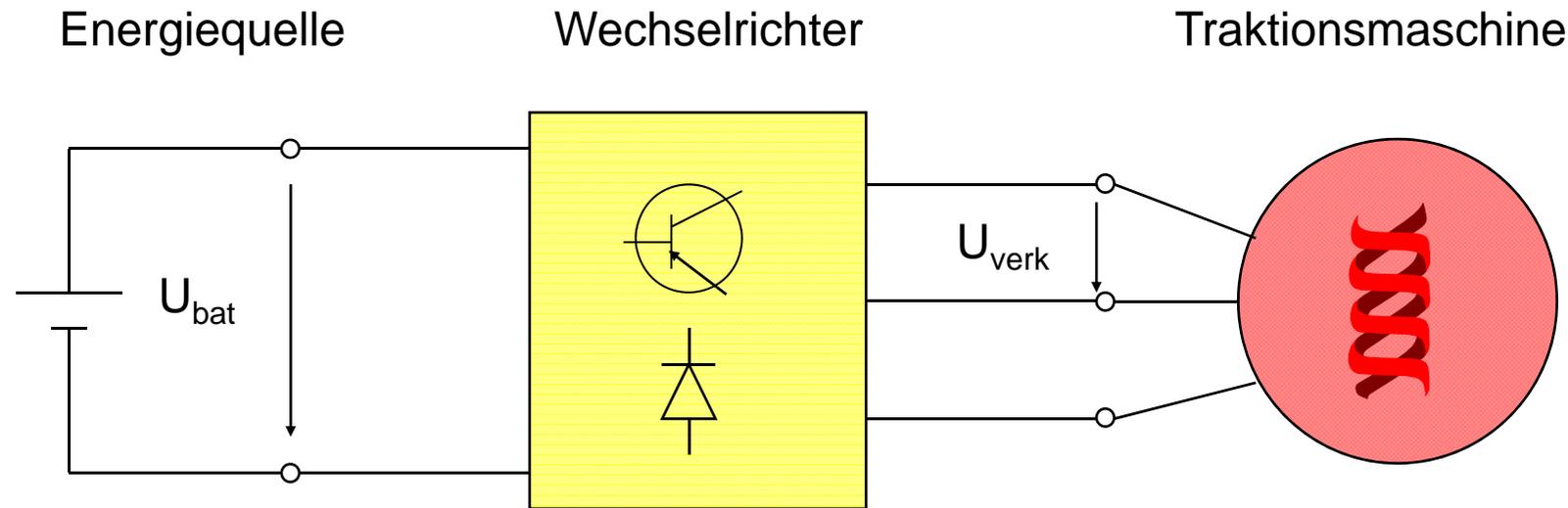
Vergleich von alternativen Antriebstechnologien für PKWs



Hybridvarianten	Micro/Mild	Voll	Plug-in	Elektro*	BSZ**
Anschaffungskosten	-	--	--	--	--
Variable Kosten	+	+	+	++	-
CO ₂ -Einsparung	+	+	+	++	++
Infrastrukturausbau	+	+	-	--	--
Fahreigenschaften	+/-	+	+/-	+/-	+/-
Zeit bis Marktreife	seit 1998	seit 1997	2010	2012	2020

* Elektrofahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien ** Brennstoffzelle (Wasserstoff aus erneuerbarer Energie)

Grundstruktur des elektrischen Antriebsstranges



Brennstoffzelle
Superkondensator
Batterie: Nickel Cadmium
Nickel Metallhydrid
Lithium Ionen
Lithium Polymer

IGBT-WR
Transistor-WR

Asynchronmaschine ASM
PM-Synchronmaschine PSM
Switched Reluctance Ma. SRM
Gleichstrommaschine GSM
Transversalflußmaschine TFM

Vergleich unterschiedlicher Batteriesysteme

Systembezeichnung		Blei	Ni/Cd	Ni/MH	Na/NiCl	LiIon	LiPoly	Zn/Luft	Zielwerte
Energiedichte	Wh/kg	30 - 35	45 - 50	60 - 70	90 - 100	90 - 140	110 - 130	100 - 220	100 - 200
Leistungsdichte	W/kg	200 - 300	80 - 175	200 - 300	160	300 - 600	ca. 300	ca. 100	75 - 200
Lebensdauer	Jahre	2 - 3	3 - 10	10	5 - 10	< 5	k.A.* ¹⁾	k.A.	10
	Zyklen	300 - 400	> 2.000	> 1.000	1.000	500 - 750	< 600	k.A.	1.000
Kosten	€/kWh	100 - 150	< 600	300 - 350	< 300	300 - 600	300	60	100 - 150

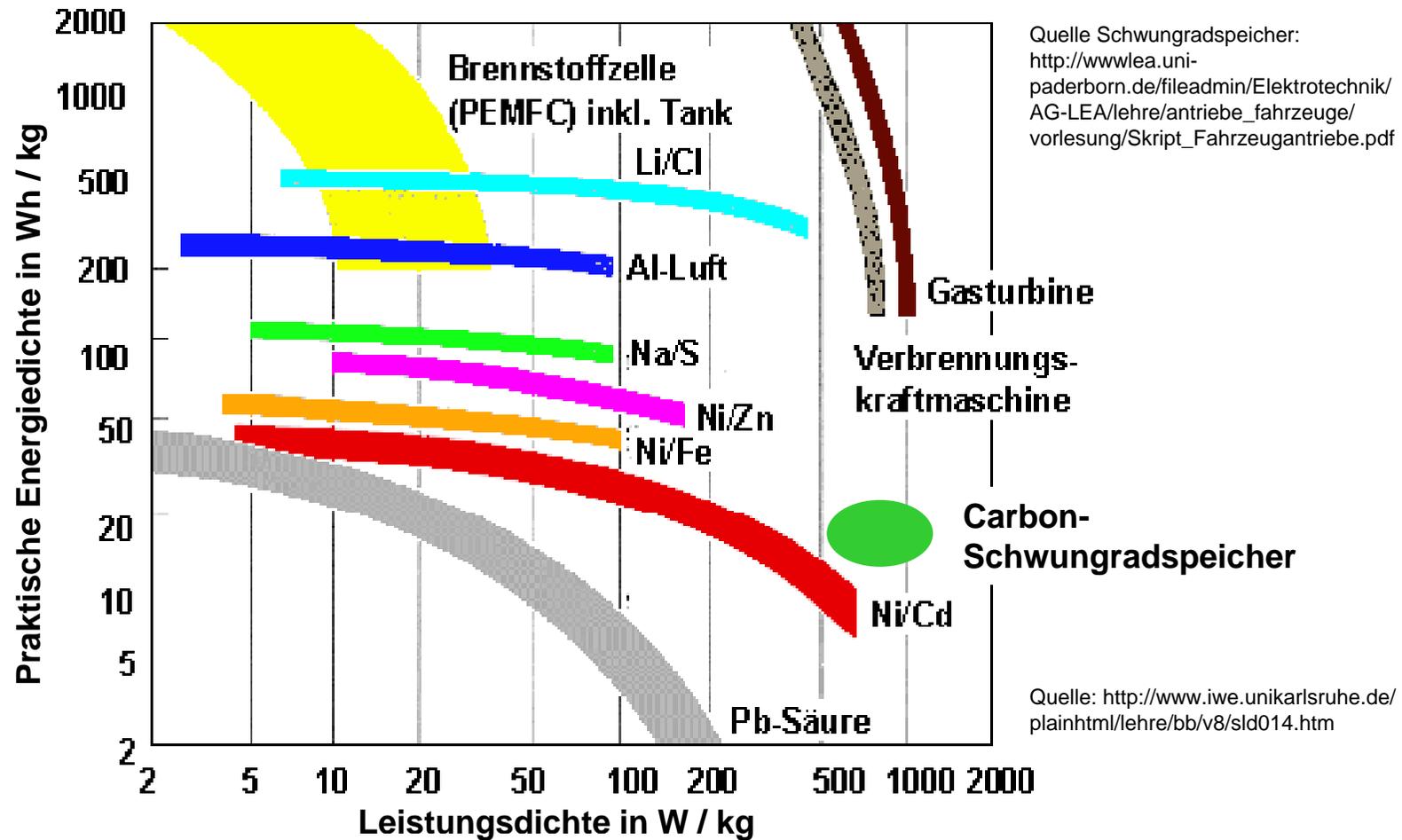
* Keine gesicherten Angaben

Quellen:

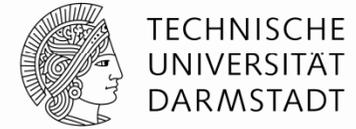
Baumann W., Muth A.: Batterien, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997

Gerl B.: Innovative Automobilantriebe, Verlag Moderne Industrie Landsberg/Lech, 2002

Ragone-Diagramm Energiedichte und Leistungsdichte



Verfügbarkeit von Rohstoffen einiger Akkumulatoren



$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{Vorräte}}{\text{Jahresverbrauch}}$$

Rohstoff	Blei	Nickel	Lithium	Zink	Natrium
Verfügbarkeit in Jahren	40	110	400*	40	6.000
Weltweite Förderung von Lithiumcarbonat (2008)**					90.000 t
Gewinnung von reinem Lithium					17.000 t
Weltweite Reserve geschätzt					58.000.000 t
Verfügbarkeit					640 Jahre
Notwendige Masse von Lithiumcarbonat für 5 kWh-Batterie					7,5 kg
Theoretische Anzahl von Lithiumbatterien für Hybridfahrzeuge					12.000.000
(jedoch auch für andere Anwendungen wie z.B. Mobiltelefon, Laptop notwendig)					
40 % der globalen Lithiumproduktion aus Chile (Salar de Atacama).					

* Quelle: Naunin, D.: *Elektrofahrzeuge – Entwicklungserfolge und Perspektiven*, DGES, 1999

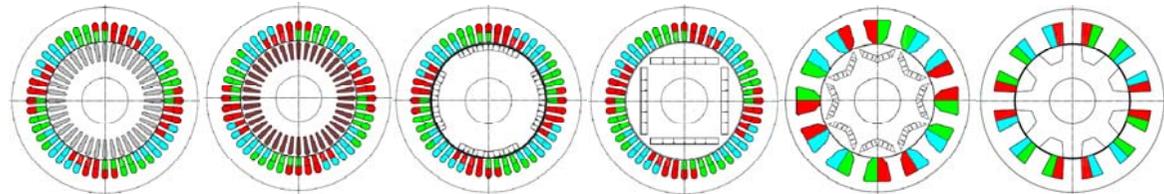
** Quelle: <http://www.rohstoff-welt.de/news/artikel.php?sid=8935>

Vergleich elektrischer Traktionsmaschinen

Maschine	AS	PSM	SR	GS	TF
Momentendichte	+ / -	++	+	-	++
Wirkungsgrad	+ / -	++	+ / -	-	+
Masse	+	++	+	-	++
Stand der Technik	++	+	+ / -	++	--
Wechselrichter	+	+ / -	-	++	--
Kosten Maschine	+ / -	+ / -	+	--	-
Kosten System	+ / -	+ / -	-	+ / -	-
Fertigung	+	+ / -	++	-	--
Geräusch	+	++	-	+	--

AS: Asynchron-, PSM: Permanentmagnet-Synchron-, SR: Switched Reluctance-,
GS: Gleichstrom-, TF: Transversalfluss-Maschine

Vergleich von unterschiedlichen Antriebsmaschinen



ASM1

ASM2

PSM1

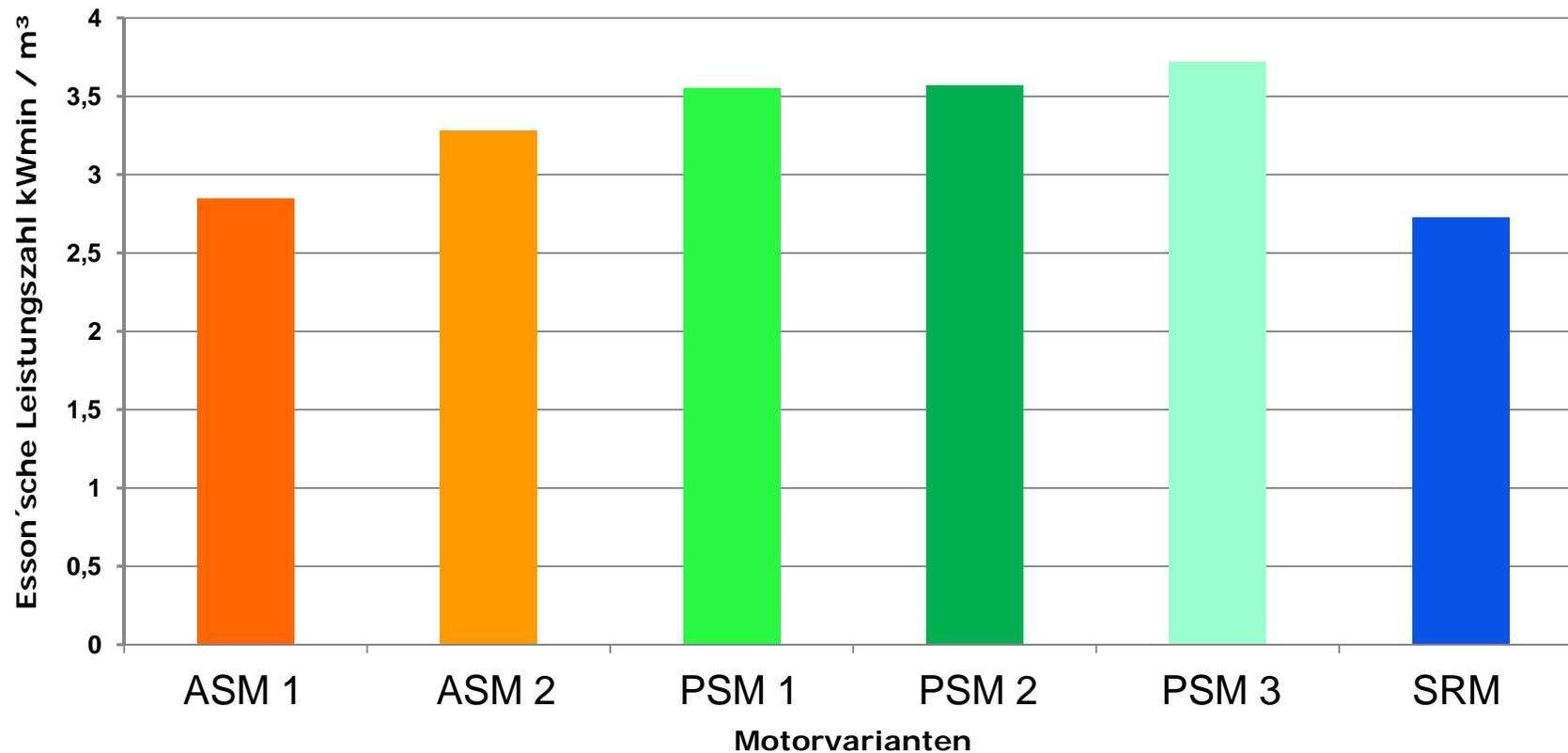
PSM2

PSM3

SRM

		ASM1	ASM2	PSM1	PSM2	PSM3	SRM
Statoraußendurchmesser	mm	176,6	176,6	176,6	176,6	176,6	176,6
Eisenlänge	mm	150	130	120	120	120	170
Gesamtvolumen	dm ³	10,5	9,6	9,2	9,2	7,3	9,1
Gesamtmasse	kg	38,0	37,7	31,9	32,2	30,3	35,4
Aktivmasse	kg	24,8	25,3	19,8	20,1	19,3	23,3
Drehmoment S1 @ 2800 min ⁻¹	Nm	51	51	51	51	51	51
Esson'sche Leistungszahl	kWmin/m ³	2,85	3,28	3,55	3,57	3,72	2,73
Wirkungsgrad @ 15kW, 2800 min ⁻¹	%	88,5	87,7	90,7	91,9	91,5	89,8
Drehmoment/Gesamtmasse	Nm/kg	1,34	1,36	1,60	1,59	1,70	1,45
Wirkungsgrad @ 15 kW, 12500 min ⁻¹	%	87,3	88,5	79,8	84,3	91,9	89,9
Max. Leistung @ I _{ZK} = 320 A	kW	42,4	44,0	40,1	44,0	44,3	36,1

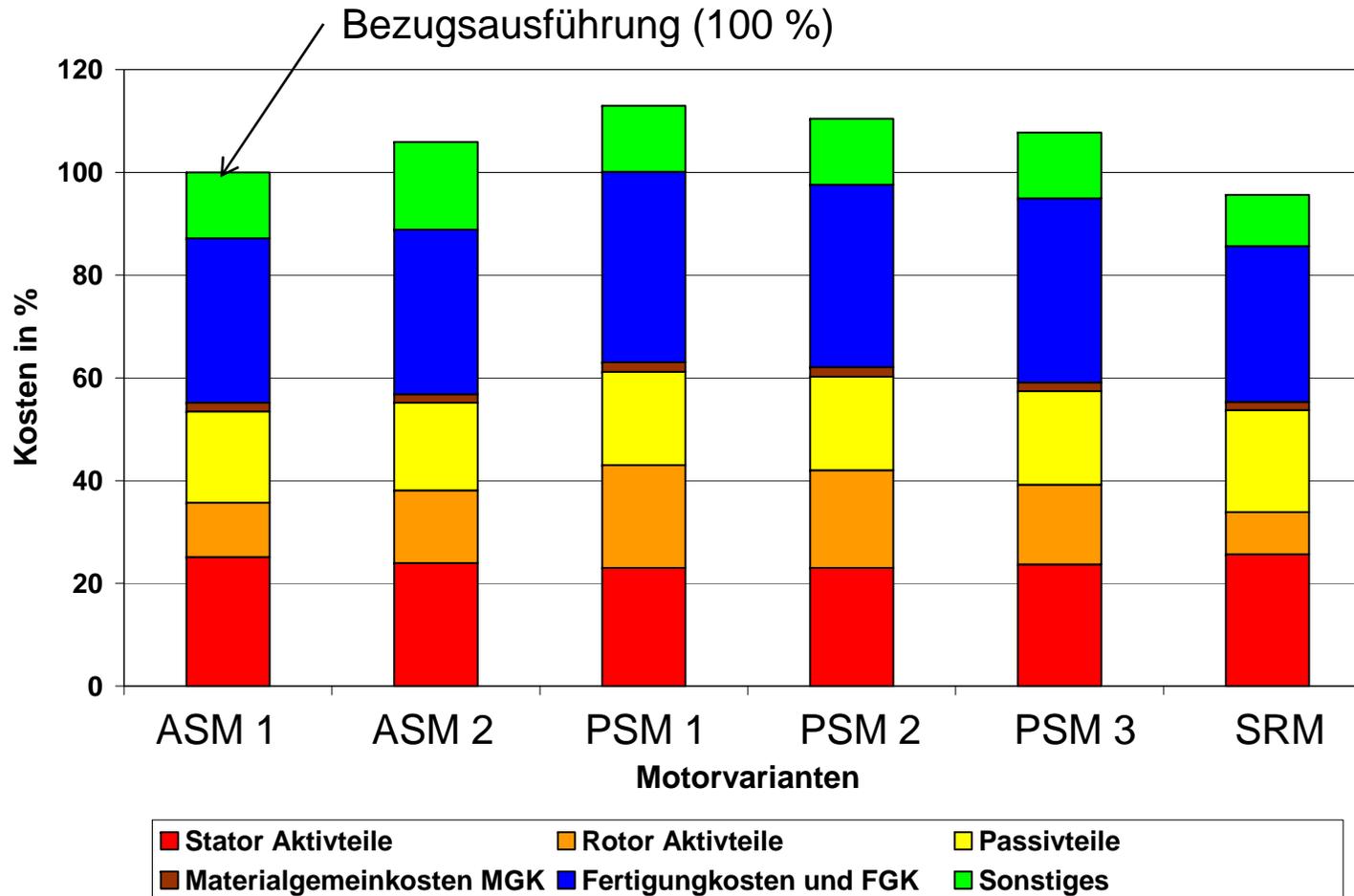
Esson'sche Leistungszahl für unterschiedliche Antriebsmaschinen



Quelle:
Neudorfer, H.: Habilitationsschrift, Darmstadt, 2008

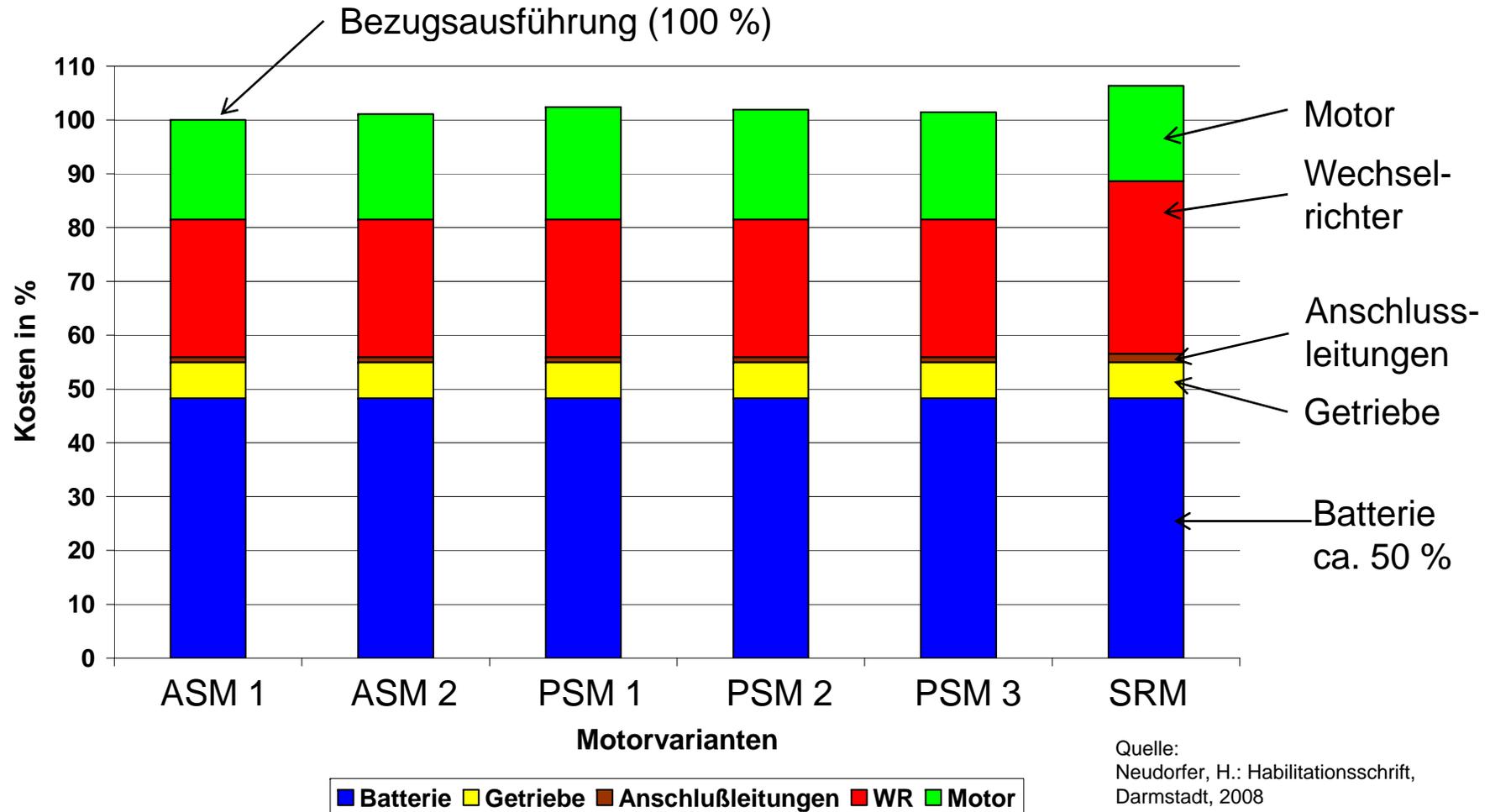
Berechnung beim Nennleistungspunkt
 $P = 15 \text{ kW}$, $M = 51 \text{ Nm}$, S1-Betrieb

Kostenvergleich unterschiedlicher Traktionsmaschinen



Quelle:
Neudorfer H.:
Habilitationsschrift,
Darmstadt, 2008

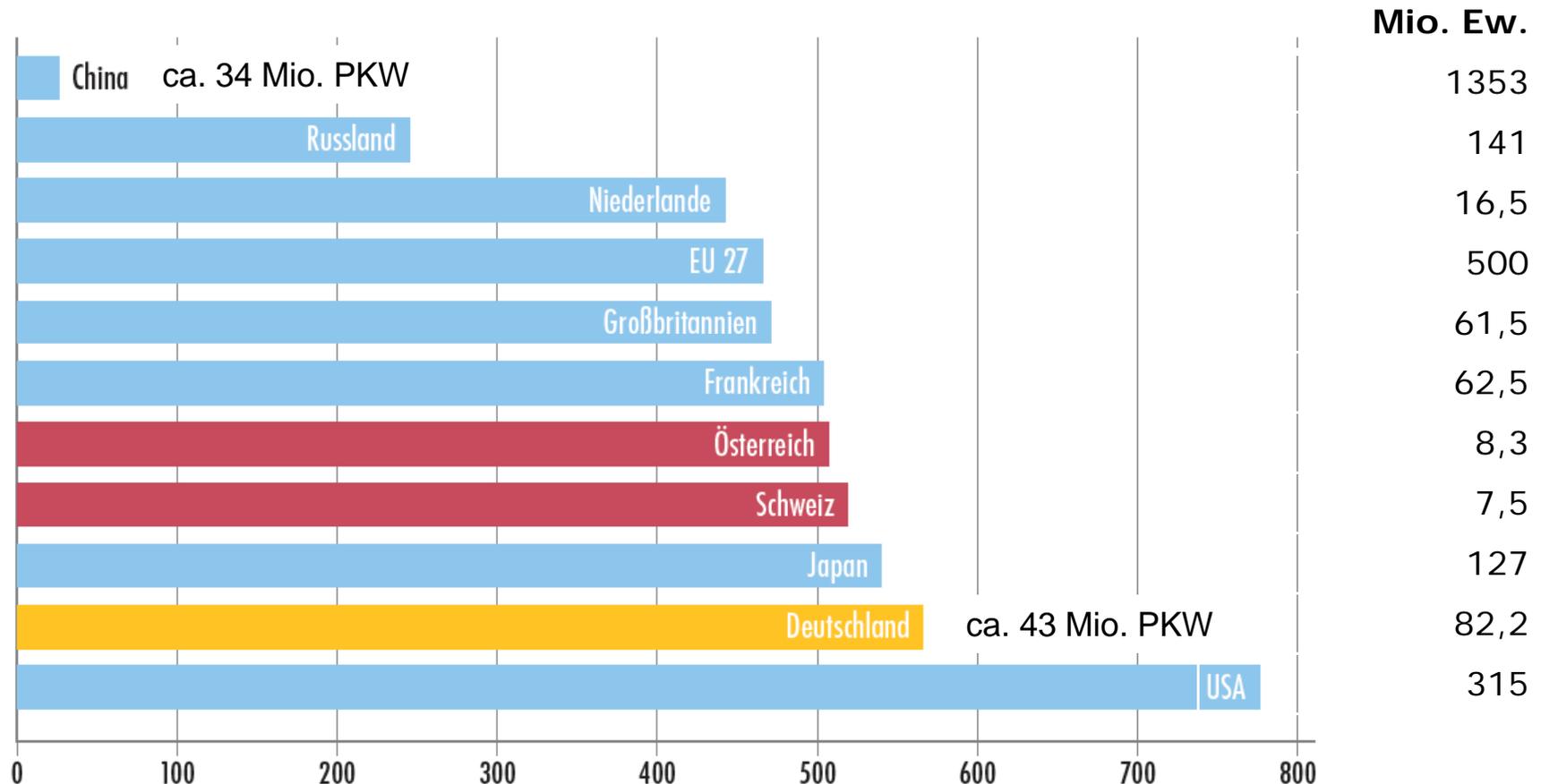
Kostenvergleich des Gesamtsystems bei unterschiedlichen Antriebssystemen



PKW-Dichte pro 1000 Einwohner im internationalen Vergleich



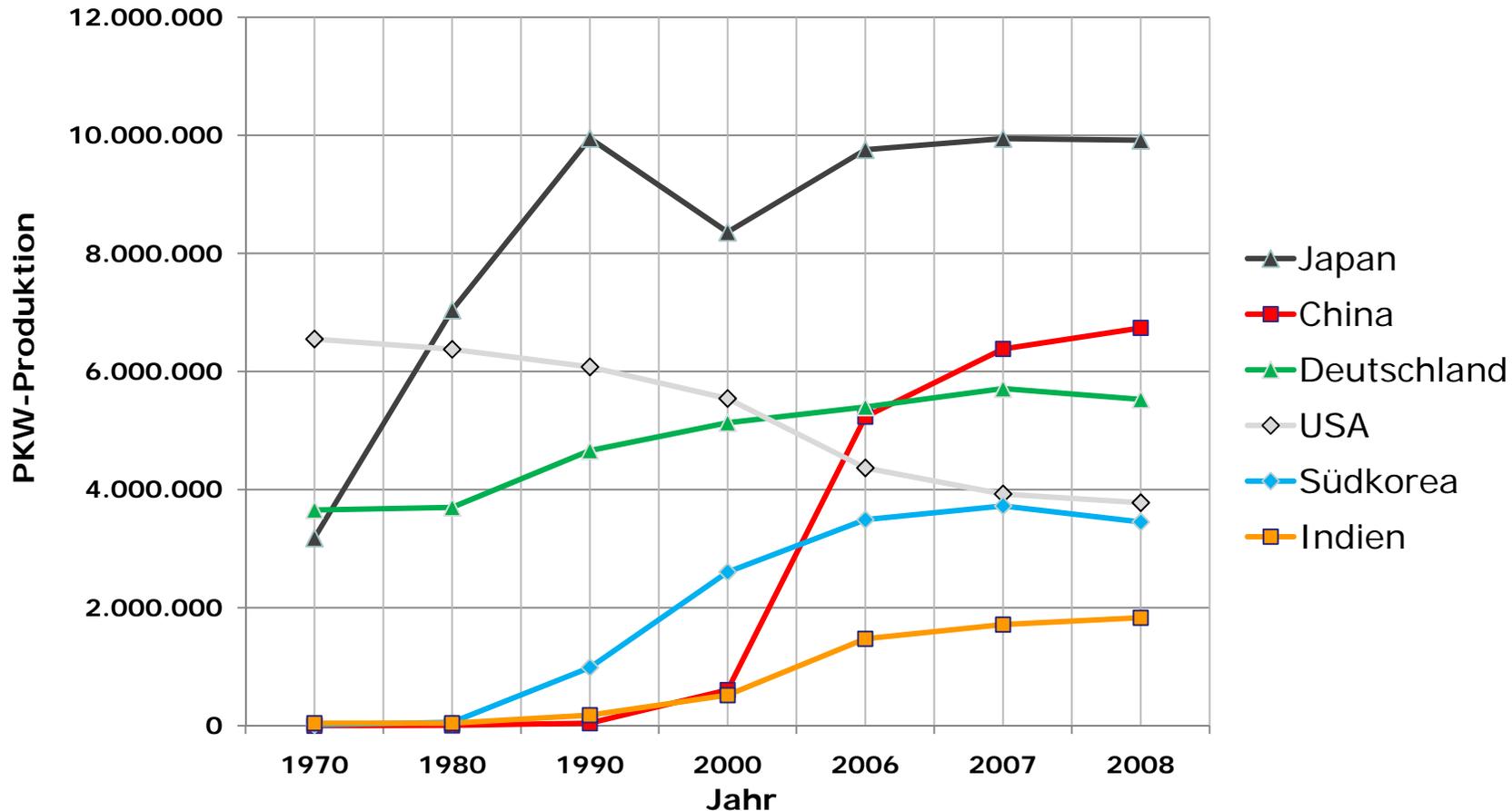
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle PKW-Dichte: ACEA, DIW; Stand 2006, in: Shell PKW Szenarien bis 2030, Hamburg, 2009

Quelle Einwohnerzahlen: Wikipedia, Sept. 2009

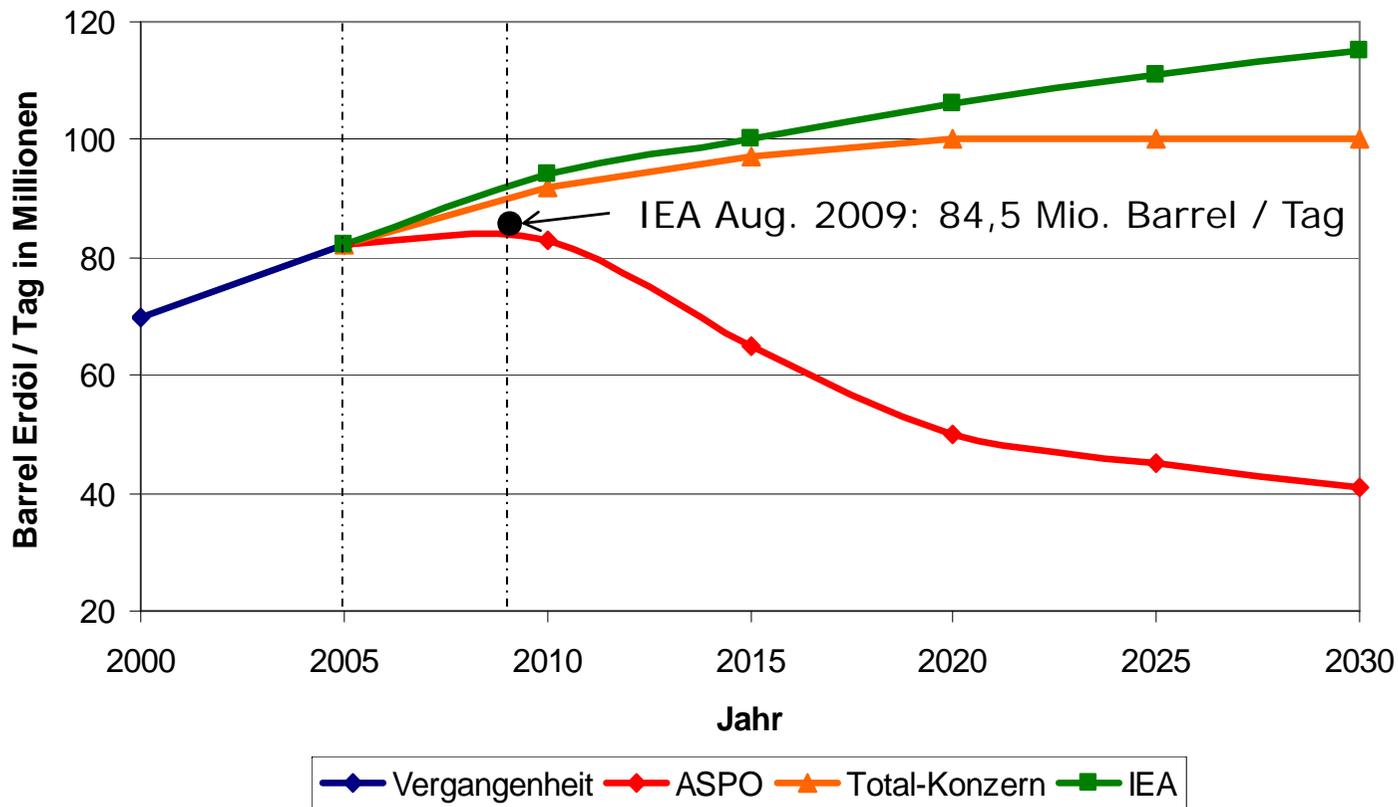
PKW-Produktion nach Ländern



Quelle : <http://oica.net/category/production-statistics>

Prognosen der weltweiten Erdölförderung

Prognosen der weltweiten Erdölförderung



Quellen:

International Energy

Agency: Oil Market Report ,
12. August 2009.

<http://omrpublic.iea.org/currentissues/full.pdf>

Association for the study of peak oil and gas: ASPO

Newsletter Nr. 90 – 06/2008.

http://www.aspo-Ireland.org/contentFiles/newsletterPDFs/newsletter90_200806.pdf

International Energy

Agency: Key World Energy
Statistics 2007, Paris 2007.

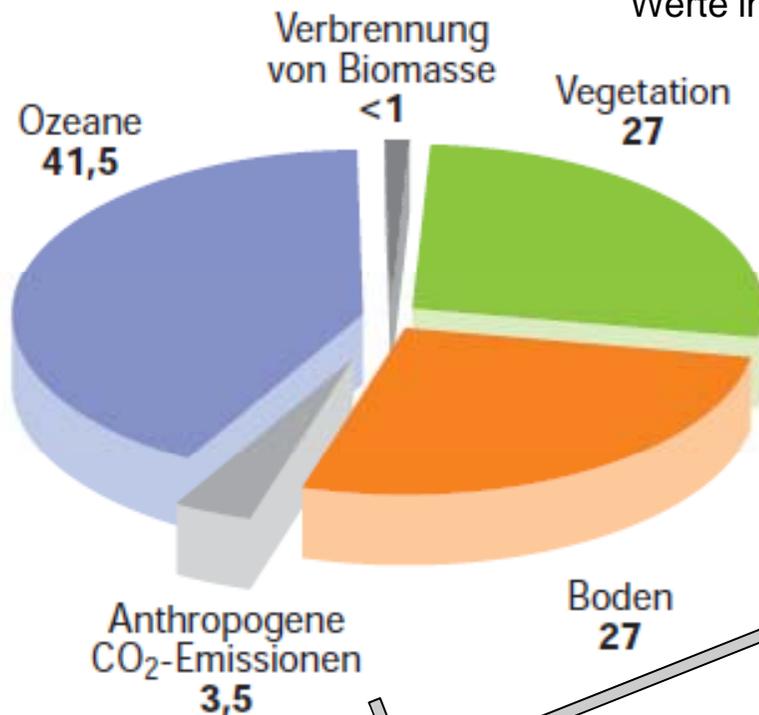
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf

Globale CO₂-Emissionen 2007

Gesamte CO₂-Emissionen

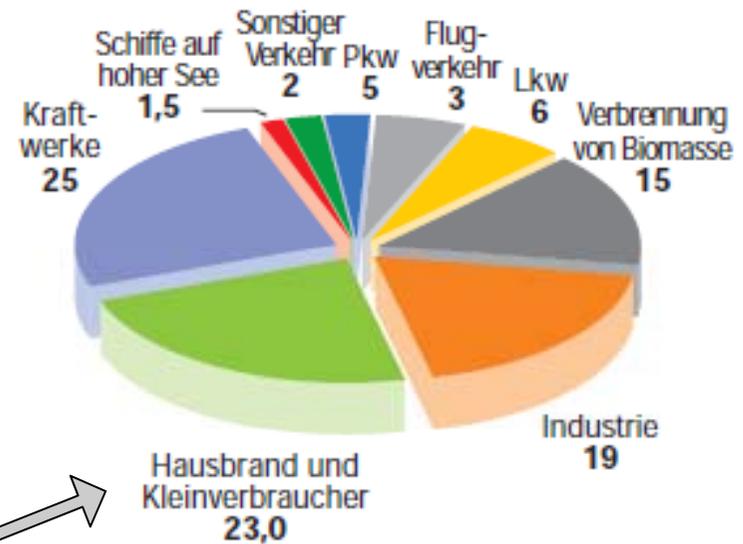
ca. 800 Gt/Jahr

Angaben der
Werte in %



Anthropogene CO₂-Emissionen

Insgesamt ca 28 Gt/Jahr

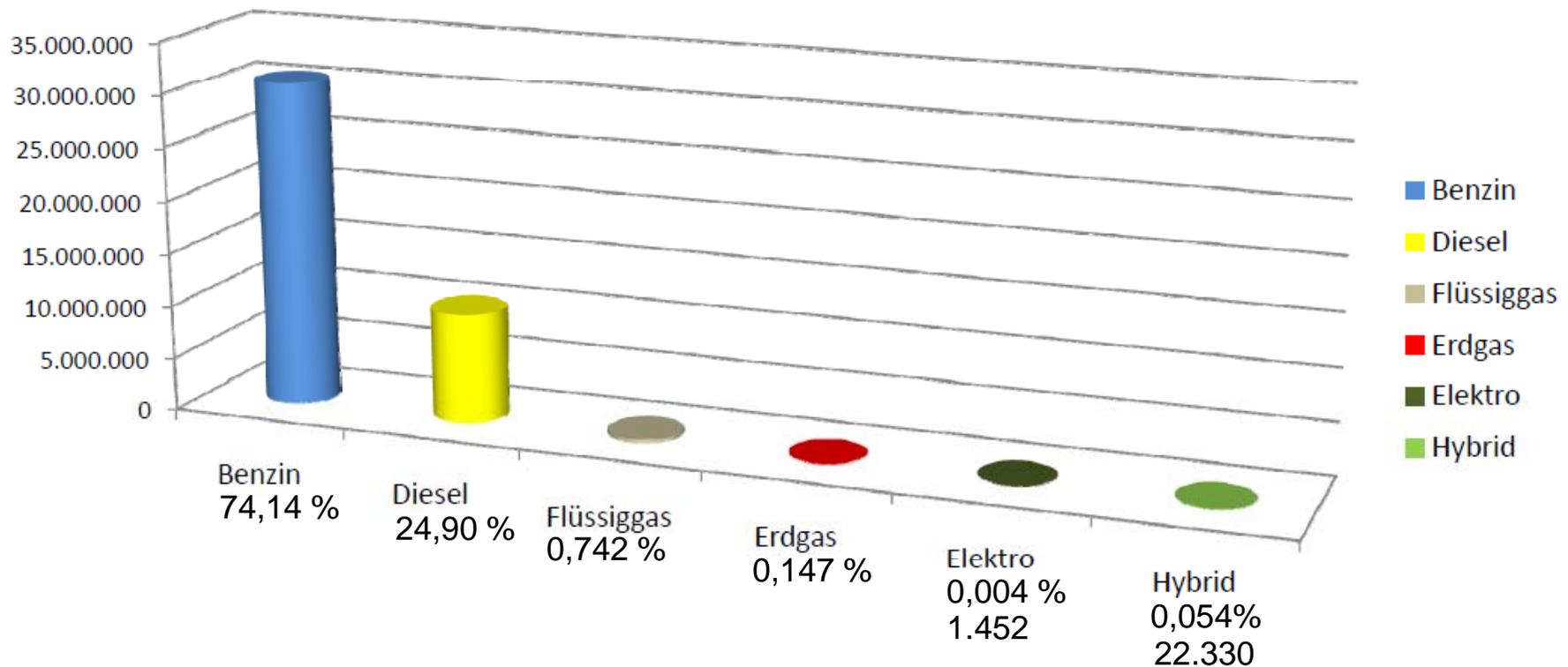


Verkehr gesamt 18,5 %

Quelle: Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Jahresbericht Auto 2008, Frankfurt, 2008 (<http://www.vda.de/de/downloads/489/>)

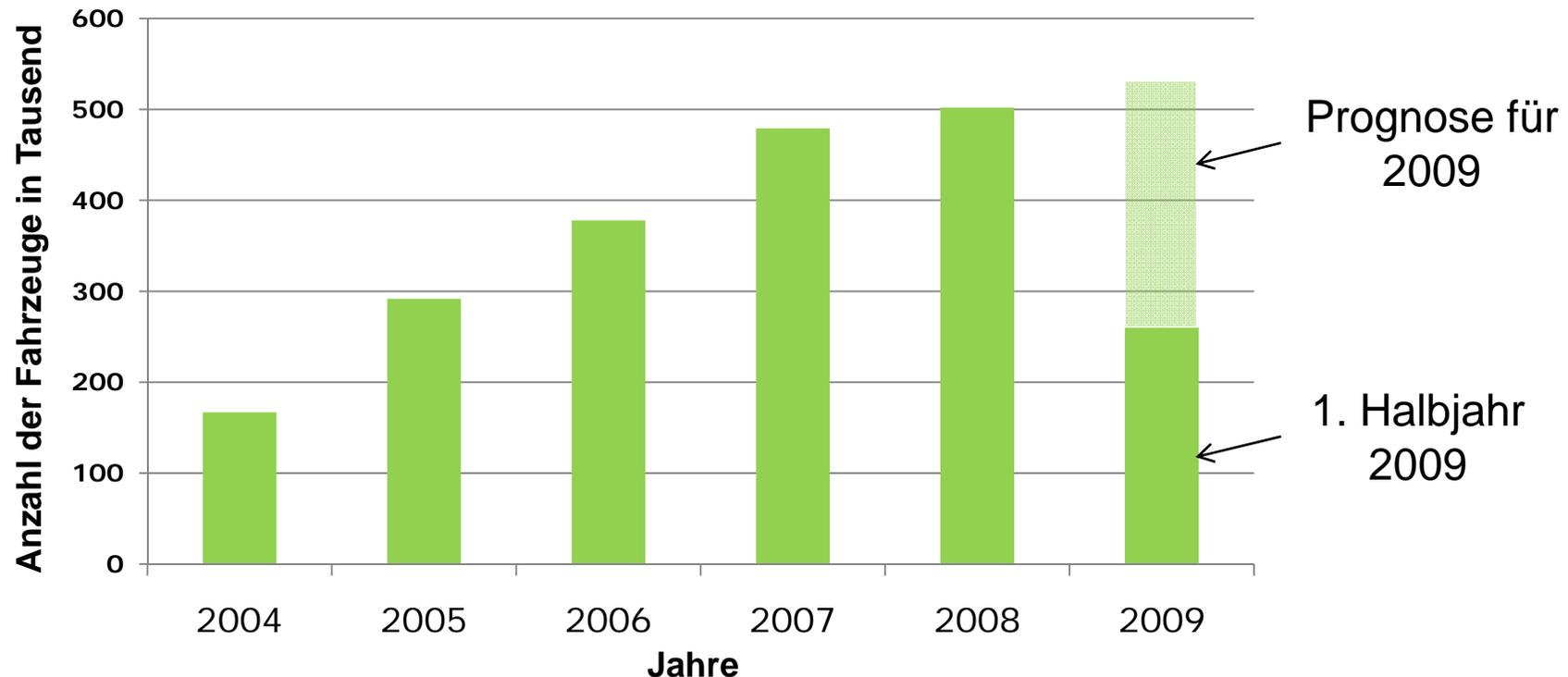
Bestand an PKW am 01.01.2009 in Deutschland

Gesamt-PKW-Bestand: 41.321.171 Fahrzeuge



Quelle: www.kba.de/cln_015/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2008__b__emi__eckdaten.html

Weltweiter Verkauf von Hybridfahrzeugen (HEV)



Verkauf von Hybridfahrzeugen:

Toyota/Lexus: 1997 bis Juni 2007 1.088.000 Fahrzeuge

Honda: Nov. 1999 bis Jän. 2009 300.740 Fahrzeuge

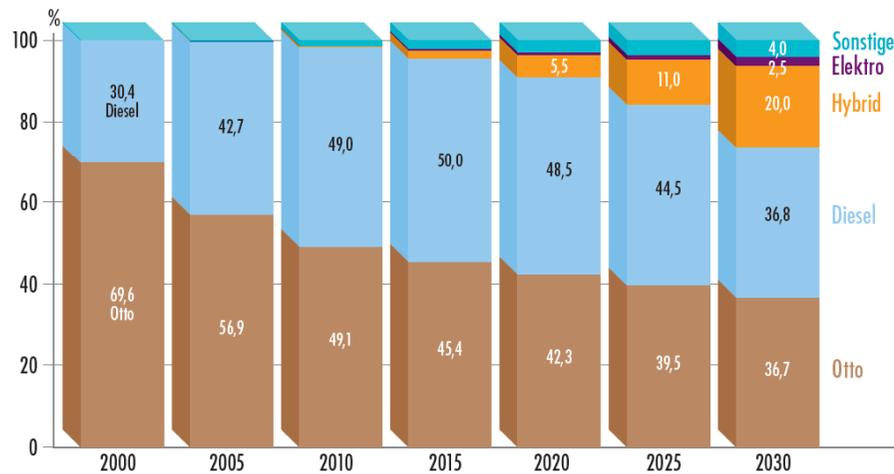
Quelle: www.marklines.com/en/numproduct/index.jsp

Neuzulassungen nach Antriebsarten in Deutschland, Anteil mit E-Antrieben



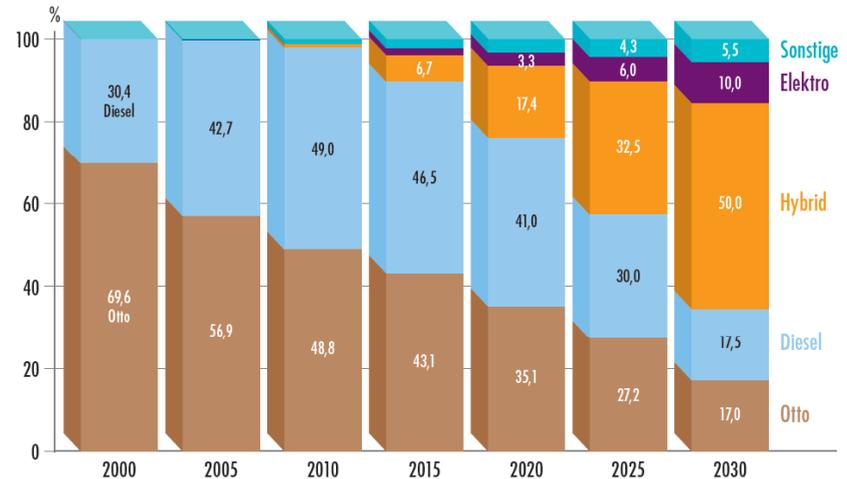
Neuzulassungen 2008 in Deutschland: ca. 3,4 Mio. PKW

Neuzulassungen nach Antriebsarten bei Szenario 1



Anteil von Hybrid- und Elektrofahrzeugen im Jahr 2030: 22,5 %

Neuzulassungen nach Antriebsarten bei Szenario 2



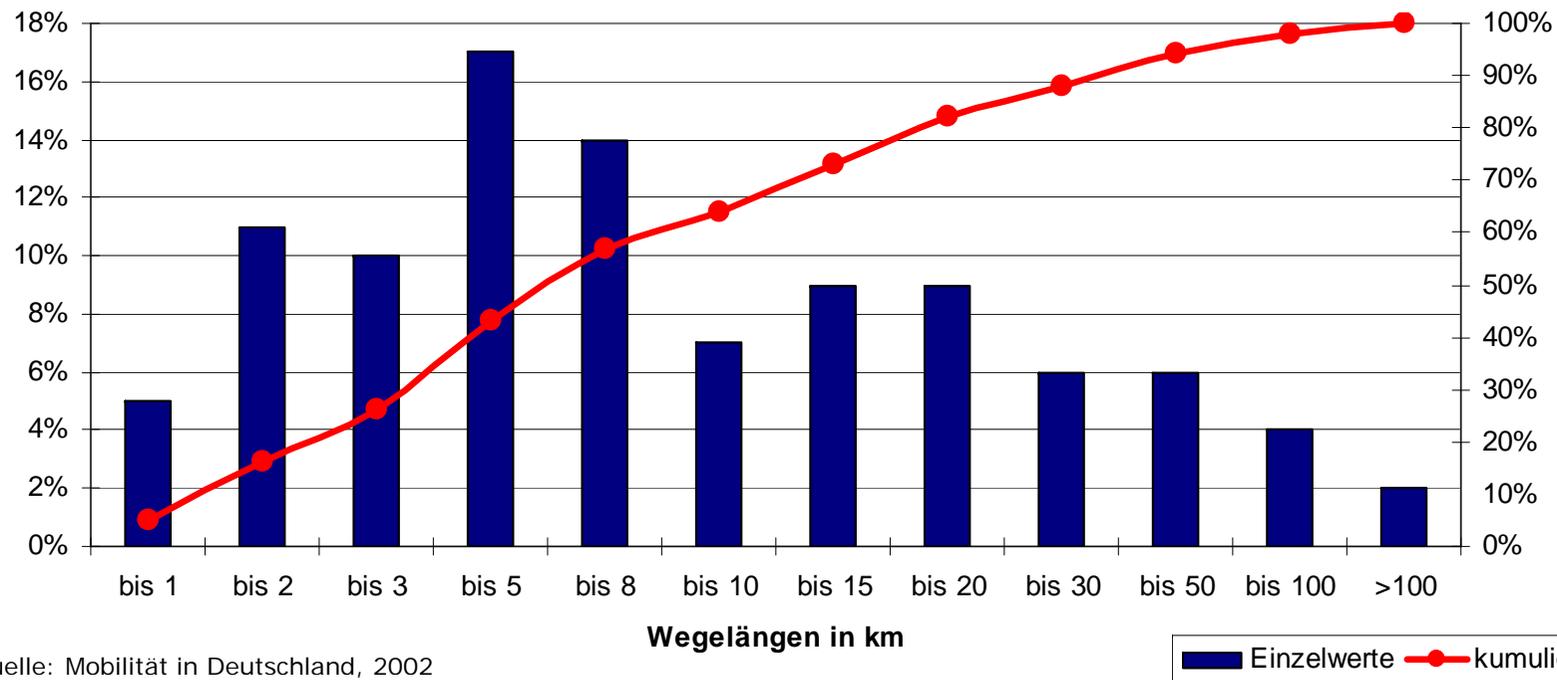
Anteil von Hybrid- und Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 : 60 % (das sind ca. 2,0 Mio. PKW)

Quelle: Shell PKW Szenarien bis 2030, Hamburg 2009

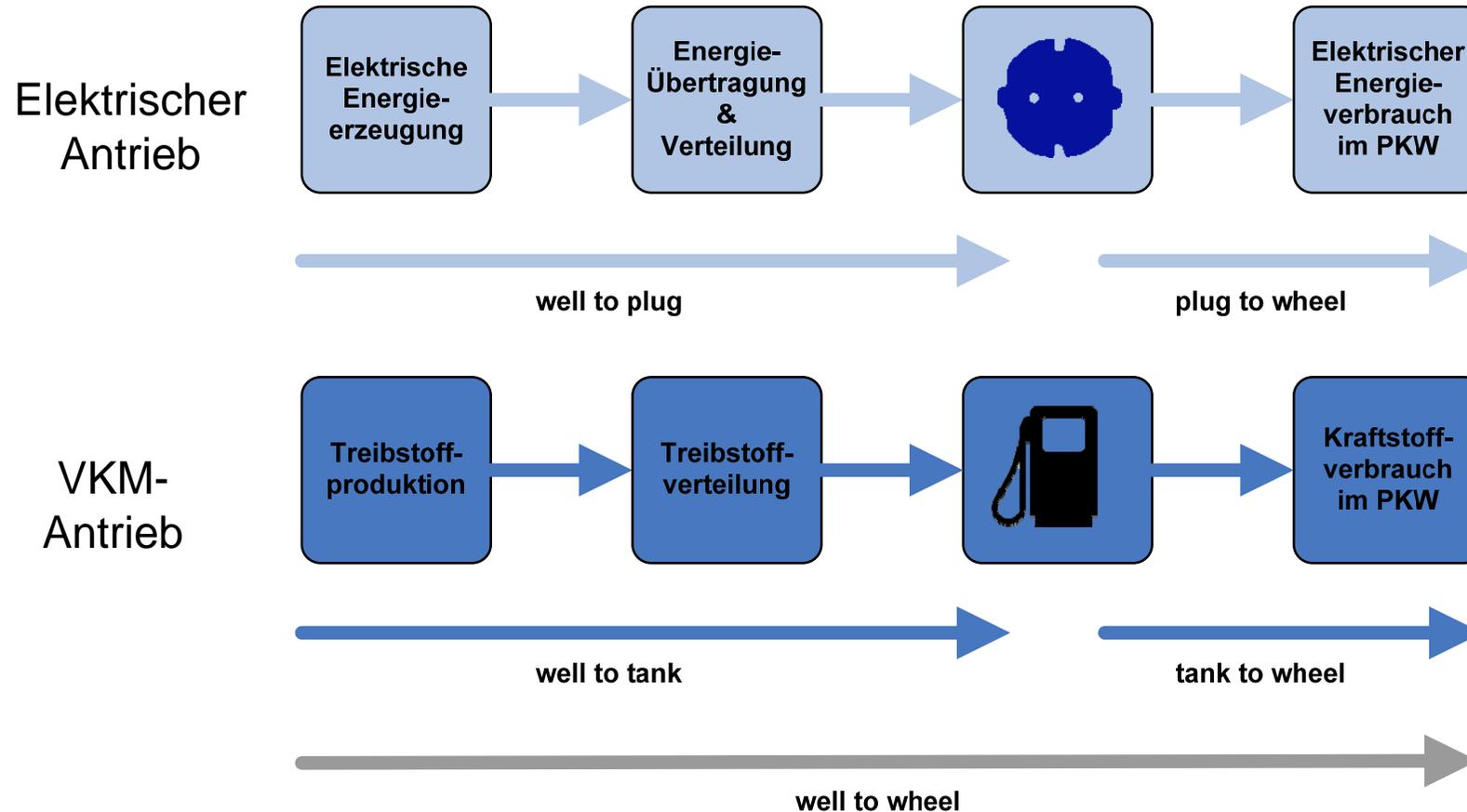
Notwendige Reichweite für künftige E-Fahrzeuge: Wegelängen von PKWs in Deutschland

- tägliche Fahrstrecke beträgt im Durchschnitt ca. 45 km
- 85% aller mit dem PKW zurückgelegten Wege unter 30 km

Wegelängen einzeln und kumuliert

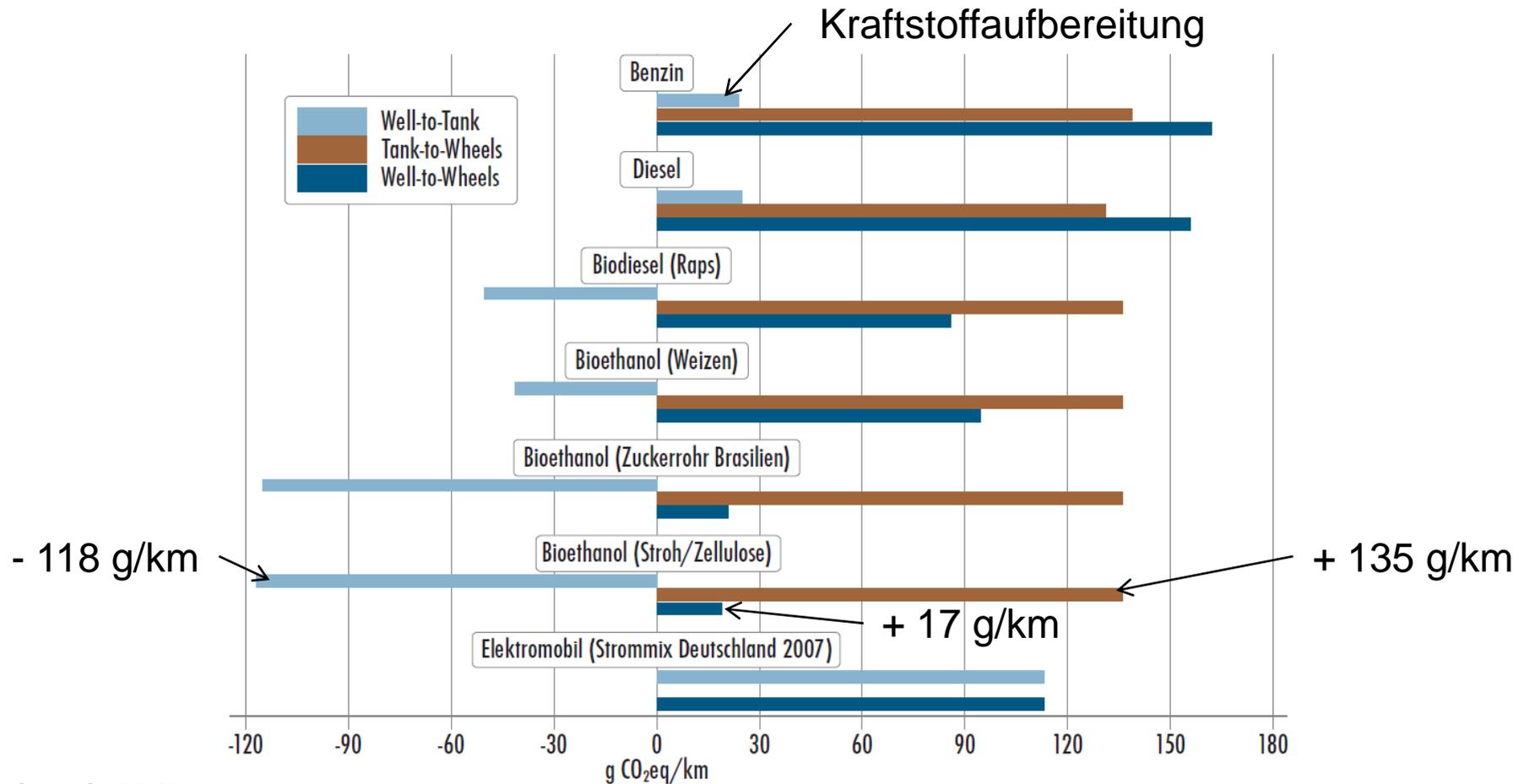


Energieträger – von der Quelle zum Rad



Quelle: Engel, T.: Plug-in Hybrids, Studie zur Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO₂-Emissionen im PKW-Verkehr bei verstärkter Nutzung von elektrischen Antrieben im Zusammenhang mit Plug-in Hybrid Fahrzeugen, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS) und Bundesverband für Solare Mobilität (bsm), München/Münster, 2007.

CO₂-Bilanz für Kraftstoffe im „Well-to-Wheel-Vergleich“



Vergleich PKW mit VKM- und E-Antrieb für eine Reichweite von 300 km



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

	Einheit	Benzin-VKM	E-Antrieb	Faktor
Reichweite	km	300	300	1
Durchschnittlicher Wirkungsgrad Antrieb	%	25	80	
Energieverbrauch (Treibstoffverbrauch)	l/100km	6,67		
Masse Energiespeicher	kg	16	480 @ 200 Wh/kg	30
Volumen Energiespeicher	dm ³	20	380	19
Energieinhalt im Speicher	MJ	688	270	0,4
	kWh	191,1	75*	0,4
Energieinhalt nach Antrieb	kWh	47	60**	1,25
Energieinhalt nach Antrieb pro 100 km im Fahrzyklus	kWh	15,9	20	1,25

* Betrieb der Batterie von 100% SOC auf 20% SOC ** Höherer Energieverbrauch bedingt durch größere Masse

Vergleich PKW mit VKM- und E-Antrieb für eine Reichweite von 300 km



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

	Einheit	Benzin-VKM	E-Antrieb	Faktor
Zeit der Energiebetankung	min	1	410 (6,8h)	410
	s	60	24500	410
Ladeleistung bezogen auf den Speicher	kW	11.500	11 @ U=400 V I=16 A	0,001 (1045)
Ladeleistung bezogen auf den Antrieb	kW	2.860	8,8	0,0027 (325)
CO ₂ -Emission bei Stromerzeugung in D	g/kWh		660*	
Energieinhalt nach Antrieb pro km	kWh	0,159	0,2	1,25
CO ₂ -Emission pro km	g	232**	132	0,57

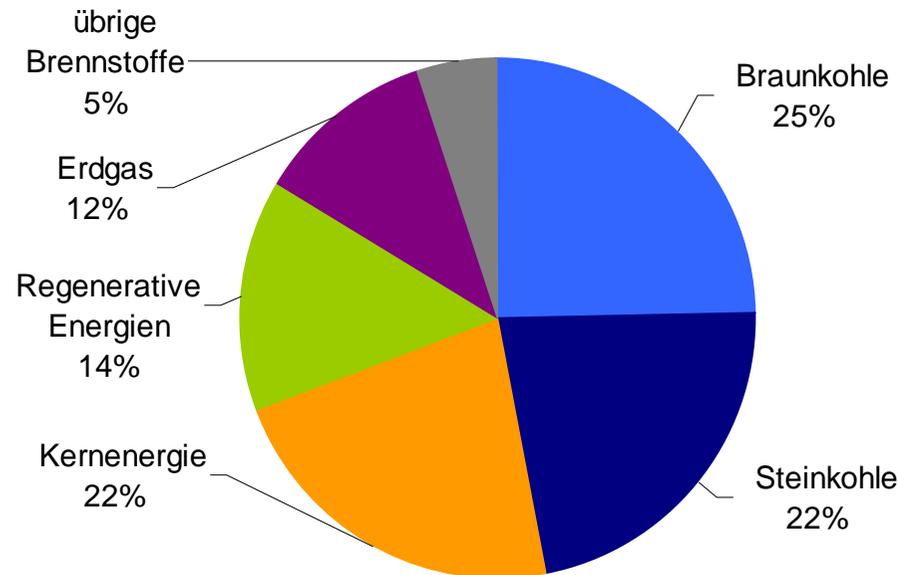
* Unter Berücksichtigung von ca. 10 % Stromübertragungsverluste

** Durch Verbrennung im Fahrzeug 192 g/km, durch Kraftstoffaufbereitung 40 g/km, Summe 232 g/km

Zusammensetzung der Stromerzeugung in D (2007) und A (2006)



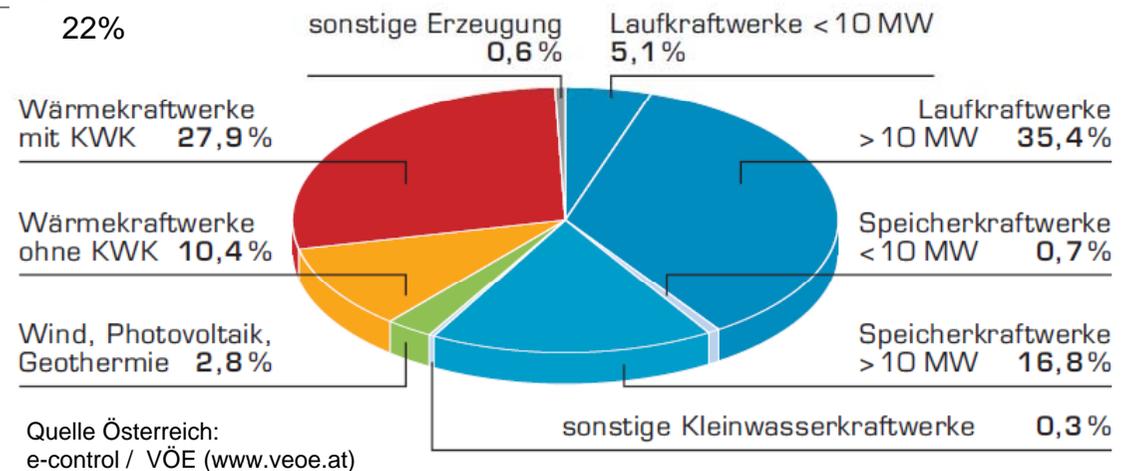
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Deutschland D

Quelle Deutschland:
GEMIS – globales Emissionsmodell in:
Schindler, T. : *Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Plug-in Hybridfahrzeugen (PHEV)*, Studienarbeit, Darmstadt, 2008

Österreich A



Quelle Österreich:
e-control / VÖE (www.veoe.at)

Luftemissionen bei der Stromerzeugung bzw. beim E-Fahrzeug



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Luftemissionen nach Erzeugung in $\text{g/kWh}_{\text{out}}$ (abgegebene Energie beim Kraftwerk) bzw. für das vorgestellte E-Fahrzeug in g/km

	CO_2 $\text{g/kWh}_{\text{out}}$	CO_2 g/km		CO_2 $\text{g/kWh}_{\text{out}}$	CO_2 g/km
Norwegen	14	3	Italien	522	116
Schweiz	39	9	Deutschland	594	132
Schweden	74	17	Indien	681	151
Frankreich	97	22	USA	691	154
Österreich	225	50	China	697	155
Kanada	261	58	Russland	718	160
Spanien	469	104	Australien	843	187
Großbritannien	515	114	Polen	967	215

Quelle Emissionen nach Erzeugung: Öko-Institut (Institut für angewandte Ökologie e.V.): GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) - Version 4.2, Stand Oktober 2004. <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm>

Elektrischer Energieverbrauch von E-Fahrzeugen



Elektrischer Energieverbrauch pro 100 km	20 kWh
Jahreskilometerleistung	15.000 km
Gesamtenergieverbrauch Antrieb pro Fahrzeug und Jahr	3 MWh
Elektrische Gesamtenergie für Speicher pro Fahrzeug	3,75 MWh
Gesamtenergieverbrauch für 1 Million PKWs pro Jahr	3,75 TWh
Gesamter elektrischer Energieverbrauch in D in 2008*	640 TWh
Prozentualer zusätzlicher Energieverbrauch durch 1 Million elektrisch angetriebener PKWs	0,6 %

* Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken,did=176662.html>

Zusammenfassung Fahrzeug



- Der elektrische Antriebsstrang für Straßenfahrzeuge besteht aus Batterie, Wechselrichter und elektrischer Maschine.
- Die permanenterregte Synchronmaschine wird bei E-Antrieben wegen der höheren Momentendichte bzw. Esson´schen Leistungszahl und des besseren Wirkungsgrades eingesetzt.
- Das größte Entwicklungspotential liegt in der elektrischen Energiespeicherung.
- E-Fahrzeuge mit einer Reichweite von 300 km könnten von den Verbrauchern durchaus akzeptiert werden.

Zusammenfassung Vergleich



- Der Energieinhalt pro Masse von fossilen Treibstoffen liegt auch unter Berücksichtigung des wesentlich besseren Wirkungsgrades bei elektrischen Antriebssystemen trotzdem um den Faktor 25 höher als bei derzeitigen Hochenergiebatterien.
- Der Leistungsfluss beim Tanken von fossilen Brennstoffen entspricht einer elektrischen Anschlussleistung von 11,5 MW.
- Der Umstieg von konventionellen Antriebssystemen (VKM) auf E-Antriebe erfolgt über den „Umweg“ der Hybridantriebe erst in mehreren Jahrzehnten.

Zusammenfassung Energiebereitstellung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Die elektrische Energiewirtschaft muss sich auf diesen Umstieg durch Bau und Betrieb von Kraftwerken mit erneuerbarer Energie (Sonne, Wind, Wasser) vorbereiten.
- Der Ausbau von Stromtankstellen muss gleichzeitig flächendeckend aufgebaut werden (z.B. berührungslos mit Induktionsschleifen od. automatisierter Austausch der Batterien).
- Der Vergleich der CO₂-Bilanz zwischen PKWs mit VKM und elektrischem Antrieb ist extrem abhängig von der länderspezifischen CO₂-Luftemission bei der Stromerzeugung.
- Der jährliche **zusätzliche** Bedarf an elektrischer Energie durch 1 Million elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge würde bezogen auf den gesamten Energieverbrauch ca. 0,6 % betragen.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Traktionssysteme Austria GmbH
Tel.: (+43) 2236 8118-250
E-Mail: harald.neudorfer@traktionssysteme.at



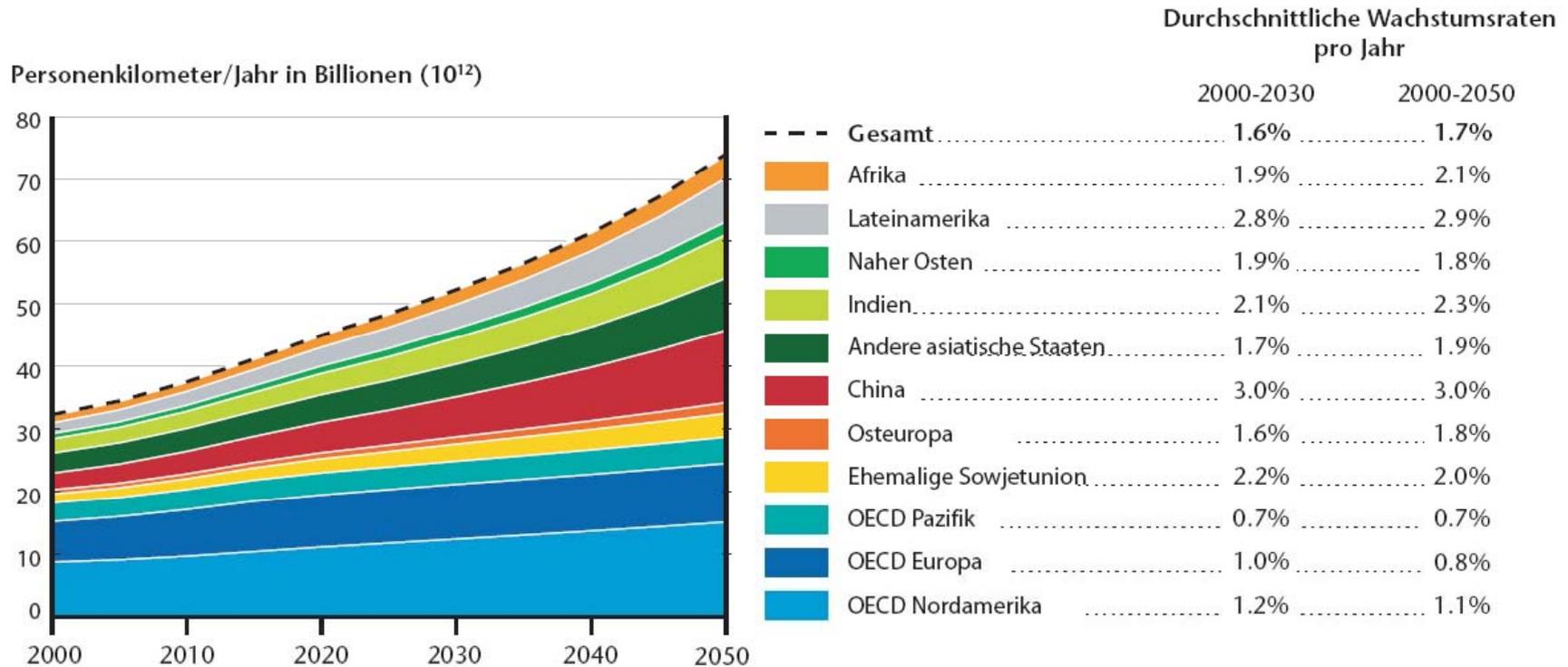
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut für Elektrische Energiewandlung
E-Mail: hneudorfer@ew.tu-darmstadt.de

Back up

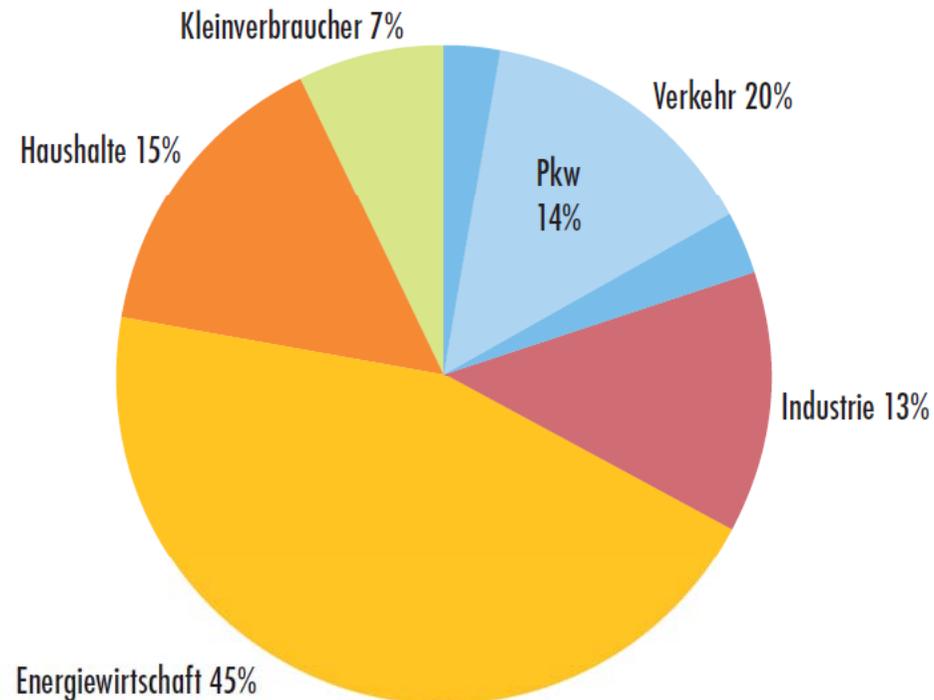
- Personentransportleistung nach Regionen
- CO₂-Emissionen in Deutschland
- Prognose PKWs mit elektrischen Antriebssystemen in Deutschland
- Entwicklung der Pro-Kopf-Verkehrsleistung in ausgewählten Ländern
- Klassifikation nach Hybrid-Varianten
- Durchschnittliche Jahresfahrleistungen nach Antriebsart in Deutschland
- Energieverbrauch

Personentransportleistung nach Regionen



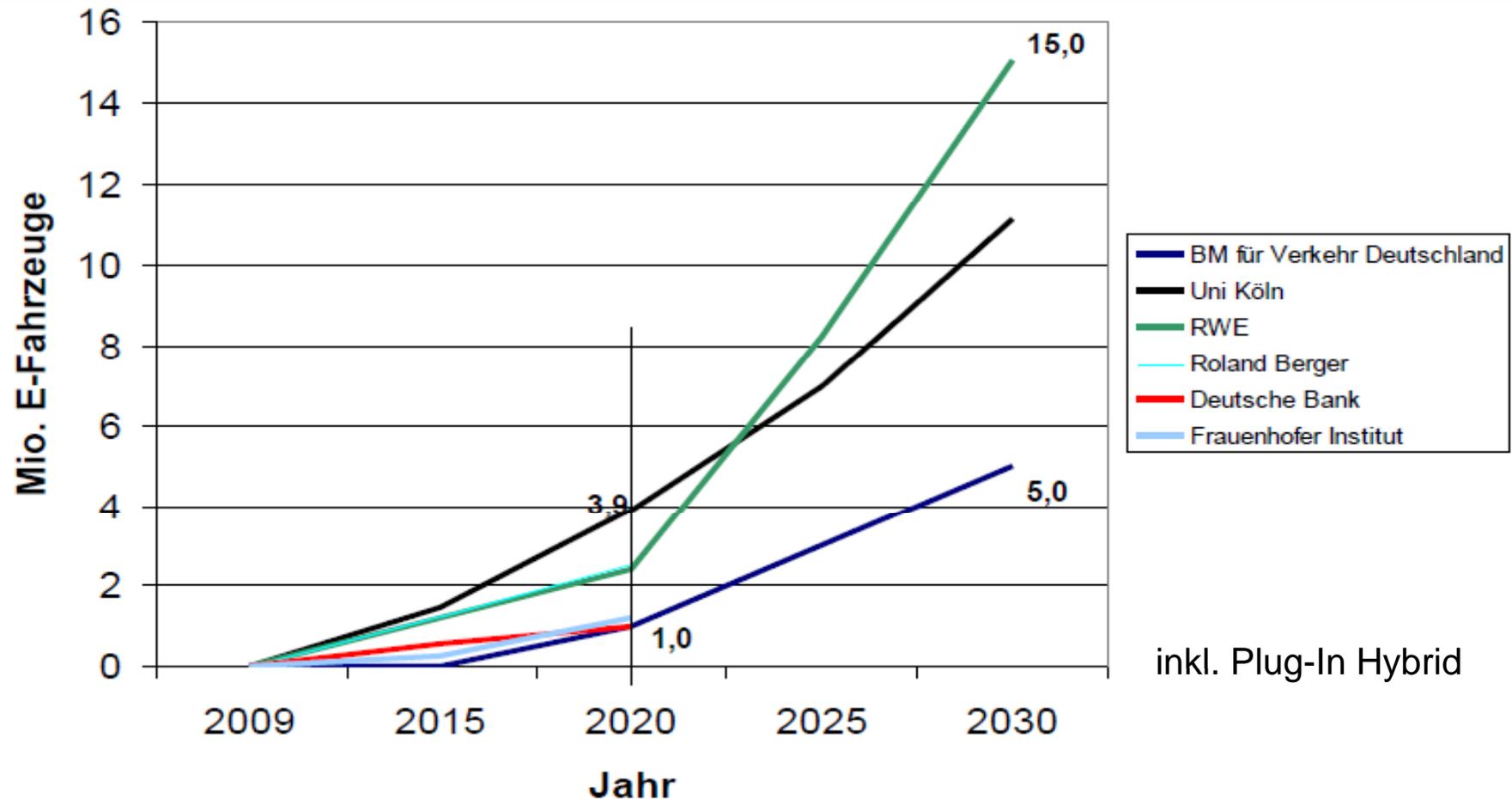
Quelle: World Business Council for Sustainable Development: Mobilität 2030: Die Herausforderungen der Nachhaltigkeit meistern, Conches/Genf Juli 2004. <http://www.wbcsd.org/web/mobilitypubs.htm>

CO₂-Emissionen in Deutschland



Quelle: UBA; eigene Berechnungen;
energiebedingte CO₂-Emissionen (2006)

Prognose PKWs mit elektrischen Antriebssystemen in Deutschland

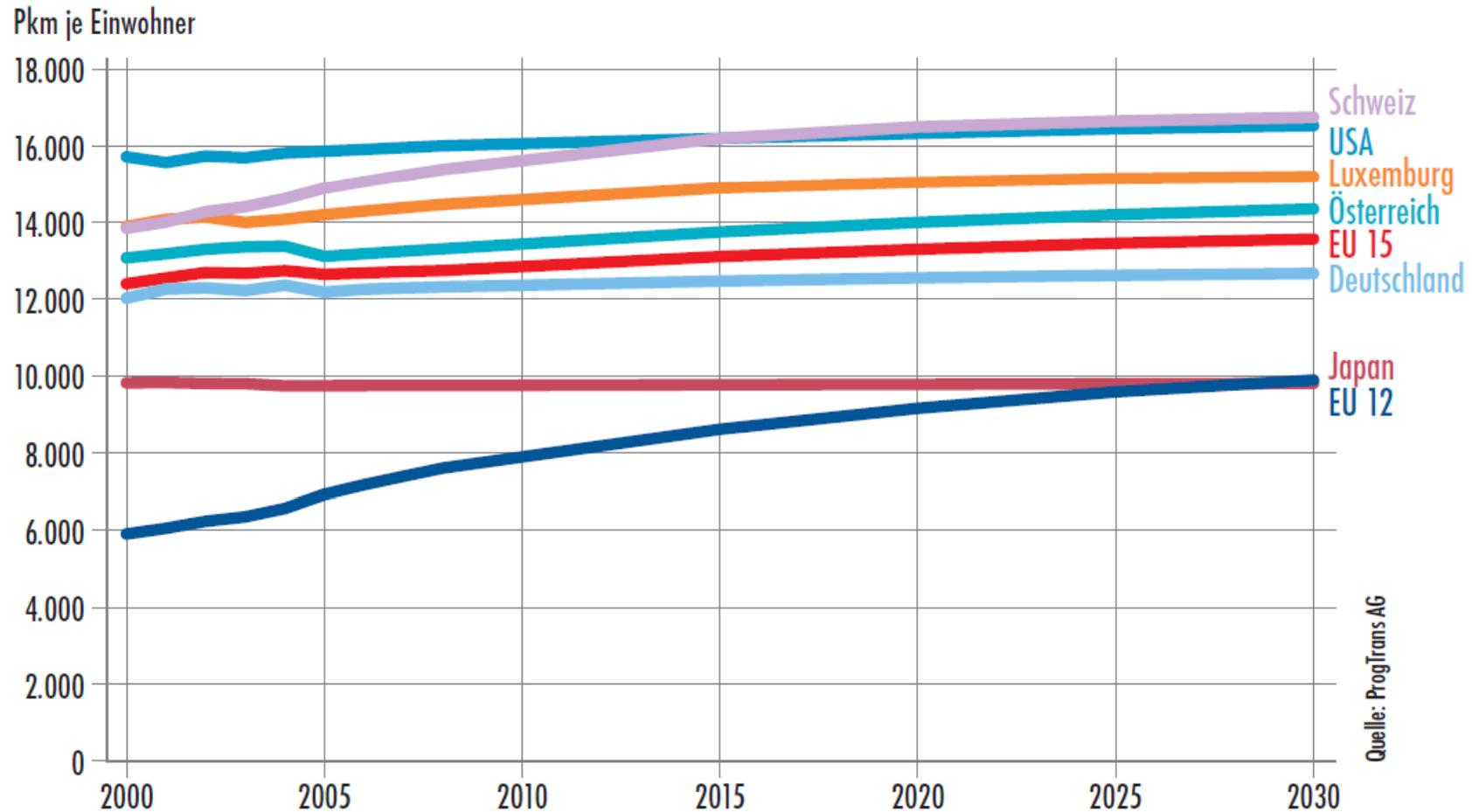


Quelle: Freisais, B.: Alternative Antriebe Perspektiven – Produkte – Fakten. Linz, Juni 2009

Entwicklung der Pro-Kopf-Verkehrsleistung in ausgewählten Ländern



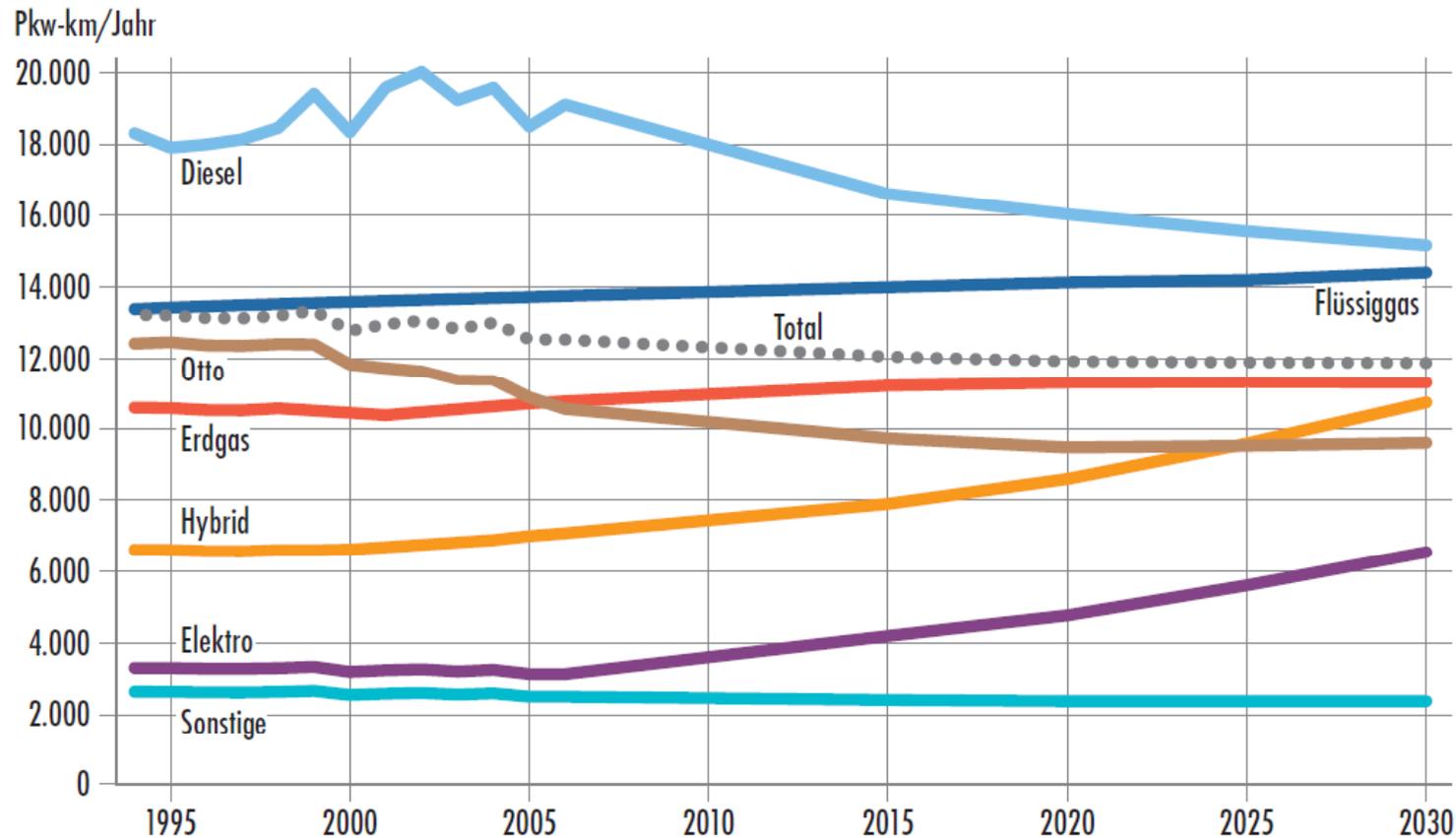
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Klassifikation nach Hybrid-Varianten

	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Full-Hybrid
Leistung (maximal)	max. 2 - 3 kW	max. 10 - 15 kW	> 15kW
Spannung	12 V	42 - 150 V	> 100 V
Start & Stopp	•	•	•
Lastpunktanhebung	(•)	•	•
Rekuperieren	(•)	•	•
Boosten		•	•
Elektrisches Fahren			•

Durchschnittliche Jahresfahrleistungen nach Antriebsart in Deutschland



Quelle: Shell PKW Szenarien bis 2030, Hamburg 2009

Energieverbrauch

Fahrzyklus	Betriebsmodi (Verbrauch pro 100km)			
	rein elektrisch	VKM dominiert		Referenzf.
NEFZ	20,5 kWh	0,7 kWh	6,0 l	7,5 l
UDDS (FTP-72)	19,3 kWh	-0,6 kWh	5,9 l	7,9 l
120 km/h konstant	25,6 kWh	1,1 kWh	6,9 l	6,9 l