

Elektromotoren für mobile Anwendungen

eScooter Research Workshop, Sept. 2011, Bluetech Winterthur



1. Wie funktionieren sie?
2. Bauarten?
3. Umweltauswirkungen?

Marcel Gauch, Rolf Widmer, **Hans-Jörg Althaus**, Andrea Del Duce

marcel.gauch@empa.ch

TSL Technology and Society Lab @ EMPA

Schweizerische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt

Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

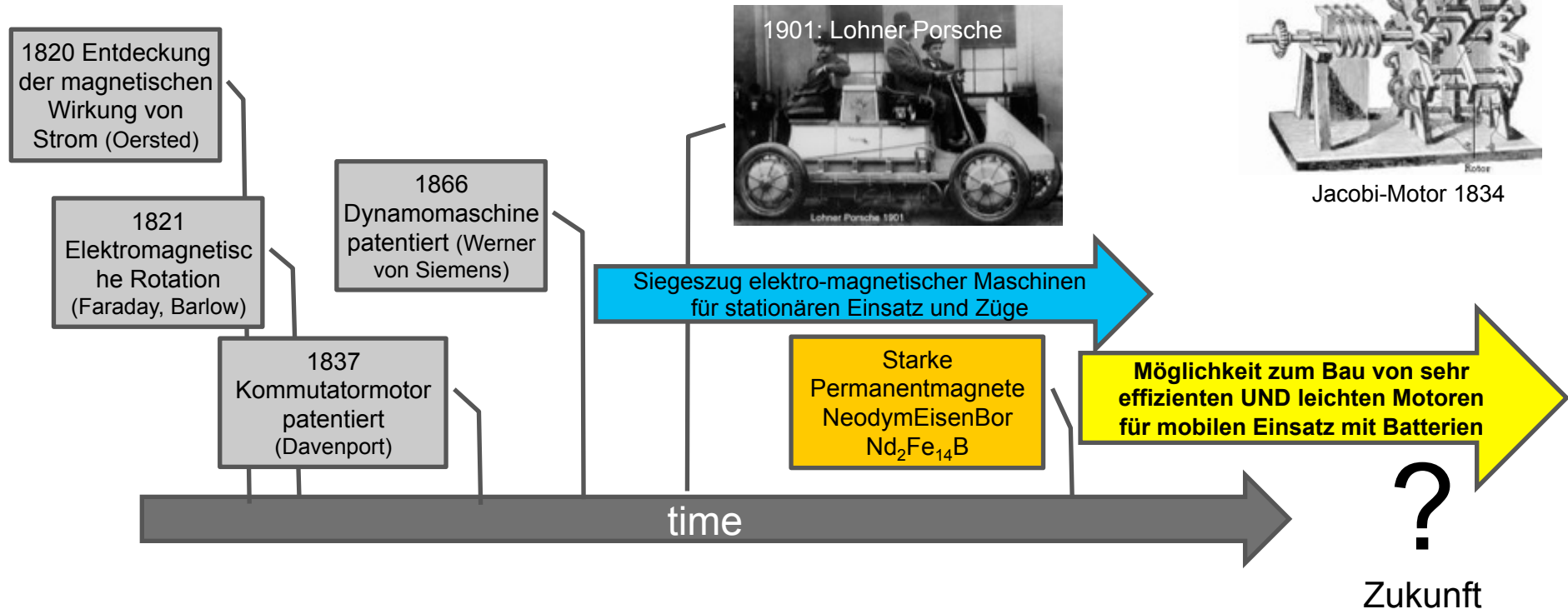


Foto: Empa (spm07 CN)

Inefficient recycling in developing countries

Elektromotoren – eine alte Technologie

Der Elektromaschinenbau hat eine fast 200-jährige Geschichte



Heute:

- Ein Wirkungsgrad von bis zu 98 Prozent ist technisch machbar
- Es gibt heute noch kaum Maschinen, die gleichzeitig effizient UND gewichtsoptimiert sind
- Aus Beispielen (Modellflug, Solar Impulse) lässt sich erahnen, wo die Effizienz- und Gewichtsgrenzen liegen könnten bei Verwendung modernster Technologien und Materialien (Seltene Erden)
- **ABER: Ist der Nutzen der Seltenen Erden wirklich grösser als der Umweltschaden bei deren Gewinnung? 'Lohnt' sich die Verwendung von Neodym-Magneten?**

Elektromotoren – Funktion

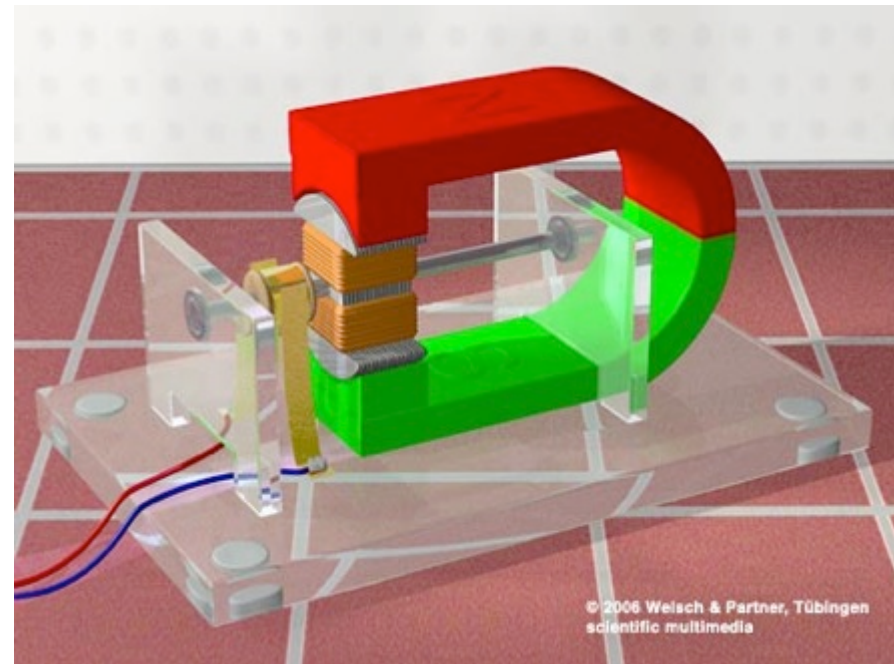
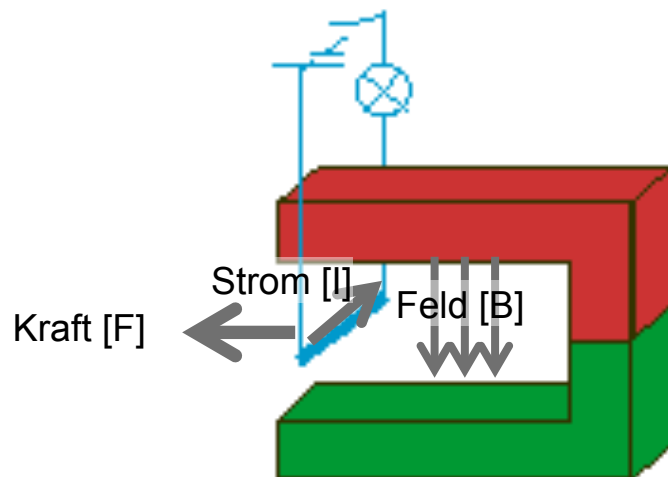
Basis: Lorentzkraft



Daumen: Zeigt in Richtung des Stromflusses
 Zeigfinger: Zeigt in Richtung des Magnetfeldes
 Mittelfinger: Zeigt in Richtung der resultierenden Kraft

Strom [I]
 Feld [B]
 Kraft [F]

Auf einen stromdurchflossenen Leiter wirkt im Magnetfeld eine Kraft, die man in einer geschickten Konstruktion für einen Antrieb nutzen kann

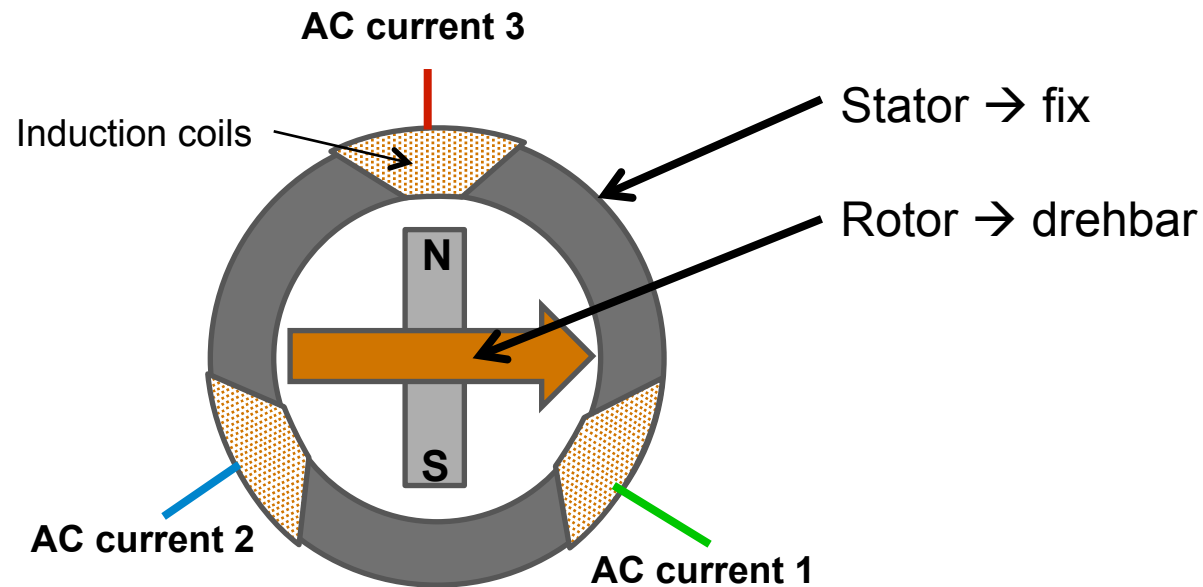


Elektromotoren – Funktion

Ein Elektromotor dreht sich wegen den Kräften, die Magnetfelder aufeinander ausüben

Erzeugung des Magnetfelds: Durch Permanentmagnete oder Spulen

*Eines der Felder muss umschaltbar sein, d.h. ein Elektromagnet
Das zweite Magnetfeld kann ein Permanentmagnet oder ein Elektromagnet sein*



Elektro- vs Permanentmagnet

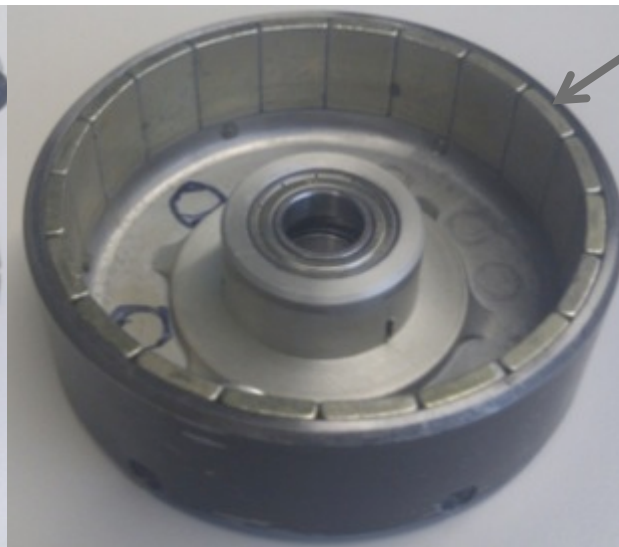
- Magnetfelder können mit Leiter- oder Molekularkreisströmen erzeugt werden:
- dh. Leiterspulen oder Permanentmagnete, letztere sind verlustfrei!
- (Ökobilanz)-Frage:

Was ist aufwändiger: die Herstellung von Seltenerdmetallen oder die Herstellung einer Kupferspule plus dem nötigen Strom

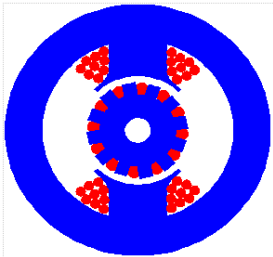
Elektromagnet



Permanentmagnet
(oft Neodym-
Eisen-Bor)



Elektromotoren – Bauarten



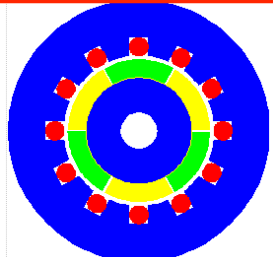
Gleichstrommotor – mech. Polumschaltung (Bürsten)
Für die Erregung (Erzeugung des Magnetfeldes) gibt es folgende Varianten:

Hauptschluss (Erregung im Ankerstromkreis)

Neben- und Fremdschluss (Erregung unabhängig des Ankerstromes)

Compoundschluss (Kombination oberer Varianten)

Permanenterregung möglich (Erregung mit Magneten)

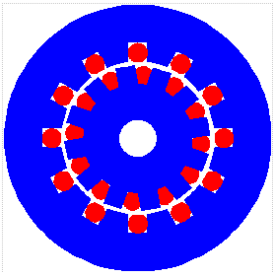


Synchronmotor – z.B. PM Brushless-DC (viele eScooter)

Erregung im Rotor, Stator dreht → vertauscht.

Braucht bei tiefen Drehzahlen und hoher Last einen Positionsregler

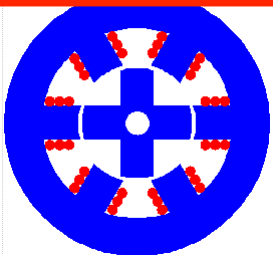
Permanenterregung möglich (Erregung mit Magneten)



Asynchronmotor – häufigster Industriemotor

Vollständig normiert, robust, sehr weit verbreitet.

Drehzahl ist kleiner als synchrone Drehzahl, je höher der Schlupf desto höher das Drehmoment. Erregung durch Induktion in kurzgeschlossener Rotorwicklung.



Reluktanzmotor – günstige Kleinmotoren

Ähnlich Asynchronmotor mit Eisenrotor. Wird bei Nenndrehzahl zum Synchronmotor. Normalerweise geringe Wirkungsgrade für einfache Anforderungen, mit hochwertigen Reglern und Drehgebern optimierbar bis über 95% (Tokyo University of Science 2011).

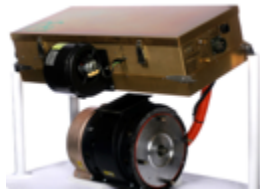
Elektromotoren – Varianten

- riesige mögliche Bandbreite an Konstruktionen
- es gibt gute und schlechte Beispiele für jede Bauart!
- tendenziell: Permanentmagnetmotoren sind effizienter



Standard asynchrone industrial motor 132S-2
48 kg
7.5kW_nom 22kW_peak
24.7Nm_nom 72Nm_:Anfahr
87%

0.16 kWnom/kg 0.5kWpeak/kg
0.51 Nmnom/kg 1.5 Nmpeak/kg



4-pole induction motor - AC Propulsion (as licenced by Tesla)
50kg + 30kg electronics
200kW_peak, D305 x 381mm, 220Nm 0-5000min-1
91% peak @50kW
86% @8kW road load

? kWnom/kg 4 kWpeak/kg



Hybrid induction/PM motor HSM 6-17.12 - Brusa
53kg + 10kg electronics DMC524 (97%_nom)
37kW_nom, 88kW_peak, D245 x 284mm,
85Nm_nom 220Nm_peak
95%_nom

0.7 kWnom/kg 1.7 kWpeak/kg
1.5 Nmnom/kg 4.2 Nmpeak/kg



Brushed PM motor Lynch
11kg
8.5kW_nom, 20kW_peak, D206 x 140mm,
32Nm_nom 50Nm_peak
88%

0.8 kWnom/kg 1.8kWpeak/kg
2.9 Nmnom/kg 4.6 Nmpeak/kg



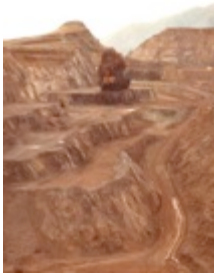
Brushless PM motor Joby JM1
2.8kg
13.2kW_nom, 20.1kW_peak, D154 x 65mm,
21Nm_nom 32Nm_peak
90-96%

4.7 kWnom/kg 7.2kWpeak/kg
7.5 Nmnom/kg 11.4 Nmpeak/kg

Vergleich: KTM 450SX ca. 1.3kWpeak/kg

eScooter

Neodym



Kupfer für





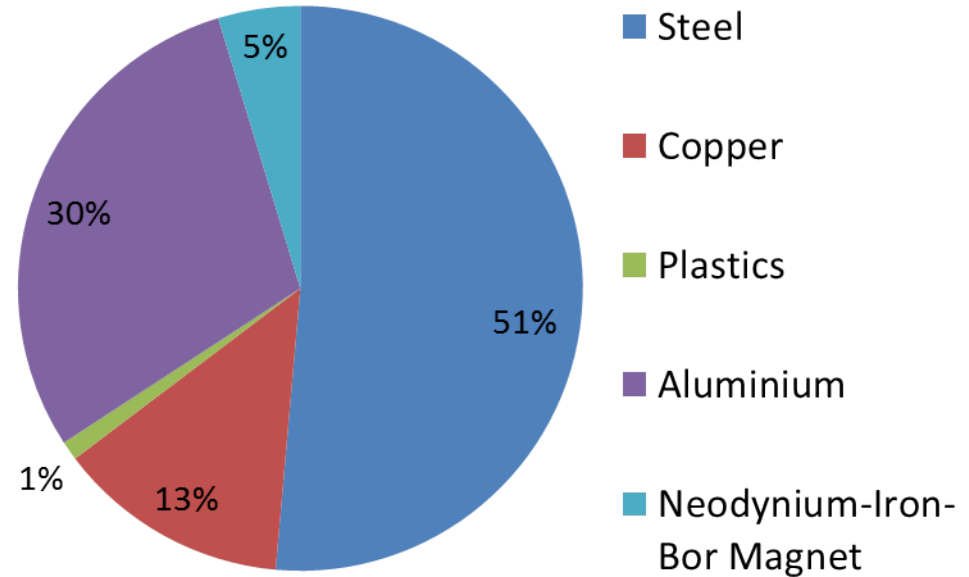
LCA von Elektromotoren

Material composition



Foto: Empa

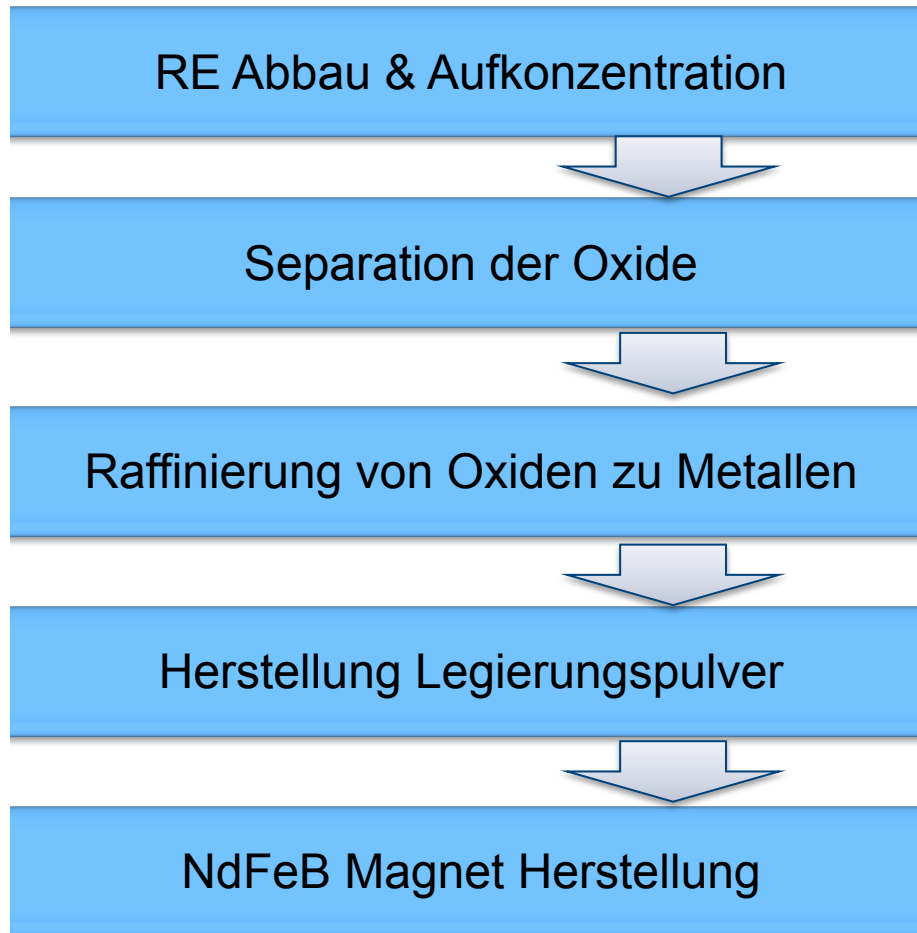
Nabenmotor bis ca. 4kW Leistung, Gewicht 6.5 kg

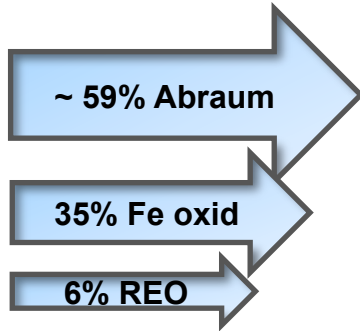


Rotor mit ca. 300g
Permanentmagneten

Motor Designation	Hub-Motor 30 - 45 km/h class						
kW cont./max (air/watercooled)	1 / 4						
Nm cont./max (air/watercooled)	?						
Volt range	48 - 90						
approx. total weight		kg		6.5			
Composition	ecoinvent composition						
		Unit	%	kg	factor	amount	
Dynamo-Blech	steel, low-alloyed, at plant	kg	10.0%	0.650	1.250	0.813	
Cu	copper, at regional storage	kg	13.3%	0.865	1.250	1.081	
Kunststoff	Polyphenylene sulfide, at plant/GLO U	kg	1.1%	0.072	1.100	0.079	
Al	Aluminium, production mix, at plant/RER U	kg	29.5%	1.918	1.250	2.397	
Stahl	steel, low-alloyed, at plant	kg	41.4%	2.691	1.250	3.364	
Messing Ms		kg	0.0%	0.000	1.250	0.000	
Magnete Neodym-Eisen-Bor	see below for composition	kg	4.7%	0.306	1.100	0.336	
TOTAL		kg	100.0%	6.5		8.068	

Herstellung von Permanentmagneten





Salz- & Schwefelsäure

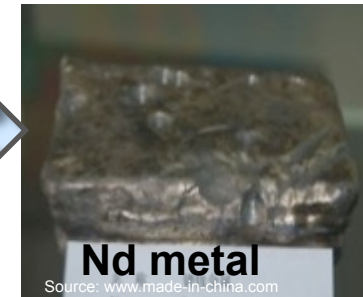
Natriumhydroxid

Roasting & Leaching



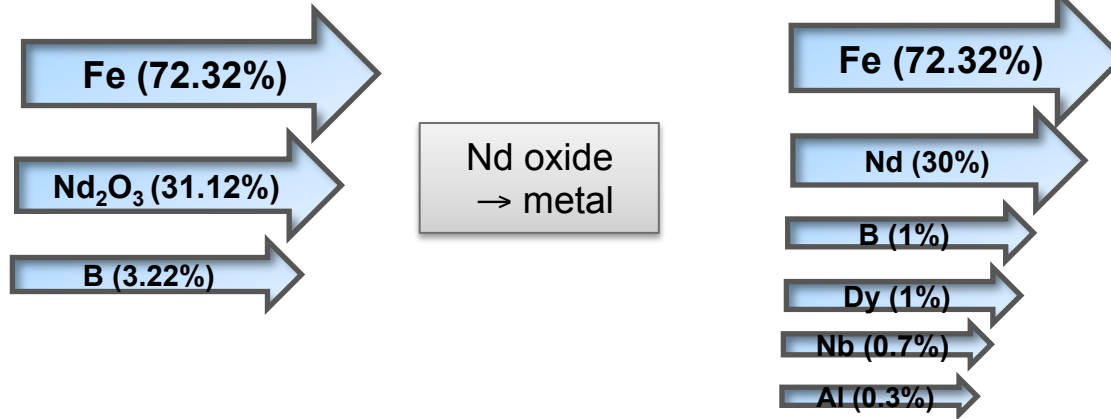
Schlamm

Solvent extraction



Produktion von $Nd_2Fe_{14}B$ Magneten

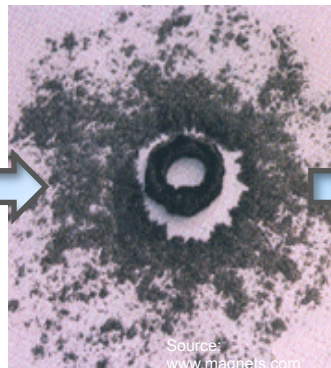
Vakuum Schmelzofen



Pulverisieren



NdFeB Pulver



Formpressen (Magnetfeld) Sintern & Magnetisieren



Beschichten
(Ni-Cu-Ni, Al IVD, epoxy)



-> Fertiger Magnet
Einbau in Motoren
und Generatoren

Aufbau Öko-Inventar von Nd₂Fe₁₄B Magneten

NdFeB Legierung Produktion

Input materials for NdFeB alloy	formula	g	Ecoinvent input material	kg
Neodymium oxide	Nd ₂ O ₃	336.48	Neodymium oxide, at plant/CN U	0.280
Iron oxide	Fe ₂ O ₃	781.9	Pig iron, at plant/GLO U	0.651
Boric oxide	B ₂ O ₃	34.81	Boric oxide, at plant/GLO U	0.029
Dysprosium oxide	Dy ₂ O ₃	17.41	Lanthanum oxide, at plant/CN U	0.014
Neobium oxide	Nb ₂ O ₅	20.02	Lanthanum oxide, at plant/CN U	0.016
Alluminium oxide	Al ₂ O ₃	11.33	aluminium oxide, at plant	0.010
		1201.95		1

NdFeB Magnete Produktion

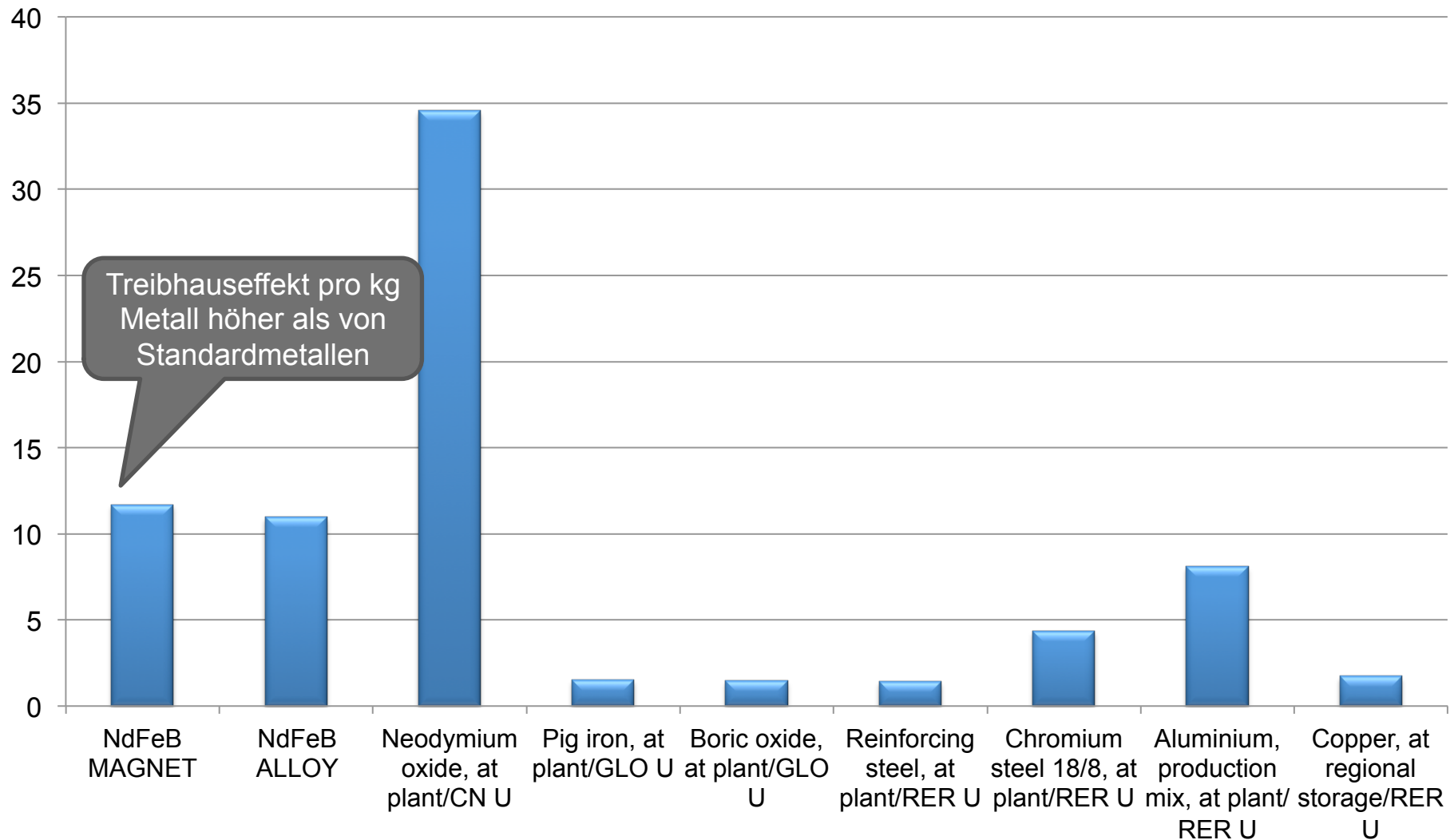
Operation	Input	Amount	Reference unit	Source
Melting	heat	1.458 MJ	kg of magnet	calculation
	vacuum	100 kWh	t of magnet	estimation
cooling strip caster	water	120 t	t of magnet	www.ulvac.com/other/fmi.asp
	electricity	1 kWh	t of magnet	estimation
crushing and pulvizing	electricity	4 kWh	kg of magnet	calculation
compacting	electricity	30 kWh	t of magnet	www.x-magnet.net/Machinery
sintering 1	heat	1.166 MJ	kg of magnet	calculation
sintering 2	heat	0.950 MJ	kg of magnet	calculation
cooling	water	240 t	t of magnet	estimation
grinding and slicing	electricity	1 kWh	t of magnet	estimation
coating	electricity	1 kWh	t of magnet	estimation
Solenoid charging	electricity	2 kWh	t of magnet	estimation

- Inventar ist zZ im Test und wird in den nächsten Wochen fertig sein
- es fehlen v.a. die Auswirkungen der Hilfsstoffe in der Raffinierung sowie der Entsorgung der Schlämme

- einige Zahlen:
 - 1kg Nd-Metall kostet z.Z. ca. 450US\$
 - Magneten enthalten ca. 280g/kg Nd-Metall
 - eScooter benötigt ca. 300g Magnete, d.h. ca. 85g Neodym für ca. 40US\$

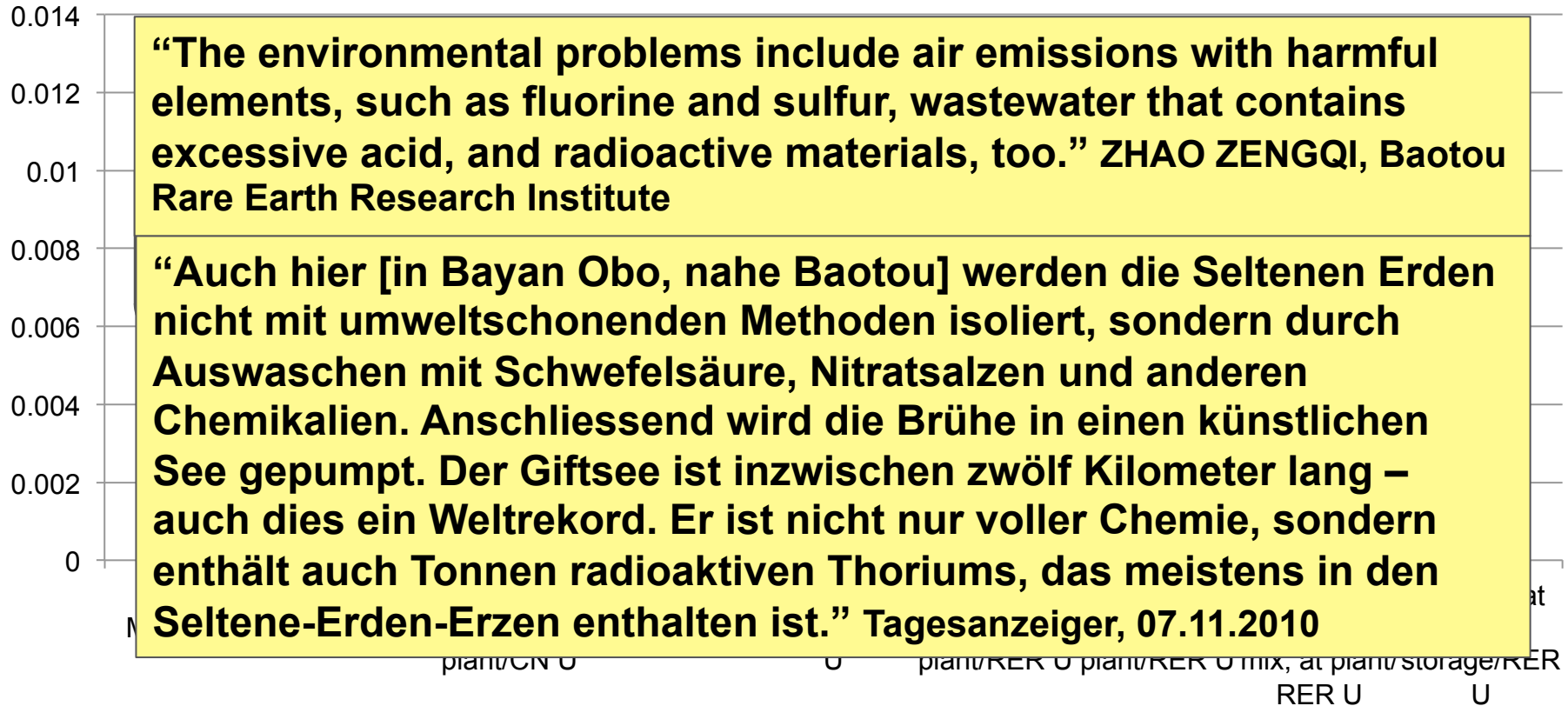
Ökobilanz – Vergleich mit Standardmetallen

Treibhauseffekt pro kg Metall [kg CO₂-eq./kg] (IPCC 2001 GWP 100a)



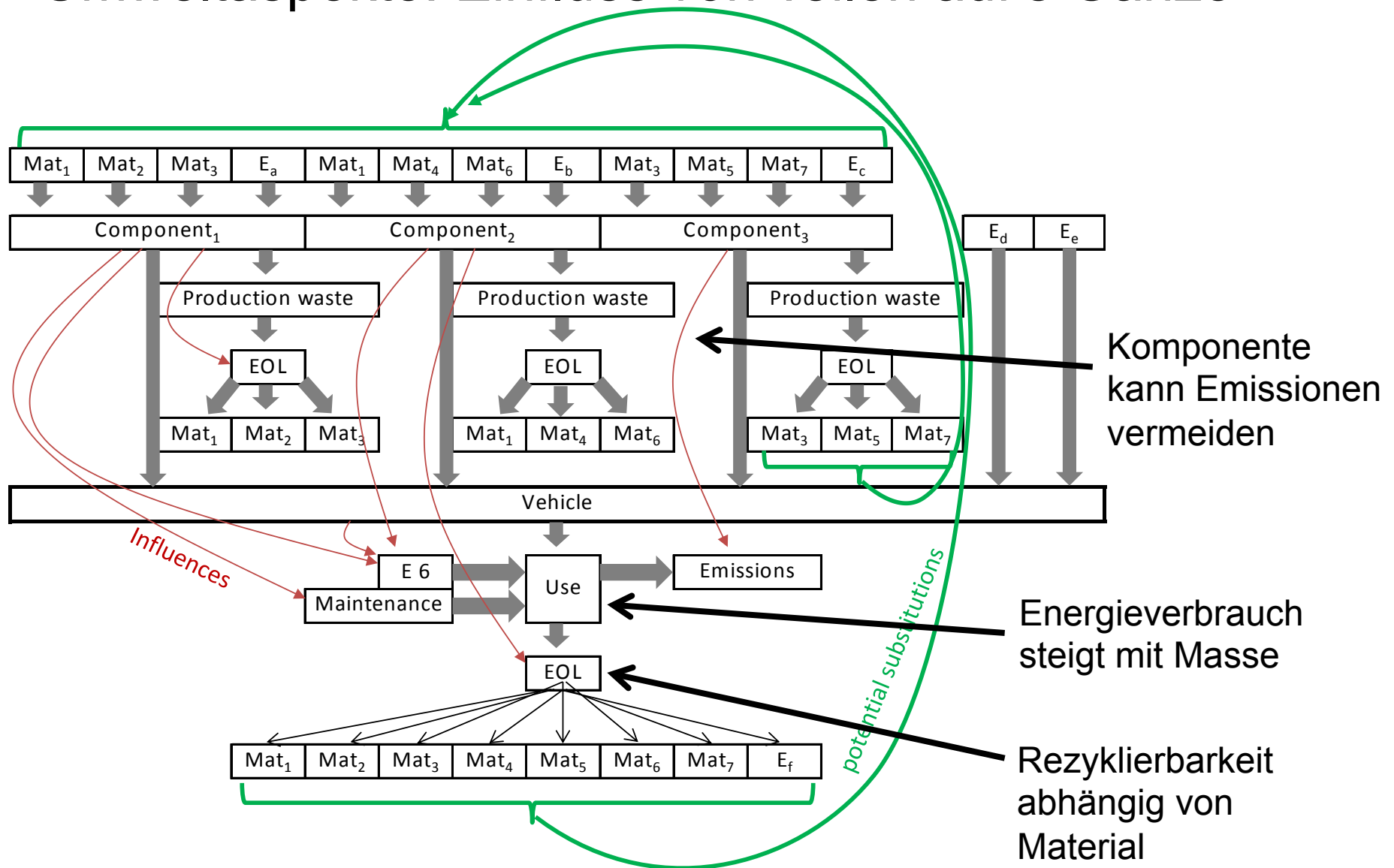
Ökobilanz – Vergleich mit Standardmetallen

Gesamt-Umweltimpact [Pt./kg] (Eco-indicator 99 (H) v 2.08)

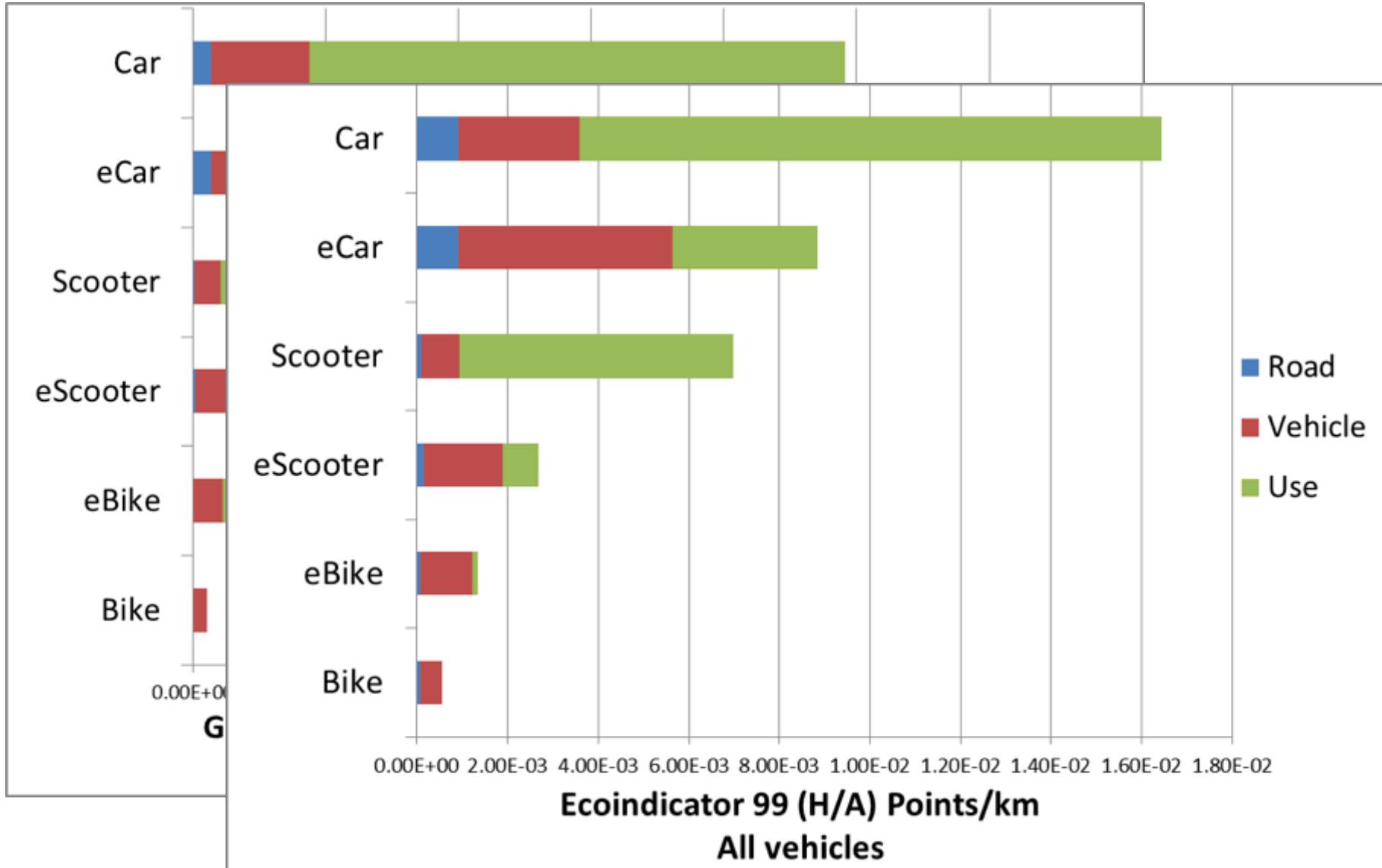


- | | | |
|------------------|---------------------------------|--------------------|
| ■ Carcinogens | ■ Resp. organics | ■ Resp. inorganics |
| ■ Climate change | ■ Radiation | ■ Ozone layer |
| ■ Ecotoxicity | ■ Acidification/ Eutrophication | ■ Land use |
| ■ Minerals | ■ Fossil fuels | |

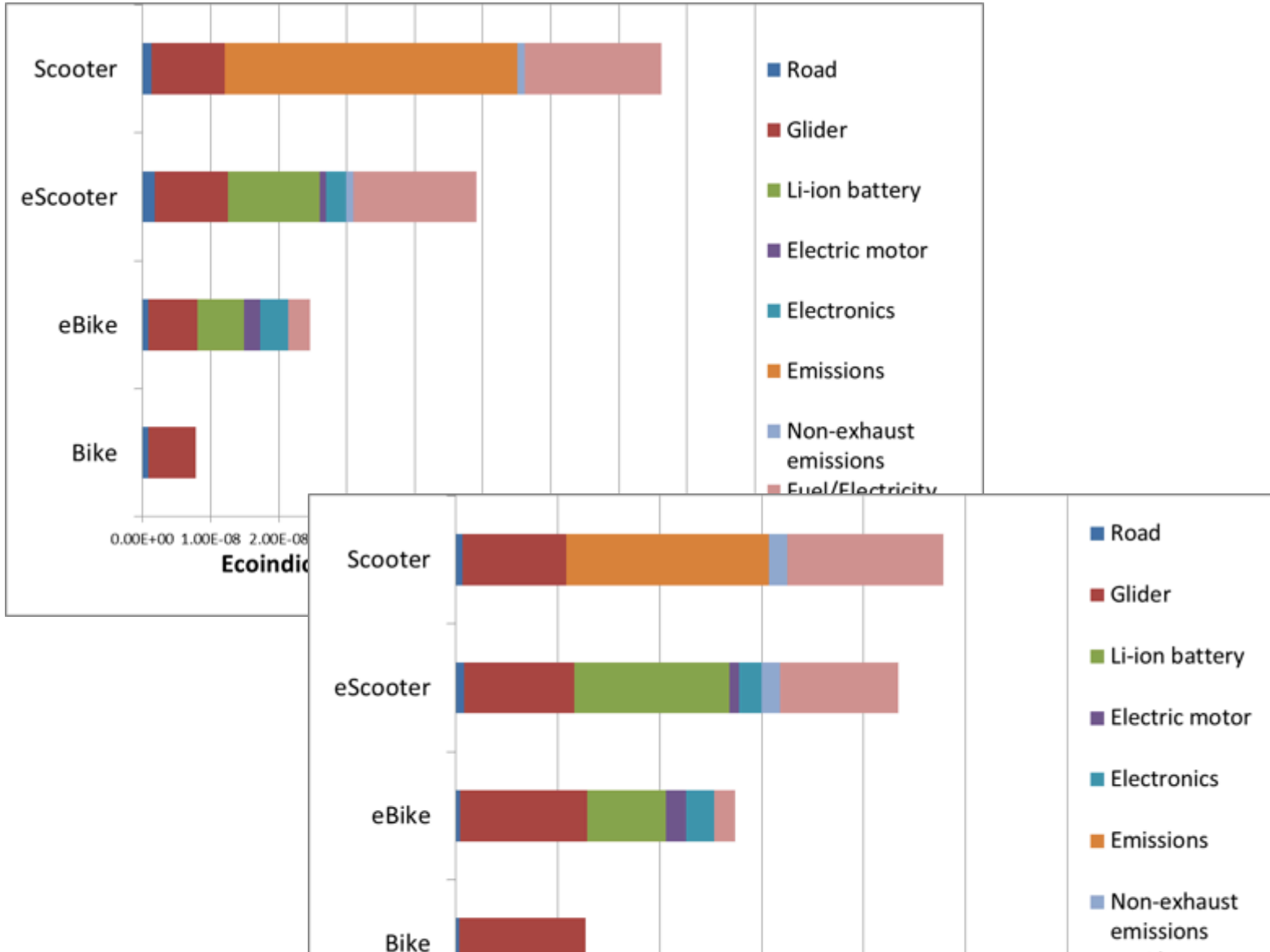
Umweltaspekte: Einfluss von Teilen auf's Ganze



Ökobilanz – eBike und eScooter



Ökobilanz – eBike und eScooter



Folgerungen

- Unterschiedliche Motoren können die Umweltbelastung eines E-Scooters in 4 Punkten beeinflussen:
 - Unterschiedliche Materialien und Prozesse zu deren Gewinnung
 - Unterschiedliche Leistungselektronikkomponenten
 - Unterschiedliches Gewicht Motor und Controller → unterschiedlicher Energiebedarf am Rad → unterschiedlicher Energieverbrauch
 - Unterschiedliche Effizienz Motor (und Controller) → unterschiedlicher Energieverbrauch

Relevanz noch
unklar

Relevanz bei "sauberem"
Strom gering.

Ausblick

Designoptionen eines Zweirads

- Dematerialisierung:
 - Leichtbau ohne Trade-Off. Wieviel leichter muss ein Fahrzeug sein, um den ökologischen Mehraufwand durch die Verwendung leichter Materialien zu kompensieren?
 - Alu, Magnesium, Verbundwerkstoffe
 - Ultraleichter Range Extender für 2-Räder statt Batterien, Grenznutzen Gewicht/Effizienz?

- Verlängerung der Lebensdauer:
 - Einfluss smart electronics auf Lebensdauer

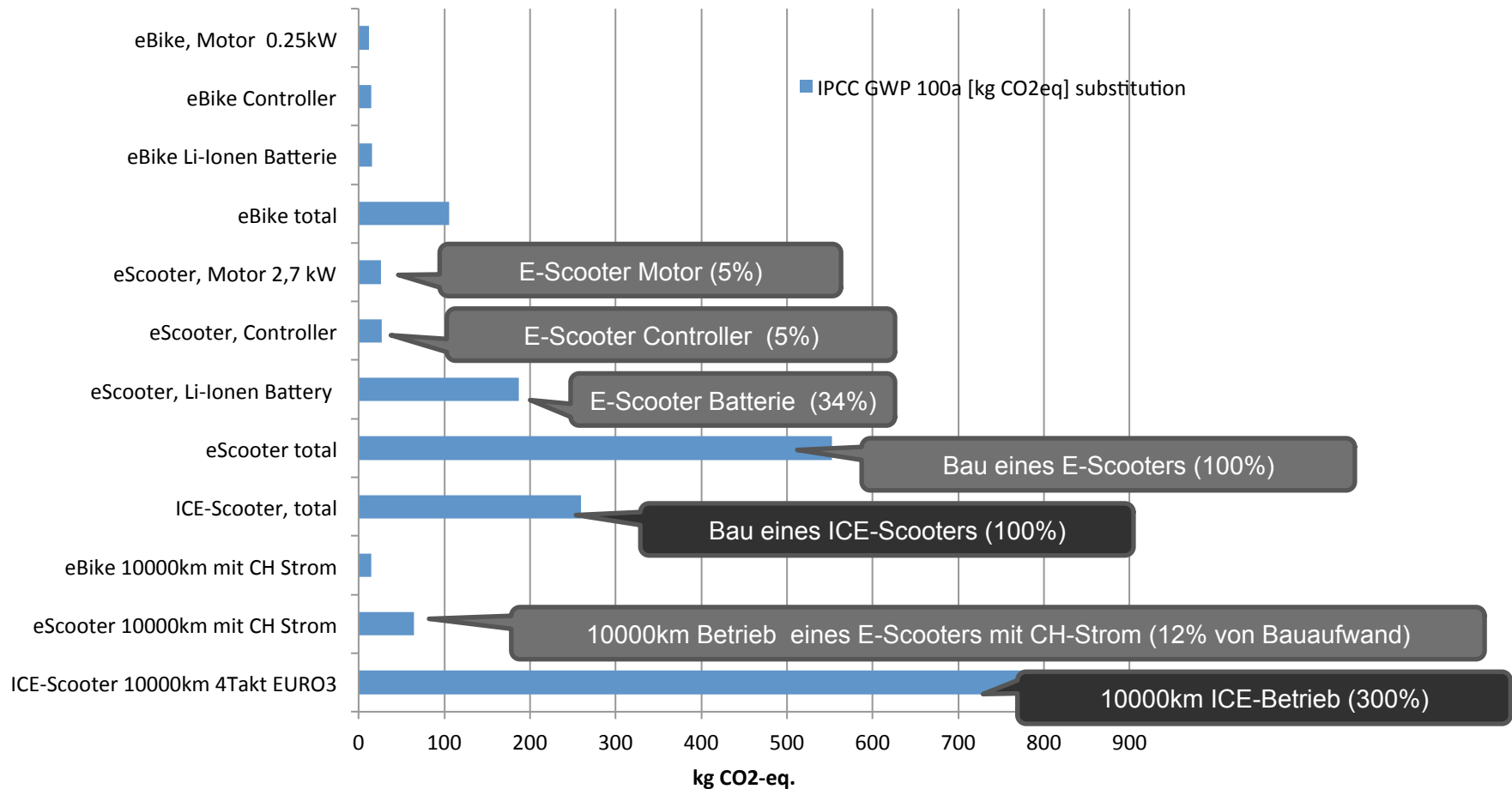
- Seltene Elemente:

Design mit seltenen Elementen: Ist der Nutzen während der Lebensdauer grösser als der Schaden durch die Gewinnung resp. Rückgewinnung? Randbedingungen wie Möglichkeit zum Rezyklieren?

 - Bsp: NdFeB Magnete vs. Elektromagnete
 - Bsp: Cobalt vs. Silizium in Statorblechen / Ferromagnetisches Eisen (möglicher Drehmoment/ Effizienzgewinn durch höhere Sättigungsgrenze)
 - Bsp: Si vs. Si-Nitrid vs. Gallium-Nitrid in Leistungshalbleitern. Weniger Gewicht, höhere Effizienz, weniger Verbrauch.
 - Bsp: Cu vs. Lichtleiter für Informationsübertragung in Fahrzeugen (Einweben von Lichtfasern in Verbundwerkstoffe)

Ökobilanz – eBike und eScooter

IPCC GWP 100a [kg CO₂eq] substitution



Ökobilanz – eBike und eScooter

IPCC GWP 100a [kg CO₂eq] substitution

