

Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität

Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen

Anhang zum Schlussbericht im Rahmen der Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Autoren:

Öko-Institut e.V.

Dr. Matthias Buchert; Kontakt: m.buchert@oeko.de

Dr. Wolfgang Jenseit

Stefanie Dittrich

Florian Hacker

Daimler AG

Dr. Eckhard Schüler-Hainsch

Dr. Klaus Ruhland

Sven Knöfel

TU Clausthal

Prof Dr. Daniel Goldmann

Kai Rasenack

Umicore

Frank Treffer

Darmstadt, 28. Oktober 2011

Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg, Deutschland

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg, Deutschland

Tel. +49 (0) 761 - 4 52 95-0

Fax +49 (0) 761 - 4 52 95-88

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt, Deutschland

Tel. +49 (0) 6151 - 81 91-0

Fax +49 (0) 6151 - 81 91-33

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin, Deutschland

Tel. +49 (0) 30 - 40 50 85-0

Fax +49 (0) 30 - 40 50 85-388

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Ziele des Arbeitspakets	6
3	Methodisches Vorgehen	7
4	Kurzbeschreibung Antriebstypen Elektromobilität und Marktprognosen	9
4.1	Kurzbeschreibung der Antriebstypen Elektromobilität	9
4.1.1	Hybrid Fahrzeuge (Mild-Hybrid Electric Vehicle und Full-Hybrid Electric Vehicle – MHEV und FHEV)	10
4.1.2	Plug-In-Hybrid Fahrzeuge (Plug-In-Hybrid Electric Vehicle – PHEV)	11
4.1.3	Range-Extender Fahrzeuge (Range-Extender Electric Vehicle – REEV bzw. REX)	11
4.1.4	Batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle – BEV)	12
4.1.5	Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV)	12
4.2	Komponenten von Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen	13
4.2.1	Hybrid Fahrzeuge (MHEV, FHEV und PHEV)	13
4.2.2	Range-Extender Fahrzeuge (REEV bzw. REX)	14
4.2.3	Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)	15
4.2.4	Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)	16
4.3	Marktszenarien	17
5	Die prioritären Metalle für das System Elektromobilität	22
6	Bedarf an prioritären Metallen für die wesentlichen Komponenten der Elektromobilität	24
7	Szenarien des Materialeinsatzes für Elektromobilität	25
7.1	Datenquellen	26
7.2	Szenarienbausteine	26
7.2.1	Szenarienbildung nach Antriebstyp der E-Kfz	26
7.2.2	Standardisierte Komponenten der E-Mobilität	28
7.2.3	Verknüpfung der Kfz-Antriebstypen mit den Komponenten	36
7.2.4	Modellierung der Szenarien	39
7.3	Ergebnisszenarien	42
7.3.1	Basisszenario	42
7.3.2	Innovationsszenario	44

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Ziele des Arbeitspakets	6
3	Methodisches Vorgehen	7
4	Kurzbeschreibung Antriebstypen Elektromobilität und Marktprognosen	9
4.1	Kurzbeschreibung der Antriebstypen Elektromobilität	9
4.1.1	Hybrid Fahrzeuge (Mild-Hybrid Electric Vehicle und Full-Hybrid Electric Vehicle – MHEV und FHEV)	10
4.1.2	Plug-In-Hybrid Fahrzeuge (Plug-In-Hybrid Electric Vehicle – PHEV)	11
4.1.3	Range-Extender Fahrzeuge (Range-Extender Electric Vehicle – REEV bzw. REX)	11
4.1.4	Batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle – BEV)	12
4.1.5	Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV)	12
4.2	Komponenten von Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen	13
4.2.1	Hybrid Fahrzeuge (MHEV, FHEV und PHEV)	13
4.2.2	Range-Extender Fahrzeuge (REEV bzw. REX)	14
4.2.3	Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)	15
4.2.4	Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)	16
4.3	Marktszenarien	17
5	Die prioritären Metalle für das System Elektromobilität	22
6	Bedarf an prioritären Metallen für die wesentlichen Komponenten der Elektromobilität	24
7	Szenarien des Materialeinsatzes für Elektromobilität	25
7.1	Datenquellen	26
7.2	Szenarienbausteine	26
7.2.1	Szenarienbildung nach Antriebstyp der E-Kfz	26
7.2.2	Standardisierte Komponenten der E-Mobilität	28
7.2.3	Verknüpfung der Kfz-Antriebstypen mit den Komponenten	36
7.2.4	Modellierung der Szenarien	39
7.3	Ergebnisszenarien	42
7.3.1	Basisszenario	42
7.3.2	Innovationsszenario	44

7.3.3	Recyclingszenario	45
7.3.4	Substitutionsszenario	46
7.3.5	Moderates Szenario	47
8	Umweltauswirkungen der Primärförderung, Reserven sowie Reichweiten der prioritären Metalle	48
8.1	Definition Statische Reichweite, Major Metals und Minor Metals	49
8.2	Parameter der Umweltauswirkungen	49
8.3	Umweltauswirkungen der primären Elemente bei der Primärproduktion	56
8.3.1	Kupfer	56
8.3.2	Gold	58
8.3.3	Silber	61
8.3.4	Gallium	62
8.3.5	Indium	65
8.3.6	Germanium	67
8.3.7	Seltene Erden	69
8.3.8	Platingruppenmetalle (PGM)	70
8.3.9	Umweltentlastung durch Elektro-Mobilität (Ressourcenbetrachtung)	72
9	Stand und Perspektiven des Recyclings der prioritären Metalle	73
10	Bedarfsentwicklung der Metalle für Elektromobilität im Vergleich zum Gesamtbedarf	87
10.1	Seltene Erden	87
10.1.1	Neodym	88
10.1.2	Praseodym	90
10.1.3	Dysprosium	91
10.1.4	Terbium	92
10.2	Gallium	93
10.3	Indium	94
10.4	Kupfer	95
10.5	Gold	96
10.6	Silber	96
10.7	Germanium	97
10.8	Platingruppenmetalle	97
11	Fazit und Handlungsempfehlungen für Ressourceneffizienz bzgl. Elektromobilität	98

12	Literatur	101
	Anhang	105

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Schematische Darstellung der Komponenten eines Full-Hybrid-Fahrzeugs (Darstellung Daimler AG)	14
Abbildung 2	Schematische Darstellung der Komponenten eines Range-Extender-Fahrzeugs (Darstellung Daimler AG)	15
Abbildung 3	Schematische Darstellung der Komponenten eines batterieelektrischen Fahrzeugs (Darstellung Daimler AG)	16
Abbildung 4	Schematische Darstellung der Komponenten eines Brennstoffzellenfahrzeugs (Darstellung Daimler AG)	17
Abbildung 5	Struktur der Pkw-Neuzulassungen differenziert nach Antriebstypen (Basis: Szenarien von McKinsey&Company 2009, modifiziert durch Projektgruppe)	20
Abbildung 6	Pkw-Neuzulassungen bzw. Produktionszahlen für Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang differenziert nach Antriebstypen (Basis: Szenarien von McKinsey&Company 2009, modifiziert durch Projektgruppe)	21
Abbildung 7	Die 56 recherchierten Elemente im Periodensystem	22
Abbildung 8	Die Metalle der 1. Priorität im Periodensystem	24
Abbildung 9	Übersicht der Komponenten und der Rohstoffbedarf je Metall in 2010	25
Abbildung 10	Ablaufschema der Szenarien	39
Abbildung 11	Basisszenario: ambitionierte Marktdurchdringung; Materialkoeffizienten 2010 = 2020 = 2030 (außer bei Platin)	43
Abbildung 12	Basisszenario inklusive konventionelle Bauteile im ICE (schraffiert dargestellt): ambitionierte Marktdurchdringung; Materialkoeffizienten 2010 = 2020 = 2030 (außer bei Platin)	44
Abbildung 13	Innovationsszenario: ambitionierte Marktdurchdringung abzüglich Innovationspotentiale/Materialeffizienz	45
Abbildung 14	Recyclingszenario: ambitionierte Marktdurchdringung abzüglich Innovationspotentiale abzüglich Recycling	46
Abbildung 15	Substitutionsszenario: ambitionierte Marktdurchdringung, abzüglich Innovationspotentiale, abzüglich Recycling, abzüglich Substitution eines Teiles der E-Motoren durch fremderregte Motoren (für BEV, REX und FCEV)	47
Abbildung 16	Moderates-Szenario: moderate Marktdurchdringung, abzüglich Innovationspotentiale, abzüglich Recycling, abzüglich Substitution	48
Abbildung 17	Umweltauswirkung nach GWP der 12 prioritären Elemente (eigene Berechnungen nach Daten aus Ecoinvent 2010)	50

Abbildung 18	Umweltauswirkung nach Überdüngungspotential der 12 prioritären Elemente (eigene Berechnungen nach Daten aus Ecoinvent 2010)	51
Abbildung 19	Umweltauswirkung nach Photochemischer Oxidation der 12 prioritären Elemente (eigene Berechnungen nach Daten aus Ecoinvent 2010)	51
Abbildung 20	Umweltauswirkung nach Versauerungspotential der 12 prioritären Elemente (eigene Berechnungen nach Daten aus Ecoinvent 2010)	52
Abbildung 21	Umweltauswirkung nach KEA der 12 prioritären Elemente (eigene Berechnungen nach Daten aus Ecoinvent 2010)	52
Abbildung 22	Umweltauswirkungen nach ADP (Datensatz nach Ecoinvent V2.01, Charakterisierungsfaktoren nach van Oers et al. 2002)	53
Abbildung 23	CO ₂ -Belastung (in Mio. Tonnen CO ₂ -Äquivalenten) der zusätzlichen Rohstoffe im Elektrofahrzeuge im Basis-Szenario 2020 und 2030 (eigene Berechnungen nach Szenarien und Ecoinvent-Daten)	54
Abbildung 24	CO ₂ -Belastung (in Mio. Tonnen CO ₂ -Äquivalenten) des zusätzlichen Rohstoffbedarfs im Elektrofahrzeuge in allen Szenarien für 2020 und 2030 (eigene Berechnungen nach Szenarien und Ecoinvent-Daten)	55
Abbildung 25	Prinzipieller Gewinnungsprozess zur Kupfergewinnung aus sulfidischen Erzen [Lossin 2001]	57
Abbildung 26	Industrielle Gewinnung von Gold mittels des Carbon in Pulp Verfahrens (CIP) [Kingsgate 2011]	60
Abbildung 27	Prinzipiskizze zur Galliumgewinnung (Darstellung TU Clausthal)	63
Abbildung 28	Flussdiagramm zur Darstellung des Zink-Schmelze-Prozesses bei der Kid Creek Zink Schmelze mit Indiumgewinnung [Falconbridge 2002]	66
Abbildung 29	Beispiel für die Gewinnung eines Germaniumkonzentrates aus einem Hauptverfahren [Scoyer 2000]	68
Abbildung 30	Risiken des Abbaus von Seltenen Erden mit unzureichenden Umweltschutzvorrichtungen [Öko-Institut e.V. 2011]	70
Abbildung 31	Anteil der Weltminenförderung der im Rahmen des Optum-Projektes als relevant eingestuftem Technologiemetalle der letzten drei Dekaden im Vergleich zur Gesamtproduktion seit 1900	74
Abbildung 32	Konkurrierende Anwendungen hinsichtlich der Technologiemetalle – die relevanten Elemente für Elektromobilität sind hier rot hervorgehoben.	74
Abbildung 33	Verfahrensfließbild von Umicore's integrierter Edelmetallhütte in Hoboken bei Antwerpen (Belgien)	76
Abbildung 34	Mehr als 200 verschiedene Einsatzmaterialien verdeutlichen die hohe Bandbreite und Flexibilität des Umicore Verfahrens.	77

Abbildung 35	Prinzipieller Materialfluss beim Recycling von (hoch) wertvollen Sekundärmaterialien	77
Abbildung 36	Umicore's Prinzip der geschlossenen Materialkreisläufe	78
Abbildung 37	Umicore's integrierte Metallhütte in Hoboken/Antwerpen. Mit einer Eingangsmenge an Sekundärmaterial von 350.000 t / Jahr ist sie die weltweit größte Recyclinganlage ihrer Art; [Hagelüken, Treffer 2011]	78
Abbildung 38	Koppelproduktion von Technologiemetallen. Die Darstellung zeigt das Verhältnis der Minor-Metalle als Nebenprodukte der Major-Metalle bei der Primärgewinnung; [Hagelüken, Meskers 2010]	80
Abbildung 39	Innovative Cu, Pb und Ni – Metallurgie von Edel- und Sondermetallen; [Hagelüken, Treffer 2011]	80
Abbildung 40	Vergleich der bei der Katalysatorherstellung emittierten SO ₂ Schadstoffmengen zwischen primär gewonnenen PGM zu sekundärem PGM (Urban – Mining) – überarbeitete Grafik von F. Treffer; ursprüngliche Datenquelle [Hagelüken et al. 2005]	81
Abbildung 41	Typischer Wirkungsgrad von Technologiemetall Recyclingketten; [Hagelüken, Treffer 2011]	82
Abbildung 42	Zusammenstellung der wichtigsten Vorbehandlungs- bzw. Präparationsverfahren	84
Abbildung 43	„Post-Consumer Recyclingraten“ der relevanten Schlüsselmetalle der Elektromobilität – aktuelle Einschätzung, überarbeitete Darstellung von F. Treffer, Datenquelle [Graedel et al. 2011]	85
Abbildung 44	Einschätzung der Rezyklierbarkeit der relevanten Schlüsselmetalle auf Basis des vorgestellten Recyclingverfahrens – Umicore Verfahren	85
Abbildung 45	Einschätzung der Rezyklierbarkeit der prioritären Elemente	86
Abbildung 46	Anwendungsbereiche von Neodym 2010 (Kalkulation Öko-Institut)	88
Abbildung 47	Neodym-Gesamtbedarfe in Tonnen [IMCOA 2011, Öko-Institut e.V. 2011, Berechnungen Öko-Institut e.V.]	89
Abbildung 48	Anwendungsbereiche von Praseodym (Kalkulation Öko-Institut)	90
Abbildung 49	Praseodym-Gesamtbedarfe in Tonnen [Öko-Institut e.V. 2011, Berechnungen Öko-Institut e.V.]	90
Abbildung 50	Dysprosium-Bedarfe in Tonnen [BGR 2011, IMCOA 2011, Öko-Institut e.V. 2011, Berechnungen Öko-Institut e.V.]	91
Abbildung 51	Terbium-Bedarfe in Tonnen [BGR 2011, IMCOA 2011, Öko-Institut e.V. 2011, Berechnungen Öko-Institut e.V.]	92
Abbildung 52	Gallium-Bedarfe nach Anwendungen 2010, 2015, 2020 [EU critical raw materials 2010]	93

Abbildung 53	Gallium-Bedarf in Tonnen [USGS 2011, EU critical raw materials 2010, Berechnungen Öko-Institut e.V.]	94
Abbildung 54	Indium-Bedarfe nach Anwendungen 2010, 2015, 2020 [EU critical raw materials 2010]	95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Szenariendatensätze für die Stützzeitpunkte 2010, 2020 und 2030	27
Tabelle 2	PKW-Neuzulassungen für die Jahre 2020 und 2030 im moderaten Szenario (Basis: Szenarien von McKinsey&Company 2009, modifiziert durch Projektgruppe)	27
Tabelle 3	PKW-Neuzulassungen für die Jahre 2020 und 2030 im ambitionierten Szenario (Basis: Szenarien von McKinsey&Company 2009, modifiziert durch Projektgruppe)	28
Tabelle 4	Abschätzung Brennstoffzellen [nach SolviCore 2011]	30
Tabelle 5	Weitere Module für FCEV	30
Tabelle 6	Abschätzung Katalysatorbelegung (konstant über alle Szenarien):	31
Tabelle 7	Basis-Szenario für 2010, 2020, 2030 [Rohstoffbedarf in kg]	32
Tabelle 8	Innovationsszenario 2020 [Rohstoffbedarf in kg]	33
Tabelle 9	Innovationsszenario 2030 [Rohstoffbedarf in kg]	34
Tabelle 10	Substitutionsszenario 2010, 2020, 2020 (teilweise Substitution des E-Motors) [Rohstoffbedarf in kg]	35
Tabelle 11	Verknüpfungsmatrix (VM) der Antriebstypen und Komponenten	38
Tabelle 12	Ablaufschema Modellierung	39
Tabelle 13	Effizienzsteigerung im Innovationsszenario (Anstieg pro Dekade)	40
Tabelle 14	Weltweite Recyclingquoten für die prioritären Metalle im Automobilbau (Schätzung Projektteam auf Basis [Graedel et al. 2011])	41
Tabelle 15	Primärproduktion der Metalle* im Jahr 2010 zur Normierung der Szenarioergebnisse	42
Tabelle 16	Einsparung von CO ₂ -Emissionen durch Primärmetall-Gewinnung durch geringeren Einsatz der Metalle im Brennstoffzellen- und vollelektrischen Pkw bezogen auf das Basisszenario (Berechnungen für globale Durchschnitts-PKW nach Informationen von Daimler AG)	72

Abkürzungsverzeichnis

a	anno = Jahr
ADP	Abiotic depletion potential
Ag	Silber
Al	Aluminium
Au	Gold
BEV	Battery Electric Vehicle = Batterieelektrische Fahrzeuge
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Dy	Dysprosium
E-Fahrzeug	Elektro-Fahrzeug
EOL	End-Of-Life
E-PKW	Elektro-Personenkraftwagen
EV-Komponente	Elektrofahrzeug-Komponente
F&E	Forschung und Entwicklung
FCEV	Fuel-Cell-Electric-Vehicle = Brennstoffzellenfahrzeug
Fe	Eisen
FM	Fremd erregter Magnet
g	Gramm
Ga	Gallium
GaN	Galliumnitrid
Ge	Germanium
GUS	Gemeinschaft Unabhängiger Staaten
GWP	Global Warming Potential = Klimawandel
HEV	Hybrid Electric Vehicle = Hybrid-Fahrzeug
ICE	Internal Combustion Engines = Verbrennungsmotor
In	Indium
IZT	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
J	Jahr
KEA	Kumulierter Energieaufwand
Kg	Kilogramm
km	Kilometer
Komp	Komponente
kW	Kilowatt

kWh	Kilowattstunde
LE	Leistungselektronik
LED	Light Emitting Diode
Mio	Millionen
MJ	Megajoule
M _{Recyc}	Menge recyceltes Material (in kg)
Nd	Neodym
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
Ni	Nickel
OEM	Original Equipment Manufacturer
p.a.	per anno = pro Jahr
Pd	Palladium
PGM	Platingruppenmetall
PHEV	Plug-In-Hybrid Electric Vehicle = Plugin-Hybrid-Fahrzeug
PKW	Personenkraftwagen
PM	Permanent erregter Magnet
PO ₄	Phosphat
ppb	Parts per billion = Teile pro Milliarde
Pr	Praseodym
Pt	Platin
PV	Photovoltaik
P _{Zu}	Anzahl PKW-Zulassungen
REX	Range Extender
RFID	radio-frequency identification = Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen
Ru	Ruthenium
Sb	Antimon
SE	Seltene Erden
SEE	Seltene-Erden-Elemente
SO ₂	Schwefeldioxid
Sz	Szenario
Tb	Terbium
VM	Verknüpfungsmatrix
Z _{Stütz}	Zeitpunkt Stützjahr

1 Zusammenfassung

Die erwartete und in Deutschland durch die Nationale Plattform Elektromobilität forcierte Marktdurchdringung der Elektromobilität wird ohne Zweifel auch erhebliche Konsequenzen auf den Ressourcenbedarf wichtiger und zum Teil kritischer Metalle haben.

Da bereits schon heute für eine ganze Reihe Metalle (z.B. Seltene Erden, Indium) durch Nachfragewachstum in anderen Branchen Versorgungsengpässe aktuell sind, hat das Bundesumweltministerium das Öko-Institut im Rahmen des BMU-Vorhabens „Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft – OPTUM“ beauftragt die „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität“ zu untersuchen.

Das Öko-Institut untersucht in diesem Zusammenhang, unterstützt von den Partnern Daimler AG, Umicore und TU Clausthal, die folgenden Fragestellungen.

- Welches sind die wesentlichen Rohstoffe, die in Elektroautos (bzw. Hybridfahrzeugen) verwendet werden?
- Welcher mengenmäßige Bedarf an diesen Rohstoffen ist für das System Elektromobilität auf globaler Ebene bis 2030 zu erwarten?
- Wie relevant sind die Umweltauswirkungen, welche mit der Gewinnung und der Weiterverarbeitung der entsprechenden Rohstoffe verbunden sind?
- Wie hoch sind demgegenüber die Umweltbelastungen, die durch die Elektromobilität erwartet werden?
- Wie ist der Stand des Recyclings der wesentlichen Metalle heute und wie sind die Perspektiven für die Zukunft?
- Wie ist die Situation auf der Primärrohstoffseite, d.h. vorhandene Reserven und deren Reichweite, technische und politische Einflüsse auf die Versorgung?
- Welche Auswirkungen wird der geplante globale Ausbau der Elektromobilität auf die Versorgungssituation und die zukünftige Preisentwicklung der benötigten Rohstoffe haben?
- Welche Entlastungspotenziale liegen in der Reduzierung des spezifischen Metallbedarfs für definierte Komponenten oder welche alternativen Technologien können dämpfend auf den Rohstoffbedarf einwirken?

Das Projektteam hat Antworten auf die obigen Fragen erarbeitet, indem aufbauend auf den spezifischen Kenntnissen der einzelnen Partner intensive Fachrecherchen inkl. Einzelinterviews bei externen Fachinstitutionen durchgeführt wurden. Wesentliches Element war zudem die Präsentation und offene Diskussion von Zwischenergebnissen auf insgesamt drei Fach-Workshops mit Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.

Nach einer intensiven Vollrecherche bezüglich 56 Metallen wurden vom Projektteam nach Diskussion auf dem ersten Fach-Workshop zunächst 15 Metalle mit erster Priorität für die Elektromobilität eingestuft. Davon wurden Lithium und Kobalt nicht vertieft im Projekt behandelt, da sie bereits in anderen Projekten¹ des BMU-Programms intensiv adressiert wurden. Ruthenium ist im Laufe des Projektes im Einvernehmen aller Beteiligten aus der Liste der prioritären Metalle herausgenommen worden. Die verbleibenden 12 prioritären Metalle, die im Projekt vertieft untersucht wurden, sind Neodym (Nd), Praseodym (Pr), Dysprosium (Dy), Terbium (Tb), Indium (In), Gallium (Ga), Germanium (Ge), Gold (Au), Silber (Ag), Kupfer (Cu), Platin (Pt) und Palladium (Pd).

Um den möglichen zukünftigen Bedarf durch die Elektromobilität an den prioritären Metallen zu quantifizieren, wurde vom Projektteam auf den globalen Marktszenarien von McKinsey 2009 für die Entwicklung der Elektromobilität aufgesetzt. Diese wurden verknüpft mit differenzierten Mengendaten der Metalle (1. Priorität) zu den wesentlichen Komponenten² der unterschiedlichen Antriebstypen (Hybrid-, Plug-In-, Range-Extender-, Batterieelektrisches-, Brennstoffzellen-Fahrzeug) der Elektromobilität. Die detaillierten Daten für die Rohstoffbedarfe der jeweiligen Komponenten wurden vom Projektteam unter Auswertung aller verfügbaren Quellen und nach intensiver Diskussion mit den Experten der Fach-Workshops festgelegt.

Die spezifischen Szenarien basierten zunächst auf dem optimistischen Szenario von McKinsey für die Entwicklung der Elektromobilität (Basisszenario I). Varianten mit Einfluss auf den globalen Bedarf an Primärmetallen wurden durch

- Zusätzliche Annahmen zur stärkeren Materialeffizienz (weniger Metalle pro Komponente): Innovationsszenario II
- Aufbauend auf Innovationsszenario II zusätzliche Annahmen zum verstärkten Recycling: Recyclingszenario III
- Aufbauend auf dem Recyclingszenario III zusätzliche Annahmen zur partiellen Substitution von Elektromotoren mit Permanentmagneten (Seltene Erden) durch alternative Motoren: Substitutionsszenario IV

erstellt.

- Schließlich wurde das moderate McKinsey-Szenario bezüglich des Wachstums der Elektromobilität mit allen Annahmen des Substitutionsszenarios kombiniert.

Die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien ergaben für den globalen Bedarf an Primärmetallen bis 2030 für die Elektromobilität klare Tendenzen. Im Vergleich zur gesamten

¹ LithoRec: <http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/batterierecycling/lithorec>;

LiBRi: <http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/batterierecycling/libri>

² Erfasst wurden alle wesentlichen Komponenten wie Elektromotor, Leistungselektronik usw. In der Arbeit wurde die Komponente Batterie ausgeklammert, da die Batteriemetalle Lithium und Kobalt bereits in LiBRi und LithoRec ausführlich untersucht wurden und in LithoRec Gegenstand von Szenarien waren.

Primärproduktion der Metalle im Ausgangsjahr 2010 fielen vor allem die Seltenen Erden (Nd, Pr, Dy, Tb) sowie Gallium als besonders relevant auf. Am markantesten zeigte sich der Bedarfsanstieg der Elektromobilität bei Dysprosium. Hier entspricht der Bedarf für die Elektromobilität im Jahre 2030 im Basisszenario verglichen mit der heutigen Gesamtproduktion dieses Metalls 482%. In den anderen Szenarien sind durch die unterstellten Maßnahmen zwar Dämpfungen des Bedarfsanstiegs festzustellen, aber mit 287% (Innovationsszenario), 191% (Recyclingszenario) sowie 71% (Substitutionsszenario) ist trotz umfangreicher Maßnahmen für die Zukunft mit einem deutlich wachsenden Bedarf an Dysprosium für Elektromobilität auszugehen. Dies gilt auch für die Ergebnisse des moderaten Szenarios.

Vor dem Hintergrund der bereits heute bestehenden Versorgungsengpässe für Dysprosium, welches heute ausschließlich in China produziert wird, erhalten die Szenarioergebnisse eine hohe Relevanz. Einem knappen Angebot auf der Primärseite, das für die nächsten Jahre anhalten wird, steht ein stetig wachsender Bedarf für die Elektromobilität gegenüber. Darüber hinaus wächst auch die Nachfrage in weiteren Anwendungsbereichen der Neodym-Eisen-Bor-Magnete, die wiederum Dysprosium benötigen. Hier ist u.a. der wachsende Sektor der Windenergie zu nennen. Ähnliche Entwicklungen sind auch für die weiteren Seltene Erden Metalle Neodym, Praseodym und Terbium zu konstatieren, allerdings ist die Situation bei Dysprosium unter einhelliger Einschätzung der beteiligten Experten besonders angespannt.

Die Primärproduktion von Metallen ist über die Schritte Förderung, Anreicherung und metallurgische Umsetzung häufig mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden. Im Falle der Seltenen Erden gilt dies umso mehr, da die meisten Erzvorkommen mit radioaktiven Nukliden (Thorium usw.) belastet sind, die entsprechende Risiken für Mensch und Umwelt mit sich führen. Durch Recycling von Metallen kann in der Regel neben einem wichtigen Beitrag zur Reduzierung des Nachfragedrucks auf die Primärrohstoffe ein deutlicher Beitrag zur Netto-Umweltentlastung beigetragen werden. Bis heute findet jedoch weltweit ein Recycling von Seltenen Erden Metallen wie Dysprosium noch nicht statt. Die stark angezogenen Rohstoffpreise sowie die teilweise prekäre Versorgungslage hat jedoch in jüngster Zeit Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zum Recycling von z.B. Magneten, die Seltene Erden Metalle enthalten, angestoßen. Dies gilt ebenso für viele weitere der im Projekt identifizierten prioritären Metalle.

Aus den umfangreichen Ergebnissen des Projektes „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität“, die in den vorangegangenen Abschnitten dokumentiert sind, hat das Projektteam von Öko-Institut, Umicore, Daimler AG und TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik folgende wesentliche Schlussfolgerungen gezogen:

- Die Versorgung mit **Seltenen Erden** – vor allem Dysprosium - ist besonders kritisch. Ressourceneffizienz und technologische Substitution weisen mittelfristig das größte Potential zur Eindämmung von Versorgungsengpässen auf. Recycling ist mittel- und langfristig eine wichtige Option zur Verringerung von Verknappungssituationen,

allerdings aufgrund der stetig steigenden Gesamtnachfrage und der langen Lebensdauer der Produkte in den nächsten Jahren mit eher geringen Effekten.

- **Gallium** wird auch in vielen Anwendungsbereichen außerhalb der Elektromobilität (z.B. PV, LED) eingesetzt. Es ist mit starken Bedarfszuwächsen zu rechnen. Kurzfristig nicht, aber langfristig könnte die Versorgung mit Gallium kritisch werden bei starkem Nachfragewachstum und fehlenden Gegenmaßnahmen (Ausbau der globalen Gewinnungskapazitäten für Gallium als Nebenprodukt aus dem Bayer-Prozess (Tonerdegewinnung) und realer Einstieg in das Post-consumer-Recycling).
- **Indium** besitzt keinen entscheidenden Beitrag für die Elektromobilität. **ABER:** Es gibt viele konkurrierende Anwendungsbereiche mit starken Wachstumsraten. Indium kommt nur als Minor Metal vor und muss daher stark im Auge behalten werden.
- **Germanium** besitzt keinen entscheidenden Beitrag für die Elektromobilität. **ABER:** Es könnten große Wachstumsraten in anderen Anwendungen (z.B. Glasfasertechnik, LED) auftreten und es fehlen grundlegende Informationen zu Germanium (das „Phantom“-Element) und dessen Bedarfsentwicklung.
- **Die Edelmetalle Silber, Gold, Palladium und Platin** spielen ebenfalls eine Rolle in den Komponenten für die Elektromobilität; hier wäre vor allem Platin für Brennstoffzellenfahrzeuge wichtig. Umgekehrt kann durch die Entwicklung der Elektromobilität bzgl. vollelektrischer Fahrzeuge der Nachfragedruck auf Platin und Palladium durch den Entfall des Autoabgaskatalysators gemindert werden.
- **Die aktuelle kritische Versorgungssituation bei einigen Seltenen Erden** ist ein warnendes Beispiel dafür, dass Engpässe trotz global hoher geologischer Reserven zumindest temporär auftreten können, wenn geopolitische Faktoren (nahezu ausschließliche Förderung in einem Land) mit einem rasanten Nachfragewachstum korrelieren. Hieraus gilt es Lehren für die Zukunft zu ziehen, um proaktiv rechtzeitig Gegensteuern zu können (durch rechtzeitige Erkundung und Erschließung von Lagerstätten, Diversifizierung der Versorgung, Förderung des Recycling usw.).

Aus den Ergebnissen und Schlussfolgerungen heraus hat das Projektteam Handlungsempfehlungen abgeleitet, die auf dem Abschlussworkshop den beteiligten Fachakteuren zur Diskussion gestellt wurden. Es zeigte sich eine breite Übereinstimmung bzgl. der Empfehlungen. Nichtsdestotrotz sind wichtige Anregungen hinsichtlich der Handlungsempfehlungen aus dem Kreis der externen Akteure an das Projektteam herangetragen worden, die in die folgende Liste der Handlungsempfehlungen eingeflossen sind:

- **Hinsichtlich des drohenden „Flaschenhalses“ bei Seltenen Erden müssen parallel verschiedene Entlastungsstrategien gefahren werden**
 - F&E bzgl. Verminderung von Seltenen Erden (v.a. Dysprosium) in Magneten für E-Motoren sowie bzgl. SE-freien E-Motoren
→ *Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie OEMs (Hersteller von Elektromotoren, Magnethersteller) und Wissenschaft hinsichtlich Innovation*

- Entwicklung von Recyclingtechnologien für Permanentmagnete aus verschiedenen Anwendungen
 → *Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie Recyclingwirtschaft und Wissenschaft*
- Förderung von umweltfreundlicher Primärförderung von SE (Standards!)
 → *Zuständig: Bundesregierung und EU-Kommission im Rahmen internationaler Verhandlungen, Minenunternehmen im Bereich Seltener Erden*
- **Förderung eines umweltverträglicheren Bergbaus zur Gewinnung von kritischen Metallen**
 - Große Potenziale zur besseren Ausschöpfung natürlicher Ressourcen bestehen in höheren Gewinnungsraten bei der Primärförderung und Aufbereitung vieler Metalle (z.B. Seltene Erden). Weiterhin bestehen für wichtige Minor Metals wie Indium Potenziale aus nicht genutzten Rückständen zum Teil stillgelegter Förderstandorte.
 → *Zuständig: BGR und Institute im Bereich Bergbau und Aufbereitung für die Erkundung von Bergbaurückständen und technische Kooperationen und Knowhow-Transfer zur optimierten Förderung*
- **Entwicklung von Recyclingstrategien und – technologien für das Recycling von Leistungselektronik aus Alt-Elektrofahrzeugen**
 - Rückgewinnung von Kupfer, Gallium, Edelmetallen usw.
 → *Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie Recyclingwirtschaft und Wissenschaft*
- **Allgemeiner Forschungsbedarf**
 - Potenzialanalysen und Recyclingmöglichkeiten für die „normale“ Elektronik und sonstige Magnetanwendungen in zukünftigen PKW aller Art bezüglich Edel- und Spezialmetallen inkl. Seltener Erden.
 → *Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie Recyclingwirtschaft und OEMs (Hersteller von Autoelektronik und Magneten)*
- Bzgl. Gallium, Indium und Germanium werden auch aus anderen Anwendungen **deutliche Zuwächse** erwartet: unklar ist z.Zt. ob durch technologische Revolutionen wie LED-Technik oder Photovoltaik (nach Fukushima) die Wachstumsraten und damit die Versorgungsrisiken noch unterschätzt werden:
Untersuchungsbedarf bzgl. der mittel- und langfristigen Effekte auf die E-Mobilität und Entwicklung von Lösungsstrategien!
 → *Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme*

Um eine breite Wirkung zu erzielen und wichtige Diskussionen anzustoßen, werden die Projektpartner sowie das BMU die Projektergebnisse sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene auf diversen Wegen wichtigen Akteurskreisen vermitteln und präsentieren.

2 Ziele des Arbeitspakets

Die Weiterentwicklung und erfolgreiche Implementierung der Elektromobilität gilt als ein wesentlicher Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität. Die Bundesregierung hat daher am 19. August 2009 den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität verabschiedet. Das BMU-Programm zur „Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität“ steht im Kontext zum Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität. Nachdem im Rahmen des BMU-Programms bereits mit den Verbundprojekten LithoRec sowie LiBRi die Ressourcenaspekte und das zukünftige Recycling der für die Elektromobilität notwendigen Hochleistungsbatterien (Lithium-Ionen-Batterien) adressiert wurden, war es das Ziel des hier ausgeführten Arbeitspakets „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität“ (als Teil des BMU-Vorhabens „Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft“) umfassend die Ressourcenaspekte aller übrigen Komponenten des Systems Elektromobilität inkl. der Recyclingmöglichkeiten und –perspektiven zu untersuchen. Letztlich sollen mögliche ressourcenpolitische „Engstellen bzw. Schwachstellen“ des Systems Elektromobilität möglichst frühzeitig entdeckt und Strategien und konkrete Vorschläge zu deren Vermeidung bzw. Beseitigung entwickelt werden.

Folgende Teilziele im Kontext Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität werden im Projekt adressiert, um entsprechende wichtige Fragen des BMU wissenschaftlich zu beantworten.

- Ermittlung der wesentlichen Rohstoffe, die in Elektroautos (bzw. Hybridfahrzeugen) verwendet werden; Ermittlung ihrer Einsatzbereiche sowie der wesentlichen Bauteile und Systemkomponenten,
- Ermittlung bzw. Abschätzung des mengenmäßigen Bedarfs an diesen Rohstoffen für das System Elektromobilität durch Einsatz der Szenariotechnik. Als fester Szenariozeitraum wird 2010 bis 2030 gewählt. Der Bedarf soll in Nachfragekorridoren auf globaler Ebene mittels Szenarien quantifiziert werden,
- Untersuchung und Darstellung der Umweltauswirkungen, welche mit der Gewinnung und der Weiterverarbeitung der entsprechenden Rohstoffe verbunden sind sowie Gegenüberstellung dieser Umweltauswirkungen zu den Umweltentlastungen, die durch die Elektromobilität erwartet werden,
- Umfassende Untersuchung inwieweit das Recycling der enthaltenen Rohstoffe derzeit technisch und wirtschaftlich schon möglich ist und welche Maßnahmen es bedarf, um das Recycling oder die stoffliche Wiederverwertung der Materialien von Elektroautos und zugehöriger Komponenten (z.B. Ladestationen etc.) zu gewährleisten,
- Transparente Darstellung der vorhandenen Reserven dieser Rohstoffe sowie der Einschätzungen zu deren Reichweite sowie zu evtl. Konzentrationen bzgl. Reserven- und/ oder Produktionskapazitäten in wenigen Ländern,

- Ermittlung und Darstellung der Auswirkungen des geplanten Ausbaus der Elektromobilität global auf die Versorgungssituation und die zukünftige Preisentwicklung der benötigten Rohstoffe,
- Untersuchung bzgl. Substituten oder alternativen Technologien für einzelne Komponenten zur Bedarfsreduzierung der benötigten Rohstoffe. Der Schwerpunkt soll dabei auf jenen Rohstoffen liegen, die bezüglich ihrer Verfügbarkeit sowie weitreichender Umweltauswirkungen als kritisch einzustufen sind.

3 Methodisches Vorgehen

Als erster methodischer Schritt wurde durch das Projektteam ein umfassendes Screening von insgesamt 56 Metallen bzgl. ihrer Relevanz für die Elektromobilität durchgeführt. Ziel dieses Screenings war die Sammlung von Informationen und Daten um anschließend eine Liste prioritärer Metalle für die Elektromobilität festzulegen (siehe Abschnitt 5), die im weiteren Projektverlauf tiefergehend untersucht wurden.

Die Projektpartner stimmten dabei überein für diese erste umfassende Recherche „das Netz weit auszuwerfen“, um nicht ein weniger prominentes Metall zu übersehen, welches u.U. für bestimmte Komponenten im System Elektromobilität eine wichtige Rolle spielt. Daher betraf die Recherche alle Elemente des Periodensystems abzüglich

- Nichtmetalle,
- Radioaktive Elemente,
- Eindeutig toxische Elemente wie Cadmium, Thallium, Quecksilber,
- Natrium, Kalium, Calcium sowie
- Massenmetalle bzw. Beimetalle: Eisen/Stahl, Aluminium, Chrom und Nickel.

Die Recherche bzgl. der 56 Metalle umfasste alle denkbaren Varianten der Elektromobilität für PKW, d.h. Hybridfahrzeuge, Plug-In-Hybridfahrzeuge, Range-Extender, vollelektrische Fahrzeuge sowie Brennstoffzellenfahrzeuge. Neben einer umfassenden Sichtung der einschlägigen Fachliteratur wurde eine intensive Internetrecherche (nach Quellen in Deutsch und in Englisch) durchgeführt. Schließlich wurden mit wichtigen Unternehmen und Forschungsinstitutionen wie Bosch, Vacuumschmelze und Fraunhofer-ISI Interviews geführt, um den recherchierten Sachstand durch Informationen aus erster Hand abzurunden und abzusichern. Schließlich wurden rund 35 Fachleuten aus Industrie, Wissenschaft und Administration (Teilnehmer siehe Anlage) auf dem ersten Fachworkshop im Rahmen des Projekts ein Vorschlag für eine Liste prioritärer Metalle für die Elektromobilität vorgestellt und deren Auswahl begründet. Als Kriterien für die vorgestellte Vorauswahl wurden vom Projektteam herangezogen:

- **Bedarf für 30 Mio. Elektrofahrzeuge: heutige Technologie**
(bezogen auf heutige Weltproduktion des Rohstoffs)

- **Bedarf für 30 Mio. Elektrofahrzeuge: zukünftige Technologie** (bezogen auf heutige Weltproduktion des Rohstoffs)
- **Erwartetes Nachfragewachstum des Metalls bis 2030**
 - Nachfrage gesamt inkl. konkurrierender Anwendungen
 - Fehlende Substituierbarkeit
- **Statische Reichweite**
 - Verhältnis heutiger Bedarf zu Reserves (nach USGS)
- **Restriktionen bezüglich Verfügbarkeit natürlicher Vorkommen**
 - Regionale Konzentration
 - Zeitliche Knappheit (Nachlauf Produktion zu Bedarf)
 - Strukturelle / technische Knappheit (Metall als Nebenprodukt)
 - Politische Stabilität der Hauptförderländer
- **Recyclingpotenzial**
 - Heutige Recyclingsituation
 - Erwartetes Recyclingpotenzial

Auf dem Workshop wurden die vorgestellten Metalle für die 1. Priorität sowie der 2. und 3. Priorität intensiv diskutiert. Die meisten Vorschläge wurden von den Akteuren geteilt, aber es gab nach der Diskussion (z.B. im Falle von Silber) auch Verschiebungen in die 1. Priorität. Insgesamt hat sich das Vorgehen bzgl. der Recherche und der Abstimmung mit einem breiten Expertenkreis sehr bewährt.

Nach der Verständigung auf die prioritären Metalle stellte das Projektteam für diese Metalle (vgl. Kapitel 5) die quantitativen Informationen bzgl. der wichtigen Komponenten wie Leistungselektronik, Elektromotor etc. (vgl. Abschnitt 6) zusammen und erstellte daraus eine Datenmatrix (Menge prioritärer Metalle je Komponente und je E-Fahrzeug unterteilt in die bereits genannten Untertypen Hybridfahrzeuge etc.). Diese Daten wurden zusammengeführt mit den Szenariodaten bzgl. der globalen Entwicklung des PKW-Marktes bis 2030 unter besonderer Berücksichtigung der möglichen Entwicklung der Elektromobilität (vgl. zu den Szenarioannahmen des globalen PKW-Marktes Abschnitt 7).

Auf diese Weise konnte das Projektteam den globalen Rohstoffeinsatz für die Elektromobilität bzgl. der prioritären Metalle bis 2030 für die unterschiedlichen Szenarien quantifizieren. Die Szenarien unterscheiden sich durch die Annahmen bzgl. der globalen Entwicklung der Elektromobilität überhaupt und durch unterschiedliche Annahmen bzgl. der Materialinnovationen (weniger Einsatzmenge an prioritären Metallen je Fahrzeug), durch reduzierten Primärmetallbedarf aufgrund Entlastungen durch Recyclingmetalle sowie durch Substitutionseffekte (Einsparung prioritärer Metalle durch alternative technische Komponenten). Auf dem zweiten Fachworkshop im Rahmen des Projektes (Teilnehmer siehe Anhang) wurden die Szenarioannahmen (hier nicht zuletzt die Menge prioritärer Metalle je Komponente und je E-Fahrzeug) den externen Experten im Detail vorgestellt und kritisch diskutiert. Wichtige Hinweise aus dem Kreis der Experten flossen in die Finalisierung des Datensatzes ein. Auf

diese Weise konnte die Datenbasis breit abgesichert und ein guter Konsens mit den beteiligten Akteuren erzielt werden. Die Details der konsolidierten Szenarioannahmen und die Ergebnisse der Szenarien werden ausführlich in Kapitel 7 dieses Berichtes beschrieben.

Zur Einschätzung der zukünftigen Nachfrage- und Angebotsentwicklung wurde durch das Projektteam ebenso die zu erwartenden Entwicklung der Gesamtnachfrage (alle Anwendungen der prioritären Metalle) untersucht und dargestellt und dem Bedarf durch die Elektromobilität gegenübergestellt (vgl. hierzu Abschnitt 10).

Zur umfassenden Bewertung der globalen Rohstoffbedarfe bzgl. der prioritären Metalle der Elektromobilität haben die Projektpartner weiterhin die Umweltauswirkungen des Rohstoffabbaus und der Produktion der Primärmetalle untersucht und auch die entsprechenden Entlastungen durch die Einsparung von Materialien durch Wegfall von Komponenten (z.B. Verbrennungsmotor) aus dem klassischen Verbrennungsmotorantrieb gegenübergestellt. Weiterhin wurde bzgl. der prioritären Metalle die Situation bzgl. deren Reserven und den entsprechenden statischen Reichweiten untersucht und beschrieben (Details hierzu finden sich in Abschnitt 8). Schließlich wurde unter der Federführung des Partners Umicore der Stand des Recyclings der prioritären Rohstoffe und die absehbaren Perspektiven zu Optimierungen der Recyclingkreisläufe untersucht und dargestellt (vgl. hierzu Abschnitt 9). Der Beitrag des Recycling ist von großer Bedeutung sowohl für die Sicherstellung der zukünftigen Versorgung von Zukunftstechnologien mit kritischen Metallen als auch bzgl. einer verbesserten Nettoumweltbilanz.

Die umfassenden Ergebnisse und Auswertungen der Ergebnisse der Szenarien und die umfassende Untersuchung der prioritären Metalle bzgl. Rohstoffsituation, Umweltbilanz ihrer Produktion sowie Recyclingsituation und –perspektiven führten schließlich zu umfassenden Handlungsempfehlungen des Projektteams an unterschiedliche Zielgruppen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz der Elektromobilität. Diese wurden auf dem Abschlussworkshop (Teilnehmer siehe Anlage) nach Präsentation der Gesamtergebnisse vorgestellt und intensiv diskutiert. Das Ergebnis dieses engagierten Diskussionsprozesses ist in Abschnitt 11 dokumentiert.

4 Kurzbeschreibung Antriebstypen Elektromobilität und Marktprognosen

In den folgenden Abschnitten werden die in diesem Projekt berücksichtigten Antriebstypen der Elektromobilität und ihrer Komponenten sowie die zugrunde gelegten Marktszenarien dargestellt.

4.1 Kurzbeschreibung der Antriebstypen Elektromobilität

Unter dem Begriff Elektromobilität werden im Allgemeinen alle Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben, d.h. sowohl reine Elektroautos als auch Fahrzeuge mit Hybridantrieb, subsummiert. Unter einem reinen Elektroauto versteht man Fahrzeuge, die nur einen

elektrischen Motor (Elektromotor) besitzen, der durch elektrische Energie angetrieben wird, unabhängig vom eingesetzten Energiespeicher (bspw. Batterien³ oder Brennstoffzellen). Neben dem Elektromotor besitzen Hybridfahrzeuge noch einen zweiten, konventionellen Motor (Verbrennungsmotor). Je nach Grad der Hybridisierung übernimmt der Elektromotor unterschiedliche Aufgaben, von der Energierückgewinnung beim Bremsen bis hin zum rein elektrischen Fahren.

Im Projekt „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität“ wurden die in den folgenden Abschnitten detailliert beschriebenen hybriden und rein elektrischen Antriebskonzepte berücksichtigt.

4.1.1 Hybrid Fahrzeuge (Mild-Hybrid Electric Vehicle und Full-Hybrid Electric Vehicle – MHEV und FHEV)

Als Mild-Hybrid werden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren bezeichnet, die in der Lage sind mithilfe eines zusätzlichen Elektromotors⁴ Energie beim Bremsen zurückzugewinnen und in der Hybridbatterie zu speichern. Der Elektromotor nutzt die so gespeicherte Energie, um den Verbrennungsmotor bei Beschleunigungsvorgängen zu unterstützen (Boosten).

Ein Fahrzeug mit Mild-Hybrid-Antrieb ist z.B. die S-Klasse S400 von Mercedes-Benz. Der Elektromotor hat eine Leistung von 15 kW. Der Akkumulator weist eine Kapazität von knapp 1 kWh auf.

Der Full-Hybrid hat im Vergleich zum Mild-Hybrid meist einen leistungsstärkeren Elektromotor und einen Akkumulator mit einer etwas größeren Kapazität. Der entscheidende Unterschied zu einem Mild-Hybrid besteht darin, dass der Full-Hybrid auch kurze Strecken vollständig rein elektrisch, d.h. ohne Verbrennungsmotor, fahren kann.

Ein Fahrzeug mit diesem Antrieb ist der Toyota Prius, dessen Elektromotor in der dritten Generation (ZVW30) eine Leistung von 60 kW aufweist. Der Akkumulator des Prius hat eine Kapazität von 1.3 kWh (Nickel-Metallhydrid) [Toyota, 2011]. Die elektrische Reichweite beträgt ca. 2 Kilometer. Ein weiteres Serienfahrzeug mit Full-Hybrid-Antrieb ist der Mercedes Benz ML 450 Hybrid. Er besitzt zwei Elektroantriebe mit einmal 67 kW und einmal 63 kW. Die Nickel-Metallhydrid-Batterie ermöglicht dem Wagen rund 2,5 Kilometer rein elektrisches Fahren.

Für die Bedarfsberechnung der Szenarien (siehe Kapitel 7) wurde bezüglich der Komponenten nicht zwischen Mild- und Full-Hybrid-Fahrzeug differenziert, sondern gemittelte Werte für Hybridfahrzeuge verwendet.

³ Der elektrische Energiespeicher von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird im deutschen Sprachgebrauch oft als Batterie bezeichnet. Es handelt sich aber um einen Akkumulator (Sekundärzellen), der im Gegensatz zu einer Batterie (Primärzellen) wiederaufladbar ist.

⁴ Für die Bremsenergieerückgewinnung wird der Elektromotor als Generator genutzt

4.1.2 Plug-In-Hybrid Fahrzeuge (Plug-In-Hybrid Electric Vehicle – PHEV)

Das Antriebskonzept eines Plug-In-Hybrids geht noch ein Schritt weiter. Zum einen ist die Akkukapazität eines Plug-In-Hybrids deutlich größer als die eines Full-Hybrids und zum anderen besteht beim Plug-In-Hybrid die Möglichkeit, den Akkumulator auch über das Stromnetz zu laden. Der Plug-In-Hybrid unterstützt, wie der Full-Hybrid, sowohl den Antrieb des Fahrzeugs durch den Elektromotor, durch den Verbrennungsmotor als auch der Kombination aus beiden. Jedoch ermöglicht die höhere Akkukapazität deutlich größere rein elektrische Strecken. Je nach Fahrweise und Akkukapazität erlauben aktuelle Studien von Plug-In-Hybrids bis zu 20-30 km lokal emissionsfreies Fahren. Da Fahrzeuge mit Plug-In-Hybrid auf größere rein elektrische Strecken ausgelegt sind, werden hier – im Vergleich zum Full-Hybrid – meist leistungsstärkere Elektromotoren mit mehr als 50 kW eingesetzt.

Bislang gibt es noch keine Serienfahrzeuge mit Plug-In-Hybrid. Mercedes Benz stellte auf der IAA 2009 den „Mercedes Benz Vision S 500 Plug-In HYBRID“ vor, der mit seiner Lithium-Ionen-Batterie mit 10 kWh auf eine rein elektrische Reichweite von knapp 30 Kilometern kommt. Auch vom Toyota Prius gibt es eine Plug-In-Variante, die erstmals auf der IAA 2009 vorgestellt wurde. Die Plug-In-Variante basiert auf der dritten Generation des Prius. Die Batteriekapazität wurde auf gut 5 kWh erhöht, sodass das Fahrzeug nun eine rein elektrische Reichweite von 20 Kilometern besitzt. 2010 startete Toyota ein Leasingprojekt mit rund 500 Fahrzeugen, von denen auch einige im Rahmen des Forschungsprojektes „BeMobility“ eingesetzt wurden und werden. Toyota plant das Fahrzeug ab 2012 in Serie zu produzieren [Toyota 2011].

4.1.3 Range-Extender Fahrzeuge (Range-Extender Electric Vehicle – REEV bzw. REX)

Auch Fahrzeuge mit Range-Extender haben einen Verbrennungs- und einen bzw. sogar zwei Elektromotoren (der zweite dient als Generator) an Bord. Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Plug-In-Hybrid, bei denen der Verbrennungsmotor der primäre Antrieb ist, stellt beim Range-Extender der Elektromotor den Hauptantrieb dar (typischerweise 50 kW und mehr). Die Aufgabe des Verbrennungsmotors ist die Stabilisierung des Ladezustands der Batterie (d.h. das Nachladen der Batterie), falls deren Ladezustand unter eine gewisse Grenze fallen sollte. Hierzu treibt der Verbrennungsmotor einen Generator an, der mithilfe des von ihm produzierten elektrischen Stroms die Batterie lädt. Je nach Umsetzung des Antriebskonzepts des Range-Extenders kann sowohl der Generator als auch der Verbrennungsmotor als zusätzlicher Antriebsmotor eingesetzt werden (vgl. bspw. Opel Ampera und B-Class E-CELL-Plus).

Als einer der ersten Serienfahrzeuge mit Range-Extender wird im vierten Quartal 2011 der Opel Ampera in Europa verfügbar sein. Seine rein elektrische Reichweite liegt bei 40 bis 80 Kilometern. Hierfür nutzt er eine 16 kWh Lithium-Ionen-Batterie [Opel 2011]. Mercedes Benz zeigte im Jahr 2009 auf der IAA im Rahmen der BlueZero Trilogie mit dem „BlueZERO E-CELL PLUS“ ein Fahrzeug mit Range-Extender. Auf der IAA 2011 stellte Mercedes Benz dann ein auf der neuen Plattform der B-Klasse (BR246) basierendes seriennahes Konzeptfahrzeug mit „B-Class E-CELL-PLUS“ vor. Die rein elektrische Reichweite des Konzeptfahrzeugs liegt bei 100 km. Das Serienfahrzeug ist für 2014 angekündigt.

4.1.4 Batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle – BEV)

Im Gegensatz zu allen bisher aufgeführten Antrieben, die alle neben dem Elektromotor auch einen Verbrennungsmotor besitzen, hat das batterieelektrische Fahrzeug nur einen Elektromotor und keinen Verbrennungsmotor. Als Energiespeicher dient ein Akkumulator (Batterie), favorisiert werden hierfür derzeit Akkumulatoren auf Lithiumbasis.

Aufgrund des alleinigen Antriebs durch den Elektromotor, werden – für das Erreichen entsprechender Fahrleistungen – in diesen Fahrzeugen eher größere Elektromotoren mit Leistungen über 50 kW eingesetzt. Je nach Größe und angestrebter Reichweite des Fahrzeugs benötigen die Elektrofahrzeuge Akkukapazitäten von 15 kWh und mehr.

Erste seriennahe oder Serienfahrzeuge auf dem deutschen Markt waren der Mitsubishi i-MiEV mit einem 49 kW Elektromotor und einem 16 kWh fassenden Li-Akku [Mitsubishi 2011] und der smart Electric Drive (smart ed), der in der neuesten Generation einen 50 kW Elektromotor und einen rund 17 kWh fassenden Lithium-Ionen-Akkumulator nutzt. Die vom Hersteller angegebene Reichweite liegt beim i-MiEV bei rund 150 km und beim smart ED bei über 140 km.

4.1.5 Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV)

Wie das batterieelektrische Fahrzeug hat auch ein Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV) keinen Verbrennungsmotor sondern nur einen Elektromotor. Als Energiespeicher dient hier Wasserstoff, der mithilfe der Brennstoffzelle in elektrische Energie zum Antrieb des Elektromotors umgewandelt wird. Je nach Größe des Fahrzeugs, Größe des Wasserstofftanks und dessen zulässigen maximalen Druck von ca. 700 bar sind bereits heute Reichweiten von 400 km und mehr mit einer Tankfüllung erreichbar. Neben dem Wasserstofftank besitzen Brennstoffzellenfahrzeuge als zusätzlichen Energiespeicher noch eine kleine Batterie. Diese weist eine ähnlich Kapazität und Funktionalität wie bei einem Mild-Hybrid auf. Sie wird sowohl durch die Brennstoffzelle als auch durch Energie, die beim Bremsen zurückgewonnen wird, geladen. Die im Akkumulator gespeicherte Energie wird zur Abdeckung von Leistungsspitzenanforderungen des Antriebs genutzt.

Die A-Klasse (BR168) mit Brennstoffzelle (A-Klasse F-CELL) setzt Mercedes-Benz bereits seit 2004 in Flottentests ein. Diese wurde im Jahr 2005 abgelöst durch die B-Klasse (B-Klasse F-CELL auf Basis der Baureihe BR245). Die B-Klasse F-Cell wird als Kleinserie unter Serienbedingungen produziert. Der Elektromotor hat 100 kW und die Reichweite liegt bei rund 400 Kilometern. Die Lithium-Ionen Batterie hat ein Speichervermögen von 1,4 kWh. Neben Mercedes-Benz bietet auch Honda ein Brennstoffzellenfahrzeug an. Seit 2002 bietet Honda den FCX an, der 2008 von der zweiten Generation, dem Honda FCX Clarity, abgelöst wurde. Die Fahrzeuge sind als Leasingmodelle für ausgewählte Privat- und Geschäftskunden in den USA und Japan verfügbar. Der Elektromotor leistet 100 kW und die Reichweite liegt bei rund 400 km. Die Lithium-Ionen Batterie weist eine Kapazität von etwa 1,2 kWh auf [Honda 2011].

4.2 Komponenten von Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen

Neben den im vorhergehenden Abschnitt bereits angesprochenen Komponenten Elektromotor (bzw. Generator) und Batterie benötigen Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge für den elektrischen Antrieb weitere zusätzliche Komponenten, wie Leistungselektronik und zusätzliche Kabel, die in der Form oder in der Menge nicht in konventionellen Verbrennungsmotor basierten Antrieben vorkommen.

Der bereits mehrfach angesprochene **Elektromotor** übernimmt - je nach Fahrzeug- und Antriebstyp - die Funktion des Antriebs bzw. unterstützt einen zweiten (konventionellen) Antrieb. Des Weiteren übernimmt der Elektromotor die Funktion eines **Generators**, in dem er aus kinetischer Energie (Bremsenergieerückgewinnung) elektrische Energie erzeugt.

Gespeichert wird die elektrische Energie in einer **Batterie**, die bei einigen elektrischen Antrieben auch an einer Ladestation oder einer heimischen Steckdose geladen werden kann.

Eine weitere wichtige Komponente elektrischer Antriebe stellt die **Leistungselektronik** dar. Die Hauptaufgabe der Leistungselektronik besteht darin, elektrische Energie aus dem Akkumulator (Gleichstrom) auf die für den elektrischen Antriebsmotor passende Spannung und Frequenz umzuwandeln.

4.2.1 Hybrid Fahrzeuge (MHEV, FHEV und PHEV)

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt 4.1.1 und 4.1.2 beschrieben, haben die Hybridfahrzeuge neben dem konventionellen Verbrennungsmotor einen je nach Grad der Hybridisierung leistungsärmeren oder -stärkeren Elektromotor. Mit der Leistungsfähigkeit des Elektromotors steigen auch die Anforderungen an die Leistungselektronik, sodass für leistungsstärkere Elektromotoren auch eine leistungsstärkere Leistungselektronik benötigt wird.

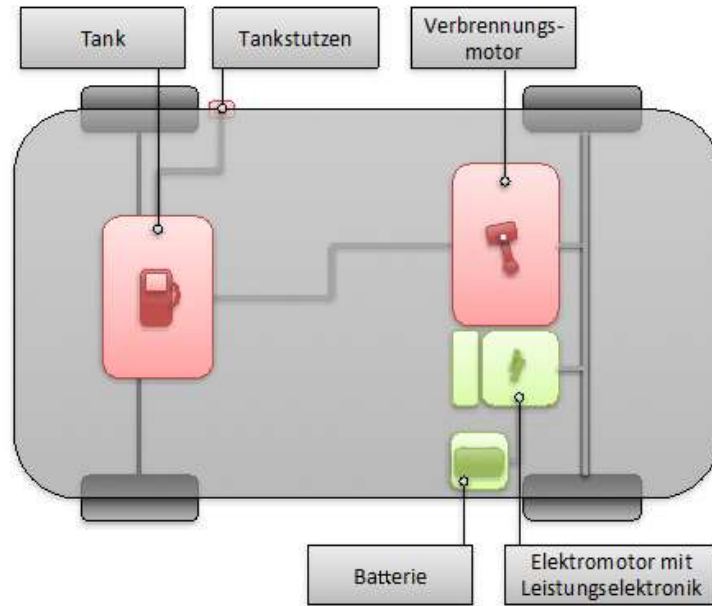


Abbildung 1 Schematische Darstellung der Komponenten eines Full-Hybrid-Fahrzeugs (Darstellung Daimler AG)

Parallel zum Grad der Hybridisierung steigt auch die Batteriekapazität. Der Plug-In-Hybrid benötigt zusätzlich noch eine Ladebuchse.

4.2.2 Range-Extender Fahrzeuge (REEV bzw. REX)

Das Range-Extender-Fahrzeug nutzt den Elektromotor als Hauptantrieb, so dass dieser und die dazugehörige Leistungselektronik entsprechend leistungsstark ausgelegt sind. Darüber hinaus benötigt der Range-Extender-Antrieb noch einen zusätzlichen Elektromotor mit dazugehöriger Leistungselektronik als Generator und eine Ladebuchse.

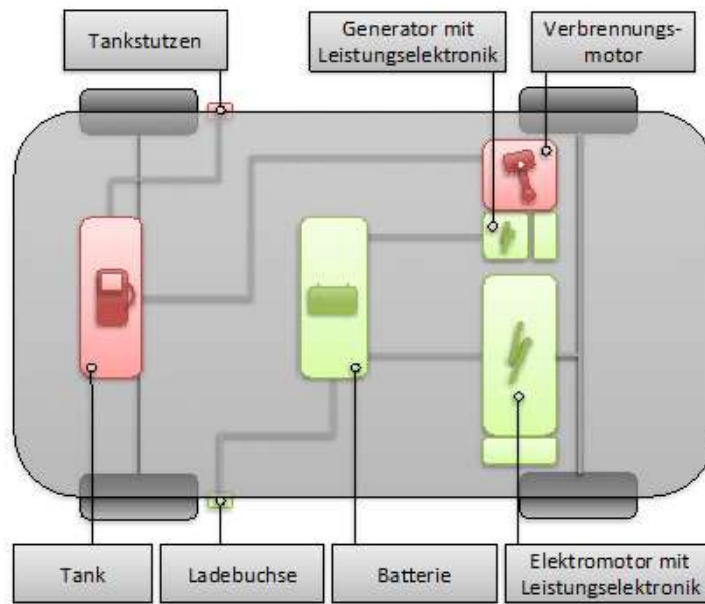


Abbildung 2 Schematische Darstellung der Komponenten eines Range-Extender-Fahrzeugs (Darstellung Daimler AG)

4.2.3 Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)

Da Elektrofahrzeuge nur den elektrischen Antrieb besitzen und deshalb eher leistungsfähige Elektromotoren eingesetzt werden, wird für batterieelektrische Fahrzeuge auch eine leistungsfähige Leistungselektronik benötigt.

Batterieelektrische Fahrzeuge haben keinen Verbrennungsmotor, so dass auch auf den Katalysator und die gesamte Auspuffanlage und den Tank verzichtet werden kann.

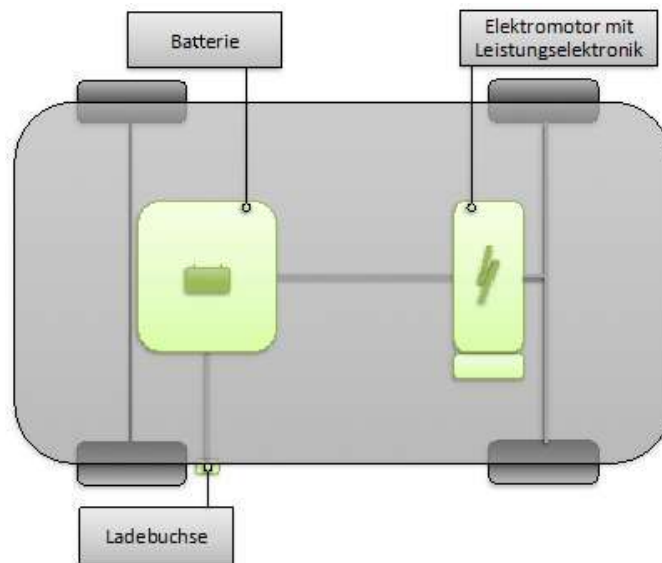


Abbildung 3 Schematische Darstellung der Komponenten eines batterieelektrischen Fahrzeugs (Darstellung Daimler AG)

4.2.4 Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)

Eine Sonderstellung unter den elektrisch angetriebenen Fahrzeugen nimmt das Brennstoffzellenfahrzeug ein. Der Brennstoffzellen-Antriebsstrang besteht, neben dem Elektromotor, dem Akkumulator und der aufgrund des leistungsfähigen Elektromotors großen Leistungselektronik noch aus drei weitere Komponenten: Dem Brennstoffzellen-Stack, dem Brennstoffzellen-Systemmodule und dem Wasserstofftank.

Der **Brennstoffzellen-Stack** stellt das Herz der Brennstoffzelle dar und übernimmt die Funktion aus Luftsauerstoff und Wasserstoff aus dem Tank des Fahrzeugs elektrische Energie zu erzeugen, mit deren Hilfe der Elektromotor betrieben wird. Die Komponenten, die dafür sorgen, dass je nach Fahrbetrieb der Brennstoffzelle genügend Sauerstoff und Wasserstoff zur Verfügung stehen, werden **Brennstoffzellen-Systemmodul** genannt. Diese Komponenten sorgen ebenfalls dafür, dass Wasserstoff und Sauerstoff mit dem richtigen Druck der Brennstoffzelle zugeführt werden. Außerdem sorgen sie dafür, dass überschüssige Wärme über den Kühlkreislauf und der Wasserdampf aus dem Fahrzeug abgeführt werden. Der **Wasserstofftank** – bestehend aus Aluminium und Karbonfaser – speichert den gasförmigen Wasserstoff unter sehr hohem Druck.

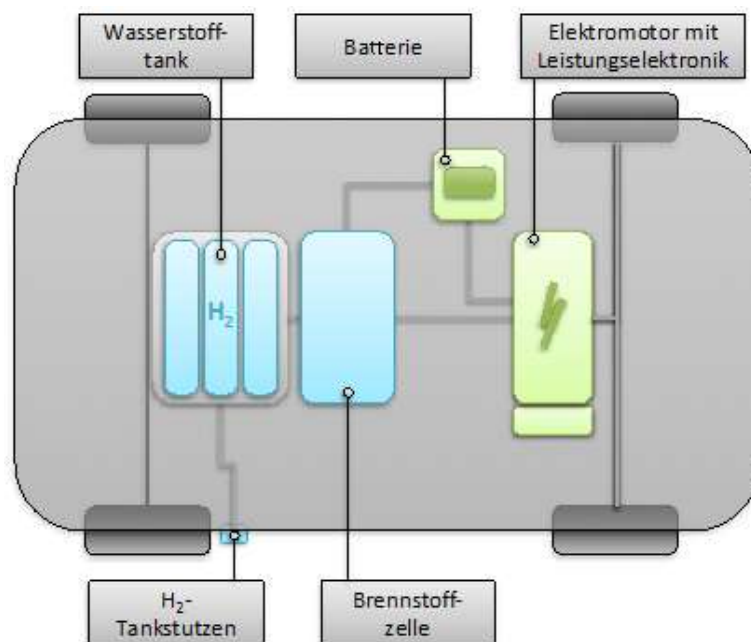


Abbildung 4 Schematische Darstellung der Komponenten eines Brennstoffzellenfahrzeugs (Darstellung Daimler AG)

Wie beim batterieelektrischen Fahrzeug benötigt das Brennstoffzellenfahrzeug keinen Abgaskatalysator und konventionellen Tank, da es keinen Verbrennungsmotor besitzt.

4.3 Marktszenarien

Auf die Abschätzung der zukünftigen Rohstoffbedarfe hat die zukünftige Durchdringung der globalen Fahrzeugmärkte mit elektrischen Antriebssträngen eine erhebliche Bedeutung. Da aber Aussagen zu zukünftigen Entwicklungen – vor allem bei einer Betrachtungsspanne bis 2020 bzw. 2030 – von erheblichen Unsicherheiten geprägt sind, bietet sich die Betrachtung unterschiedlicher Entwicklungsszenarien an.

In den letzten Jahren wurden von unterschiedlichen Instituten [McKinsey&Company 2009], [McKinsey&Company 2010], [Boston Consulting Group 2009], [Fraunhofer ISI 2010] oder [International Energy Agency 2009] Marktszenarien zur Elektromobilität erarbeitet und publiziert. Im Rahmen des Projektes „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte der Elektromobilität“ wurden daher keine eigenständigen Szenarien entwickelt. Stattdessen wurden Selektionskriterien definiert, anhand derer geeignete Szenarien für die weitere Verwendung im Projekt ausgewählt wurden.

Die folgenden Selektionskriterien wurden betrachtet: Die Szenarien sollten ...

- den Gesamtmarkt und Marktanteile verschiedener elektrischer Antriebstypen für die Jahre 2020 & 2030 darstellen,
- eine möglichst große Bandbreite an möglichen Entwicklungen abbilden,
- in sich konsistent und mit den Alternativszenarien vergleichbar sein,
- gut dokumentiert und nachvollziehbar sein.

Von der Vielzahl der betrachteten Szenarien erfüllen die Szenarien, die die Unternehmensberatung McKinsey im Jahre 2009 publiziert hat [McKinsey&Company 2009] die vorgegeben Anforderungen am besten und wurde daher für die weitere Betrachtung in diesem Projekt verwendet.

In der Studie von McKinsey 2009 werden drei Szenarien beschrieben, die anhand jeweils spezifischer Maßnahmenpakete zu unterschiedlichen CO₂-Minderungszielen führen.

Im **Szenario Optimized ICE** (ICE: Internal Combustion Engines – Verbrennungsmotoren) wird der Schwerpunkt auf Effizienzsteigerung konventioneller Antriebe gelegt. Hybridfahrzeuge erreichen nur eine marginale Marktdurchdringung (ca. 1%). Mit diesem Szenario würde nach McKinsey eine Reduzierung der Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen von 270 g/km im Jahr 2006 auf 170 g/km im Jahr 2030 möglich sein.

Das **Szenario Mixed Technology** setzt auf ein sich eher konservativ entwickelndes Verhältnis unterschiedlicher Antriebstechnologien (konventionell und elektrisch) und erreicht damit eine Reduzierung der Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen auf 150 g/km im Jahr 2030.

Im **Szenario Hybrid and Electric** wird von einer sehr dynamischen Entwicklung von Pkw mit elektrifizierten Antriebssträngen ausgegangen, verbunden auch mit einem starken Ausbau elektrischer Ladeinfrastruktur. Die Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen reduzieren sich in diesem Szenario auf 130 g/km im Jahr 2030.

Wenn auch diese Szenarien die zuvor genannten Anforderungen von allen untersuchten Szenario-Sets am besten erfüllen, so weisen sie doch eine wesentliche Schwäche auf. Die Szenarien beschreiben nur 3 unterschiedliche Kategorien von Fahrzeugen mit elektrischen Antriebssträngen: Hybridfahrzeuge (HEV), Plug-In-Hybride (PHEV) und Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV). Vor dem Hintergrund der Frage nach dem Rohstoffbedarf durch Elektrofahrzeuge ist es allerdings wichtig, zusätzlich die mögliche Marktdurchdringung von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) zu betrachten. Darüber hinaus erfolgt in diesen Szenarien auch keine Unterteilung der an der Steckdose aufladbaren Hybridfahrzeuge (PHEV und REX).

Aus diesem Grund wurden an den Szenarien folgende Modifikationen vorgenommen: Der Anteil der PHEV wurde in drei Komponenten aufgespalten, nämlich PHEV, REX und FCEV. Vor dem Hintergrund der sich erst noch entwickelnden Infrastruktur für eine Wasserstoffversorgung wird für die FCEV im Jahr 2020 ein Anteil von 10% an den PHEV angenommen (also 0,5% bzw. 0,6% an allen Zulassungen), für das Jahr 2030 ein Anteil von 20% an den PHEV (also 3% bzw. 5% an allen Zulassungen). Anmerkung: Natürlich ist ein FCEV kein an der Steckdose aufladbares Fahrzeug und gehört damit nicht zu diesem Fahrzeugsegment. FCEV wurden aber aufgrund ihrer Charakteristik – Null-Emissionsfähigkeit bei großer Reichweite – diesem Marktsegment zugeordnet.

Basis der weiteren Analysen und Berechnungen im Rahmen des Projektes „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte der Elektromobilität“ sind also die **Szenarien von McKinsey&Company** aus dem Jahr 2009, allerdings **modifiziert durch die Projektgruppe** (zur zusätzlichen - für die Ressourcenbetrachtung sinnvollen – Differenzierung der unterschiedlichen Antriebskonzepte).

Somit ergibt sich folgendes Bild:

Im **Szenario Mixed Technology** haben im Jahr 2020 noch immer 5 von 6 Pkw (84%) einen rein verbrennungsmotorischen Antrieb, wenn auch mit deutlich höherer Effizienz als heute. Weitere 10 Prozent sind HEV, lediglich gut 2% sind PHEV oder REX und 0,5% FCEV. Im gleichen Szenario erhöht sich bis 2030 der Anteil der HEV auf mehr als das Doppelte (23%), ebenso wie die Anteile bei den anderen Antriebsarten. Fahrzeuge nur mit Verbrennungsmotor machen noch immer über die Hälfte aller Neufahrzeuge weltweit aus.

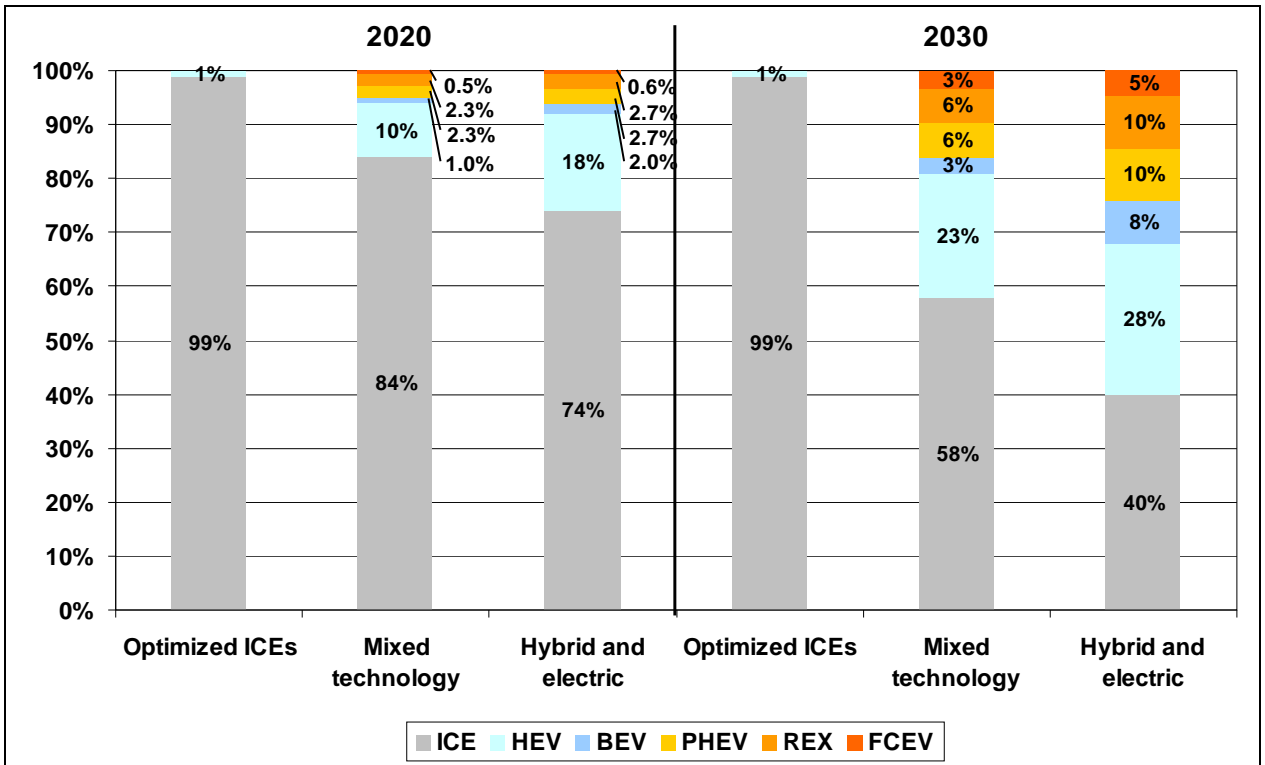


Abbildung 5 Struktur der Pkw-Neuzulassungen differenziert nach Antriebstypen (Basis: Szenarien von McKinsey&Company 2009, modifiziert durch Projektgruppe)

Im **Szenario Hybrid and Electric** ist der Anteil von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang schon deutlich höher, jedes vierte Neufahrzeug fällt in diese Kategorie. Auch hier dominieren HEV mit 18%. Im Jahr 2030 haben dann bereits 60% aller Fahrzeuge einen elektrischen Antriebsstrang, davon sind knapp die Hälfte HEV.

Die Entwicklung der globalen Neuzulassungszahlen wird in diesen Szenarien übrigens nicht unterschieden. Ausgehend von 61 Mio. Pkw p.a. (Neuzulassungen) im Jahr 2010 werden für das Jahr 2020 Neuzulassungen in Höhe von 75 Mio. Pkw p.a. und 2030 dann 90 Mio. Pkw p.a. angenommen.

Kombiniert man diese globalen Neuzulassungszahlen mit den entsprechenden Anteilen in den unterschiedlichen Szenarien, so erhält man die in Abb. 6 dargestellten Zulassungszahlen (in Mio.):

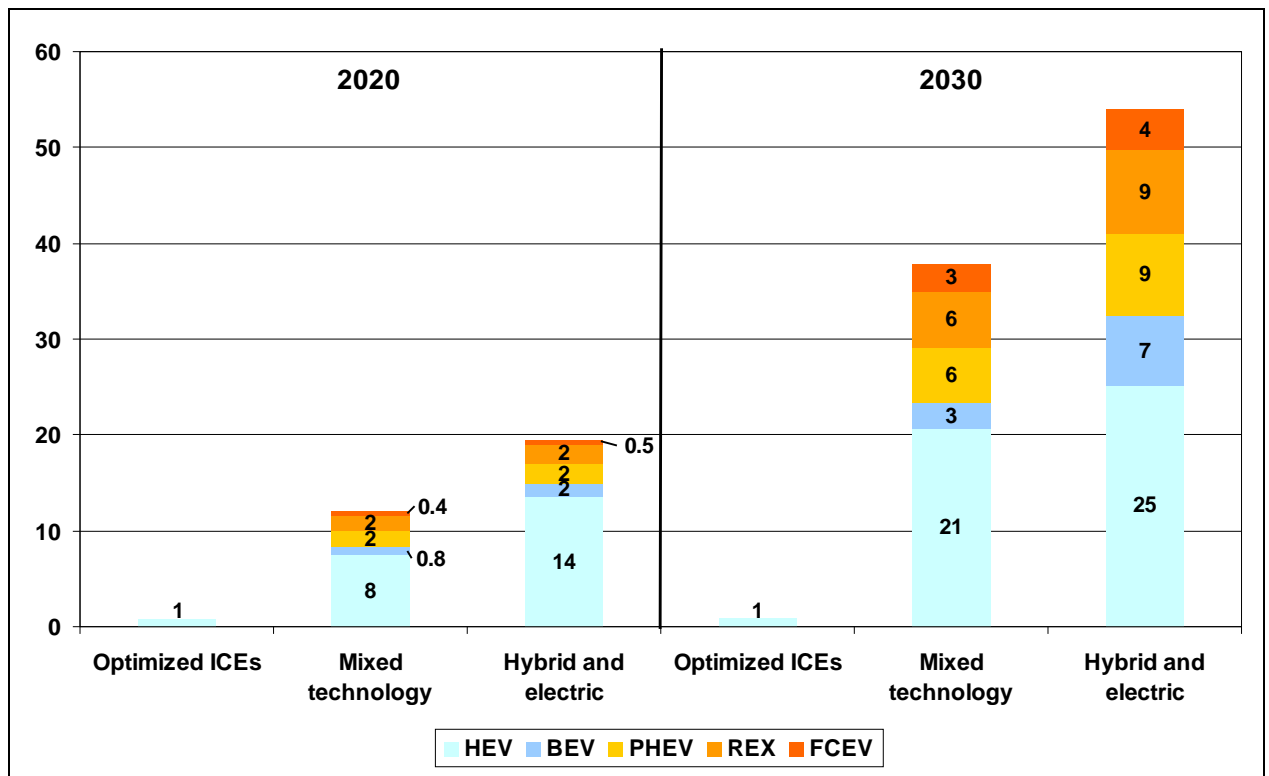


Abbildung 6 Pkw-Neuzulassungen bzw. Produktionszahlen für Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang differenziert nach Antriebstypen (Basis: Szenarien von McKinsey&Company 2009, modifiziert durch Projektgruppe)

Während im **Szenario Optimized ICE** sowohl in 2020 als auch in 2030 nur jeweils 1 Mio. Hybridfahrzeuge jährlich produziert werden, steigt diese Zahl im **Szenario Mixed Technology** von ca. 12 Mio. (2020) auf ca. 38 Mio. in 2030 und im **Szenario Hybrid and Electric** von knapp 20 Mio. auf ca. 54 Mio. Fahrzeuge.

In allen Szenarien und Zeiträumen haben die HEV nach wie vor die größten Anteile an neuen Antrieben, mit allerdings abnehmender Dominanz im Zeitraum bis 2030. Rein batterieelektrische Fahrzeuge liegen in allen betrachteten Fällen unter 10%, meist sogar bei max. 3%.

Hybridfahrzeugen mit und ohne Ladefähigkeit am Stromnetz werden in den nächsten 20 Jahren die Elektrifizierung des Antriebsstranges dominieren, rein batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge bleiben in allen Szenarien im einstelligen Prozent- und Millionenbereich. Fahrzeuge mit rein verbrennungsmotorischem Antrieb werden sehr viel effizienter und bleiben in allen Szenarien die dominierende Antriebsart, auch bis 2030.

Das **Szenario Hybrid and Electric** als ambitioniertestes Marktdurchdringungsszenario für die Elektromobilität diene als Basis-Szenario für die später dargestellte Berechnung der Rohstoffbedarfe.

5 Die prioritären Metalle für das System Elektromobilität

In einer ersten intensiven Untersuchung wurden 56 Metalle (siehe Abbildung 7) mit den Suchbegriffen „Elektrofahrzeuge“, „Elektromobilität“, „electric vehicle“ und „electric mobility“ recherchiert. Die Auswahl der 56 Metalle erfolgte möglichst weit gefächert durch das Periodensystem. Nichtmetalle, radioaktive Elemente, eindeutig toxische Elemente (z.B. Cadmium, Quecksilber), Massenmetalle bzw. Beimetalle (Fe, Al, Cr, Ni) sowie Natrium, Kalium und Calcium gingen nicht mit in die Analyse ein.

I		II		Hauptgruppen des Periodensystems										III	IV	V	VI	VII	VIII	Schale								
1,0079 H 1 Wasserstoff																			4,00260 He 2 Helium	K								
6,941 Li 3 2/1 Lithium	9,01218 Be 4 2/2 Beryllium																		10,81 B 5 2/3 Bor	12,011 C 6 2/4 Kohlenstoff	14,0067 N 7 2/5 Stickstoff	15,9994 O 8 2/6 Sauerstoff	18,9984 F 9 2/7 Fluor	20,179 Ne 10 2/8 Neon	L			
22,9898 Na 11 8/1 Natrium	24,305 Mg 12 8/2 Magnesium																		26,9815 Al 13 8/3 Aluminium	28,0855 Si 14 8/4 Silicium	30,9738 P 15 8/5 Phosphor	32,06 S 16 8/6 Schwefel	35,453 Cl 17 8/7 Chlor	39,948 Ar 18 8/8 Argon	M			
Nebengruppen																												
		III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a	I a	II a																			
39,098 K 19 8/1 Kalium	40,08 Ca 20 8/2 Calcium	44,956 Sc 21 9/2 Scandium	47,88 Ti 22 10/2 Titan	50,941 V 23 11/2 Vanadium	51,996 Cr 24 13/1 Chrom	54,938 Mn 25 13/2 Mangan	55,847 Fe 26 14/2 Eisen	58,933 Co 27 15/2 Kobalt	58,69 Ni 28 16/2 Nickel	63,546 Cu 29 18/1 Kupfer	65,39 Zn 30 18/2 Zink	69,72 Ga 31 18/3 Gallium	72,39 Ge 32 18/4 Germanium	74,922 As 33 18/5 Arsen	78,96 Se 34 18/6 Selen	79,904 Br 35 18/7 Brom	83,80 Kr 36 18/8 Krypton											
85,468 Rb 37 8/1 Rubidium	87,62 Sr 38 8/2 Strontium	88,906 Y 39 9/2 Yttrium	91,224 Zr 40 10/2 Zirkon	92,906 Nb 41 12/1 Niob	95,94 Mo 42 13/1 Molybdän	101,07 *Tc 43 13/2 Technetium	106,42 Ru 44 15/1 Ruthenium	106,42 Rh 45 16/1 Rhodium	107,868 Pd 46 18/0 Palladium	112,41 Ag 47 18/1 Silber	114,82 Cd 48 18/2 Cadmium	114,82 In 49 18/3 Indium	118,710 Sn 50 18/4 Zinn	121,75 Sb 51 18/5 Antimon	127,60 Te 52 18/6 Tellur	126,905 I 53 18/7 Jod	131,29 Xe 54 18/8 Xenon											
132,905 Cs 55 8/1 Cäsium	137,33 Ba 56 8/2 Barium	71 *La 57 bis 71 Lanthaniden	178,49 Hf 72 10/2 Hafnium	180,948 Ta 73 11/2 Tantal	183,85 W 74 12/2 Wolfram	186,207 Re 75 13/2 Rhenium	190,2 Os 76 14/2 Osmium	192,22 Ir 77 15/2 Iridium	195,08 Pt 78 17/1 Platin	196,967 Au 79 18/1 Gold	200,59 Hg 80 18/2 Quecksilber	204,383 Tl 81 18/3 Thallium	207,2 Pb 82 18/4 Blei	208,980 Bi 83 18/5 Wismut	(209) *Po 84 18/6 Polonium	(210) *At 85 18/7 Astatin	(222) *Rn 86 18/8 Radon											
(223) 87 8/1 *Fr Francium	(226) 88 8/2 *Ra Radium	89 bis 103 *Ku 104 10/2 Kurzschnitium	(261) 105 *Ha Hassium	(263) 106 *Unh Unnilhexium	(263) 107 *Uns Unnilseptium																							

Lanthaniden	138,906 La 57 9/2 Lanthan	140,12 Ce 58 8/2 Cer	140,908 Pr 59 8/2 Praseodym	144,24 Nd 60 8/2 Neodym	(145) 61 8/2 *Pm Promethium	150,36 Sm 62 8/2 Samarium	151,96 Eu 63 8/2 Europium	157,25 Gd 64 9/2 Gadolinium	158,925 Tb 65 8/2 Terbium	162,50 Dy 66 8/2 Dysprosium	164,930 Ho 67 8/2 Holmium	167,26 Er 68 8/2 Erbium	168,934 Tm 69 8/2 Thulium	173,04 Yb 70 8/2 Ytterbium	174,967 Lu 71 9/2 Lutetium
	227,028 (227) *Ac Actiniden	232,038 (232) *Th Thorium	231,036 (231) *Pa Protactinium	238,029 (238) *U Uran	237,048 (237) *Np Neptunium	(241) 94 9/2 *Pu Plutonium	(243) 95 8/2 *Am Americium	(247) 96 9/2 *Cm Curium	(247) 97 9/2 *Bk Berkelium	(251) 98 9/2 *Cf Californium	(252) 99 9/2 *Es Einsteinium	(257) 100 9/2 *Fm Fermium	(258) 101 9/2 *Md Mendelevium	(259) 102 9/2 *No Nobelium	(260) 103 9/2 *Lr Lawrencium

Abbildung 7 Die 56 recherchierten Elemente im Periodensystem

Des Weiteren wurden Spezialrecherchen zu einzelnen Metallen und Komponenten (z.B. Leistungselektronik) durchgeführt.

Die untersuchten Elemente wurden anschließend in drei Gruppen gegliedert: 1. Priorität, 2. Priorität, 3. Priorität.

Entscheidend für die Priorisierung der Metalle waren neben einem hohen Materialbedarf im Elektrofahrzeug auch mögliche stark wachsende konkurrierende Anwendungen der Metalle. Ein hoher Materialbedarf für die Elektromobilität ist bei den Seltenen Erden Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium sowie bei Gallium, Lithium und Kobalt festzustellen. Die vier Seltenen Erden werden vor allem in Permanentmagneten, die für den Elektromotor des Elektrofahrzeugs benötigt werden, eingesetzt. Zusätzlich zu dem hohen Materialbedarf sind sehr stark wachsende konkurrierende Anwendungen wie z.B. in Windkraftanlagen zu verzeichnen, wodurch sie als besonders kritisch eingestuft sind.

Ein verhältnismäßig eher geringer Materialbedarf ist bei Indium, Germanium, Gold, Silber, Platin, Palladium, Ruthenium und Kupfer zu verzeichnen. Diese Metalle konkurrieren aber mit vielen anderen Anwendungen, was der Einstufung in die 1. Priorität bedarf. Beispielsweise findet Indium Anwendung in der Leistungselektronik der Elektrofahrzeuge. Das sehr starke Wachstum in konkurrierenden Anwendungen wie den Photovoltaik-Anlagen und den geringen Potenzialen bei den Primärressourcen als Minor Metal setzen Indium in die Gruppe der kritischen Metalle.

Die Ergebnisse wurden auf dem ersten Experten-Workshop im September 2010 in Berlin (Teilnehmerliste siehe Anhang 1) diskutiert. Um ein möglichst breites Spektrum an Experten-Einschätzungen zu erhalten, wurden Teilnehmer aus den Bereichen Wissenschaft (u.a. TU Braunschweig, Universität Augsburg), Administration (UBA), Automobilherstellern (BMW, Volkswagen) und Zulieferern (u.a. Vakuumschmelze, Aurubis, Magnequench, Hitachi, Bosch, I+ME ACTIA) eingeladen.

Wesentliches Ergebnis des Workshops war die Verständigung auf folgende 15 Elemente der ersten Priorität:

- Neodym
- Praseodym
- Dysprosium
- Terbium
- Indium
- Gallium
- Germanium
- Gold
- Silber
- Kupfer
- Platin
- Palladium
- (Ruthenium)
- (Lithium)
- (Kobalt)

Ruthenium wurde im Laufe der weiteren Untersuchung in Priorität 2 herabgestuft, da kein wesentlicher Beitrag in der weiteren Analyse festgestellt werden konnte.

Die Metalle Lithium und Kobalt gehören ebenfalls zu den Metallen der 1. Priorität. Da in den Parallelprojekten LiBRi und LithoRec die Batterien für Elektrofahrzeuge intensiv untersucht werden und daher die Elektrofahrzeug-Komponente Batterie explizit in diesem Arbeitspaket „OPTUM Ressourcen“ ausgeschlossen sind, gehen Lithium und Kobalt nicht weiter in die Untersuchung dieses Arbeitspaketes ein.

Die restlichen 12 prioritären Elemente gehen in die vertiefende weitere Untersuchung des Projektes ein.

I		II		Hauptgruppen des Periodensystems										III	IV	V	VI	VII	VIII	Schale							
1,0079 H 1 Wasserstoff																			4,00260 He 2 Helium	K							
6,941 Li 3 Lithium	9,01218 Be 4 Beryllium																		10,81 B 5 Bor	12,011 C 6 Kohlenstoff	14,0067 N 7 Stickstoff	15,9994 O 8 Sauerstoff	18,9984 F 9 Fluor	20,179 Ne 10 Neon	L		
22,9898 Na 11 Natrium	24,305 Mg 12 Magnesium																		26,9815 Al 13 Aluminium	28,0855 Si 14 Silicium	30,9738 P 15 Phosphor	32,06 S 16 Schwefel	35,453 Cl 17 Chlor	39,948 Ar 18 Argon	M		
Nebengruppen																											
		III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a		I a	II a																	
39,098 K 19 Kalium	40,08 Ca 20 Calcium	44,956 Sc 21 Scandium	47,88 Ti 22 Titan	50,941 V 23 Vanadium	51,996 Cr 24 Chrom	54,938 Mn 25 Mangan	55,847 Fe 26 Eisen	58,933 Co 27 Kobalt	58,69 Ni 28 Nickel	63,546 Cu 29 Kupfer	65,39 Zn 30 Zink	69,72 Ga 31 Gallium	72,59 Ge 32 Germanium	74,922 As 33 Arsen	78,96 Se 34 Selen	79,904 Br 35 Brom	83,80 Kr 36 Krypton										
85,468 Rb 37 Rubidium	87,62 Sr 38 Strontium	88,906 Y 39 Yttrium	91,224 Zr 40 Zirkonium	92,906 Nb 41 Niob	95,94 Mo 42 Molybdän	101,07 *Tc 43 Technetium	102,906 Ru 44 Ruthenium	106,42 Rh 45 Rhodium	106,42 Pd 46 Palladium	107,868 Ag 47 Silber	112,41 Cd 48 Cadmium	114,82 In 49 Indium	118,710 Sn 50 Zinn	121,75 Sb 51 Antimon	127,60 Te 52 Tellur	126,905 I 53 Jod	131,29 Xe 54 Xenon										
132,905 Cs 55 Cäsium	137,33 Ba 56 Barium	178,49 Hf 72 Hafnium	180,948 Ta 73 Tantal	183,85 W 74 Wolfram	186,207 Re 75 Rhenium	190,2 Os 76 Osmium	192,22 Ir 77 Iridium	195,08 Pt 78 Platin	196,967 Au 79 Gold	200,59 Hg 80 Quecksilber	204,383 Tl 81 Thallium	207,2 Pb 82 Blei	208,980 Bi 83 Wismut	(209) *Po 84 Polonium	(210) *At 85 Astatin	(222) *Rn 86 Radon											
(223) *Fr 87 Francium	(226) *Ra 88 Radium	89 bis 103 *Ku 104 Kurscha-tovium	(261) *Ha 105 Hahnium	(262) *Unh 106 Unheil-beumium	(263) *Uns 107 Unnil-septium																						

Lanthaniden	138,906 57 Lanthan	140,12 58 Cer	140,908 59 Praseodym	144,24 60 Neodym	(145) 61 Promethium	150,36 62 Samarium	151,96 63 Europium	157,25 64 Gadolinium	158,925 65 Terbium	162,50 66 Dysprosium	164,930 67 Holmium	167,26 68 Erbium	168,934 69 Thulium	173,04 70 Ytterbium	174,967 71 Lutetium
Actiniden	227,028 89 Actinium	232,038 90 Thorium	231,036 91 Protactinium	238,029 92 Uran	237,048 93 Neptunium	(244) 94 Plutonium	(243) 95 Americium	(247) 96 Curium	(247) 97 Berkelium	(251) 98 Californium	(252) 99 Einsteinium	(257) 100 Fermium	(258) 101 Mendelevium	(259) 102 Nobelium	(260) 103 Lawrencium

Abbildung 8 Die Metalle der 1. Priorität im Periodensystem

6 Bedarf an prioritären Metallen für die wesentlichen Komponenten der Elektromobilität

In der nachfolgenden Abbildung ist die aktuelle Relevanz der Metalle der 1. Priorität für die wesentlichen Komponenten (ausgenommen Batterie) der Elektromobilität dargestellt. An dieser Stelle ist zur Übersicht eine halbquantitative Darstellung zu sehen (die detaillierten Daten für die Komponenten finden sich in Abschnitt 7). Je nach Größe der dargestellten Kreise werden die prioritären Metalle entweder im Milligramm-, Gramm- oder gar im Kilogramm-bereich in den einzelnen Komponenten eingesetzt. Letzteres betrifft nur Kupfer, allerdings gleich in mehreren Komponenten für die Elektromobilität. Die Seltenen Erden Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium sind im größeren Grammbereich in den Permanentmagneten der Elektromotoren sowie in Permanentmagneten in spezifischen Komponenten bei Brennstoffzellenfahrzeugen enthalten. Von den sonstigen primären Metallen sind im Grammbereich noch Silber in der Leistungselektronik sowie Platin in den Brennstoffzellen der entsprechenden Fahrzeuge im Einsatz. Gold, Indium, Germanium, Gallium und Palladium sind heute in der Elektromobilität vor allem in der Leistungselektronik zu finden; allerdings nur im Milligrammbereich (siehe Daten in Abschnitt 7).

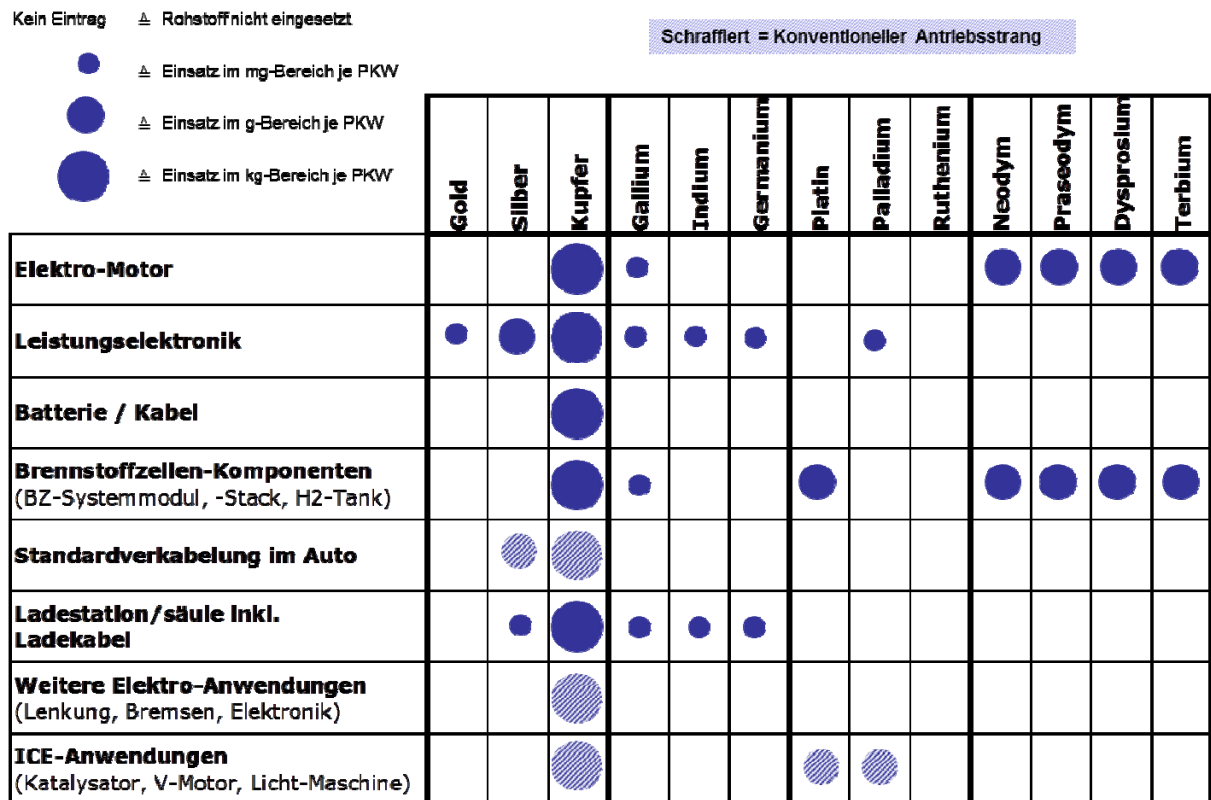


Abbildung 9 Übersicht der Komponenten und der Rohstoffbedarf je Metall in 2010

Schließlich sind in der obigen Abbildung in schraffierter Darstellung die Größenordnungen der Metallmengen für Komponenten des konventionellen (ICE = internal combustion engine) Antriebsstrangs dargestellt. Hier ist vor allem Kupfer (Standardverkabelung, Lichtmaschine usw.) sowie Platin und Palladium (Autoabgaskatalysator) hervorzuheben. Gerade im Falle von Platin und Palladium ergeben sich interessante gegenläufige Effekte, da die Elektromobilität einerseits den Bedarf spezifisch erhöht (Platin für Brennstoffzellen, Palladium in der Leistungselektronik) aber andererseits im Falle vollelektrischer Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge der Autoabgaskatalysator und damit der entsprechende Platin- und Palladiumbedarf eingespart wird.

7 Szenarien des Materialeinsatzes für Elektromobilität

Mit Hilfe einfacher Szenarien wird der Materialeinsatz der prioritären Elemente in der Elektromobilität beleuchtet. Als Materialeinsatz ist in diesem Zusammenhang die Menge der im Fahrzeug eingesetzten prioritären Materialien ohne Förderungs-, Aufbereitungs- oder Produktionsverluste zu verstehen. Die Szenarioergebnisse werden für die drei Zeitstützpunkte 2010, 2020 und 2030 berechnet.

Als Ausgangspunkt für die Szenarien wird die Nachfrage nach Antriebstypen (z.B. Hybridfahrzeug, Batterieelektrisches Fahrzeug) gewählt. Diesen Antriebstypen werden in einer Verknüpfungsmatrix standardisierte Komponenten zugeteilt. So werden dem Hybridfahrzeug ein kleiner E-Motor, dem BEV ein großer E-Motor und dem REX (E-Kfz mit Range Extender) 2

große E-Motoren zugewiesen. In unterschiedlichen Szenariovariationen (Details zu Szenarioannahmen siehe Kapitel 7.2.4) werden die Komponenten über die Zeitstützpunkte variiert. Im Szenario „Effizienz“ werden ausgehend von den 2010-er Daten Materialeinsparungen abgeschätzt. Additiv wird der Effekt des Recyclings auf den Materialbedarf bilanziert. Zusätzlich wird für ausgewählte Antriebstypen der spezifische Materialbedarf substituiert.

Im folgenden Kapitel werden diese Szenarienbausteine beschrieben:

1. Szenarienbildung nach Antriebstyp der E-Kfz
2. Standardisierte Komponenten der E-Mobilität
3. Verknüpfungsmatrix der Kfz-Antriebstypen mit den Komponenten
4. Modellierung der Szenarien

7.1 Datenquellen

Aufbauend auf dem Knowhow der Projektpartner (Öko-Institut, TU Clausthal, Daimler AG, Umicore) und einer intensiven Literaturrecherche wurde das zugrunde liegende Datenmaterial mit Hilfe der Experten im Rahmen der Experten-Workshops (siehe Anhang) sowie der Interviews diskutiert und verifiziert. Die Experten aus den verschiedenen Bereichen der Wissenschaft (TU Braunschweig, Uni Erlangen-Nürnberg, IZT, BGR), der Fahrzeughersteller (Volkswagen, BMW) sowie Hersteller und Zulieferer der Elektrofahrzeug-Komponenten (Bosch, Siemens, Magneten, Vakuumschmelze, Aurubis, I+ME ACTIA, Hitachi, Chemetall, Voest-Alpine) fundierten die Festlegung der Datengrundlage.

7.2 Szenarienbausteine

Die Szenariobausteine werden in dem folgenden Unterkapitel beschrieben.

7.2.1 Szenarienbildung nach Antriebstyp der E-Kfz

Im Kapitel 4 wurden die Antriebstypen kurz skizziert und die vorhandenen Marktszenarien diskutiert:

- Konventionelles Szenario (Optimized ICE)
- Moderates Szenario (Mixed Technology)
- Ambitioniertes Szenario (Hybrid and Electric)

In der folgenden Tabelle werden die verfügbaren Szenarioergebnisse illustriert. Für den Stützzeitpunkt 2010 ist die PKW-Neuzulassung nach Antriebstyp für alle Szenarien identisch. In den Jahren 2020 und 2030 ist die Gesamtzahl der PKW Neuzulassungen zwar auch identisch jedoch unterscheidet sich die Verteilung auf die unterschiedlichen Antriebstypen. Für das ambitionierte Szenario werden die unterschiedlichen additiven Szenariovarianten diskutiert. Für das moderate Szenario werden nur die kumulativen Ergebnisse gezeigt.

Tabelle 1 Szenariendatensätze für die Stützzeitpunkte 2010, 2020 und 2030

Szenarien /Stützzeitpunkt	2010	2020	2030
Konventionell	identisch	nicht behandelt	
Moderat		nur kumuliert	nur kumuliert
Ambitioniert		Basis, Innovation, Recycling, Substitution	Basis. Innovation, Recycling, Substitution

Die Anzahl der Neuzulassung ist für alle drei Szenarien identisch. Im Jahr 2010 werden weltweit 60,4 Millionen Fahrzeuge, im Jahr 2020 75 Millionen Fahrzeuge und im Jahr 2030 90 Millionen Fahrzeuge zugelassen.

In der Tabelle für das moderate Szenario werden die Neuzulassungen nach Antriebstyp spezifiziert. Elektro-Antriebstypen (d.h. alle außer ICE konventionell) decken im Jahr 2020 16 % und im Jahr 2030 42 % der Gesamtneuzulassung ab.

 Tabelle 2 PKW-Neuzulassungen für die Jahre 2020 und 2030 im **moderaten** Szenario (Basis: Szenarien von McKinsey&Company 2009, modifiziert durch Projektgruppe)

Pkw-Neuzulassungen	2020		2030	
	FCEV	0,4 Mio	1%	2,9 Mio
BEV	0,8 Mio	1%	2,7 Mio	3%
Range-Extender	1,7 Mio	2%	5,8 Mio	6%
Plug-In-Hybrid	1,7 Mio	2%	5,8 Mio	6%
Mild/Full-Hybrid	7,5 Mio	10%	20,7 Mio	23%
ICE (Diesel/Benzin)	63,0 Mio	84%	52,2 Mio	58%
Gesamtmarkt	75 Mio	100%	90 Mio	100%
davon elektrifiziert	12 Mio	16%	38 Mio	42%

Tabelle 3 PKW-Neuzulassungen für die Jahre 2020 und 2030 im **ambitionierten** Szenario (Basis: Szenarien von McKinsey&Company 2009, modifiziert durch Projektgruppe)

Pkw-Neuzulassungen	2020		2030	
	FCEV	0,5 Mio	1%	4,3 Mio
BEV	1,5 Mio	2%	7,2 Mio	8%
Range-Extender	2,0 Mio	3%	8,6 Mio	10%
Plug-In-Hybrid	2,0 Mio	3%	8,6 Mio	10%
Mild/Full-Hybrid	13,5 Mio	18%	25,2 Mio	28%
ICE (Diesel/Benzin)	55,5 Mio	74%	36,0 Mio	40%
Gesamtmarkt	75 Mio	100%	90 Mio	100%
davon elektrifiziert	20 Mio	26%	54 Mio	60%

Im ambitionierten Szenario steigt der Anteil der Elektro-Antriebstypen auf 26 % im Jahr 2020 und auf 60 % in 2030.

7.2.2 Standardisierte Komponenten der E-Mobilität

In den Komponenten wird nur der Materialbedarf der in dieser Studie betrachteten prioritären Metalle⁵ erfasst. Auf die Bilanzierung von anderen Metallen, z.B. Stahl oder Aluminium, wird an dieser Stelle verzichtet. Um die Bilanzierung einfach zu gestalten, konzentriert sich die Beschreibung auf folgende Komponenten:

- Elektromotor
- Leistungselektronik
- EV Komponenten
- FCEV-Komponenten
- Ladestation/-säule inklusive Ladekabel
- Standardverkabelung Auto (nur nachrichtlich)
- Weitere E-Anwendungen (nur nachrichtlich)
- Sonstige (nur nachrichtlich)

Kurzcharakterisierung der Komponenten

Im Folgenden werden die Komponenten kurz beschrieben. Die detaillierte Auflistung der prioritären Metalle und ihre Fortschreibung bis 2030 finden sich in den unteren Tabellen.

Elektromotor

Unter dem Elektromotor wird in dieser Rubrik der Elektromotor zum Antrieb des Fahrzeuges verstanden. Da die PKW in den Szenarien dieses Projektes auf Marktszenarien von Kinsey

⁵ Da für Ruthenium keine Verwendung nachgewiesen werden konnte, wird in der folgenden Dokumentation Ruthenium nicht weiter diskutiert.

aufsetzen, die nicht nach Größe der einzelnen Segmente (es gibt jeweils nur ein Durchschnitts-Hybrid-Fahrzeug, Durchschnitts-Brennstoffzellen-Fahrzeug etc.) klassifiziert werden, sind alle Komponenten inkl. des Elektromotors als Durchschnittskomponenten definiert. Der Elektromotor wird in einer kleinen Ausführung (<50 kW) und in einer großen Ausführung (>50 kW) gelistet (die Zuordnung der Motorengröße zu den Antriebstypen und deren Mix ist in Tabelle 11 dargestellt). Der gesamte Materialbedarf der größeren Version des E-Motors weist dabei etwas weniger als den doppelten Bedarf der kleineren Version auf.

Zurzeit wird von den Automobilherstellern der Einsatz von Elektromotoren mit permanent erregten Magneten (PM) des Typs Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) favorisiert bzw. in den PKW eingesetzt. Permanent erregte Magnetmotoren benötigen Magnete, die in der Legierung gut 30% Seltene Erden enthalten. Neben anderen Metallen wird Kupfer verwendet um die Stromverteilung und den Läufer herzustellen. Als Basis für die Magnete dienen neben Eisen und Bor die Seltenen Erden Neodym und Praseodym. Um den hohen thermischen Belastungen Stand zu halten, wird dem Material Dysprosium beigemischt. Zusätzlich geben einige Hersteller die Zumischung von Terbium und auch von Gallium an. Alternativ können auch fremderregte Magnete (FM) eingesetzt werden. Allerdings weisen die permanent erregten Elektromotoren wichtige Vorteile wie hohe Leistungsdichten bei gleichzeitig geringerem Volumen und Gewicht auf.

Leistungselektronik

Die Leistungselektronik dient der zentralen Steuerung der Elektro-PKW. Sie steuert sowohl den Stromfluss von der Batterie zum Elektromotor, den Stromfluss vom Rekuperator zur Batterie als auch das Laden der Batterie mit Hilfe des Fremdstromes. Es gibt aus dem Kreis der Teilnehmer der Experten-Workshops eindeutige Hinweise, dass zukünftig insbesondere Galliumhalbleiter (GaN) für die Leistungselektronik eingesetzt werden. Als weitere traditionelle Metalle in der Leistungselektronik werden geringe Mengen Palladium, Gold, Germanium und Indium eingesetzt. Silber dient in höherem Maße als Kontaktmetall. Aus Kupfer werden die Leiterplatte und weitere Zuleitungen hergestellt. Kupfer bildet mengenmäßig das Hauptmetall.

EV Komponenten

Die EV-Komponenten bestehen aus Batterie und zugehörigen Leitungskabeln. Für die Batterien wird ausschließlich die Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien unterstellt.

Die Metalle Lithium und Kobalt in Lithiumbatterien werden in dieser Studie nicht bearbeitet, da sie Gegenstand eines besonderen Projektes [LithoRec 2011] sind. Als relevantes Metall verbleibt Kupfer als Leitungsmaterial.

Die drei Batterietypen stellen Batterien mit einer Kapazität von 0,8 kWh, 12,1 kWh und 24,2 kWh dar. Die Kupfergehalte sind dem generischen Batterietypen aus dem LiBRi Projekt [LiBRi 2011] entnommen.

Zusätzlich wird die Verkabelung der Batterie aus Kupfer bilanziert. Die Verkabelung dient der Leitung des Leistungsstromes zwischen Batterie, Leistungselektronik und Elektromotor.

FCEV-Komponenten

Das Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) stellt eine Sonderform der Elektromobilität dar. Das FCEV verfügt über eine Brennstoffzelle, die den elektrischen Strom aus Wasserstoff und Luft erzeugt. Der Strom wird über einen E-Motor in Antriebsenergie gewandelt. In der Konzeption ist eine Batterie als Zwischenspeicher vorgesehen. Als Hilfsmodule werden Hilfsaggregate zur Zuführung von „Verbrennungsluft“ und Kühlung, sowie der Wasserstofftank bilanziert.

Es finden sich in der Literatur sehr unterschiedliche Angaben zum Platineinsatz in der Brennstoffzelle. Ein wichtiger Grund hierfür ist nach wie vor die hohe Entwicklungsdynamik. Als realistisch (auch im Sinne der ökonomischen Verwertbarkeit) werden für die FCEV die Angaben von SolviCore [SolviCore 2011] herangezogen. Die Platingehalte werden für alle Szenarien auf die in der Tabelle aufgeführten Werte fixiert.

Tabelle 4 Abschätzung Brennstoffzellen [nach SolviCore 2011]

	2010	2020	2030
Pt (g/PKW)	80	30	10

Im Folgenden werden die Module aufgeführt, die aus dem bestehenden Satz der Komponenten quantifiziert werden. Für den Wasserstofftank konnte kein Einsatz von prioritären Metallen verifiziert werden.

Tabelle 5 Weitere Module für FCEV

Modul	Bedarf pro Fahrzeug	Quelle/Anmerkung
Systemmodule (Wasser, Luft)	10 % des Elektromotors (Pumpen, Gebläse)	Eig. Abschätzung
E-Motor	1 x 100 kW-Typ	Truckenbrodt 2011
Leistungselektronik	1x LE gross + 2x Kabel	Doppelter Kabelsatz, da 2 Energiespender vorliegen
Batterie	0,5 x Batterie-mittel in 2010 1x Batterie-mittel in 2020, 2030	Nach (Truckenbrodt 2011) verfügt FCEV über 6 kWh Hilfsbatterie, Tendenz der Reduktion FCEV mit Erhöhung Batterie-Kap.
Verkabelung	1x E-Fahrzeug	Interne Verkabelung
Ladestation	keine	Keine Aufladung vorgesehen
Weitere E-Anwendungen	1x nicht ICE-spec-AW	

Für die Hilfsaggregate wird eine Leistung von 10 % der Nominalleistung der Brennstoffzelle abgeschätzt. Damit wird für diese Elektromotoren 10 % des Metalleinsatzes des Antriebs-Elektromotors angesetzt.

Die weiteren Elemente zur Ausstattung eines FCEV sind in der obigen Tabelle aufgeführt.

Ladestation/-säule inklusive Ladekabel

Es sind zwei Grundtypen (in verschiedenen Varianten) zur externen Ladung von Elektrofahrzeugen angedacht. Zum einen besteht die Möglichkeit, den E-PKW häuslich über einen traditionellen Hausanschluss (inkludiert auch andere, betriebliche Einzelanschlüsse) zu laden, oder in einer zentralen E-Tankstelle aufzuladen. Der Hausanschluss verfügt über eine geringe Leistung und damit einen geringen Kupferbedarf. Aufgrund der geringen Leistung als Hausanschluss ist aber davon auszugehen, dass nur ein oder zwei Nutzer bedient werden können. Die Ausstattung der E-Tankstelle ist demgegenüber auf die Schnellladung mit hoher Kapazität ausgelegt. Da erwartet wird, dass die E-Tankstelle viele Nutzer bedient, ist der Kupferbedarf je Elektro-PKW gegenüber dem Hausanschluss um ca. 30 % geringer angesetzt. Die Elektronik zur Erfassung und Management des Stromverbrauchs ist mit einem grob abgeschätzten Bedarf an Kontaktmaterial Silber sowie an den Elektronikmaterialien Gallium, Indium und Germanium berücksichtigt.

Standardverkabelung Auto (nicht elektromobilitätspezifisch)

Die traditionelle Standardverkabelung wird mit einem geschätzten Bedarf an Kupfer für die Kabel und Silber für Kontakte berücksichtigt. Diese Komponente wird nur zur Bilanzierung des Basisbedarfes für ICE genutzt, da diese Komponente keinen Zusatzbedarf für die E-PKW darstellt.

Weitere E-Anwendungen (nicht elektromobilitätspezifisch)

In den weiteren Anwendungen sind die üblichen notwendigen Bedarfe an prioritären Metallen zusammengefasst, um Anwendungen für ICE-PKW wie Anlasser und Lichtmaschine sowie für alle PKW wie Scheibenwischer, Fensterheber u.a. zu erfassen. Auch diese Komponente wird nur zur Berechnung des ICE Bedarfes genutzt.

Sonstige (nicht elektromobilitätspezifisch)

Zur weiteren Abschätzung des Platin und Palladiumbedarfes im Automobilbau wurde nach Umicore [Umicore 2011] für den weltweiten Automobilbau der folgende Bedarf an Edelmetallen angesetzt. Die Abschätzung ist grob, da in den Szenarien keine weiteren Spezifizierungen weder über die zukünftige Aufteilung nach Benzin / Diesel Fahrzeugen noch über die zukünftigen Umweltstandards, z.B. Euro 6 [DfT 2010] gemacht werden. Daher werden die in Tabelle 6 aufgeführten Werte für alle drei Stützzeitpunkte in allen Szenarien verwendet.

Tabelle 6 Abschätzung Katalysatorbelegung (konstant über alle Szenarien):

Pt (g/PKW)	2,3
Pd (g/PKW)	2,7

Durchschnittswerte nach [Umicore 2011]

Tabelle 7 Basis-Szenario für 2010, 2020, 2030 [Rohstoffbedarf in kg]

	Neodym	Praseodym	Dysprosium	Terbium	Platin	Palladium	Gold	Silber	Gallium	Germanium	Indium	Kupfer
E-Motor												
kleiner E-Motor	150,0E-3	50,0E-3	90,0E-3	9,0E-3					435,0E-6			7,0E+0
großer E-Motor	360,0E-3	120,0E-3	210,0E-3	21,0E-3					1,0E-3			12,6E+0
Leistungselektronik:												
LE klein						64,0E-6	160,0E-6	4,0E-3	30,0E-6	30,0E-6	30,0E-6	2,4E+0
LE groß						80,0E-6	200,0E-6	6,0E-3	50,0E-6	50,0E-6	50,0E-6	2,5E+0
EV-Komponenten:												
Batterie (klein)												2,1E+0
Batterie (mittel)												9,2E+0
Batterie (groß)												18,5E+0
Kabel												4,5E+0
FCEV-Komponenten:												
FCEV-Systemmodule (Wasser, Luft)	36,0E-3	12,0E-3	21,0E-3	2,1E-3					103,5E-6			1,3E+0
FCEV - Stack					80,0E-3							
H2-Tank												
Ladestation/säule inklusive Ladekabel												
Einzel säule								1,0E-6	1,0E-6	1,0E-6	1,0E-6	11,0E+0
E-Tankstelle								1,0E-6	1,0E-6	1,0E-6	1,0E-6	7,5E+0
Standardverkabelung im Auto												
ICE								1,0E-3				5,0E+0
E-Fahrzeug								1,0E-3				5,0E+0
Weitere E-Anwendungen												
ICE-spez. Anwend.: Lichtmaschine, Anlasser												13,0E+0
Sonstiges:												
Katalysator					2,3E-3	2,7E-3						

Tabelle 8 Innovationsszenario 2020 [Rohstoffbedarf in kg]

	Neodym	Praseodym	Dysprosium	Terbium	Platin	Palladium	Gold	Silber	Gallium	Germanium	Indium	Kupfer
E-Motor												
kleiner E-Motor	135,0E-3	45,0E-3	76,5E-3	8,1E-3					391,5E-6			6,3E+0
großer E-Motor	324,0E-3	108,0E-3	178,5E-3	18,9E-3					931,5E-6			11,3E+0
Leistungselektronik:												
LE klein						57,6E-6	144,0E-6	3,6E-3	540,0E-6	27,0E-6	27,0E-6	2,2E+0
LE groß						72,0E-6	180,0E-6	5,4E-3	900,0E-6	45,0E-6	45,0E-6	2,3E+0
EV-Komponenten:												
Batterie (klein)												1,9E+0
Batterie (mittel)												8,3E+0
Batterie (groß)												16,7E+0
Kabel												2,7E+0
FCEV-Komponenten:												
FCEV-Systemmodule (Wasser, Luft)	32,4E-3	10,8E-3	17,9E-3	1,9E-3					93,2E-6			1,1E+0
FCEV - Stack					30,0E-3							
H2-Tank												
Ladestation/säule inklusive Ladekabel												
Einzel säule								900,0E-9	900,0E-9	900,0E-9	900,0E-9	9,9E+0
E-Tankstelle								900,0E-9	900,0E-9	900,0E-9	900,0E-9	6,8E+0

Tabelle 9 Innovationsszenario 2030 [Rohstoffbedarf in kg]

	Neodym	Praseodym	Dysprosium	Terbium	Platin	Palladium	Gold	Silber	Gallium	Germanium	Indium	Kupfer
E-Motor												
kleiner E-Motor	108,0E-3	36,0E-3	53,6E-3	6,5E-3					352,4E-6			5,7E+0
großer E-Motor	259,2E-3	86,4E-3	125,0E-3	15,1E-3					838,4E-6			10,2E+0
Leistungselektronik:												
LE klein						51,8E-6	129,6E-6	3,2E-3	1,2E-3	24,3E-6	24,3E-6	1,9E+0
LE groß						64,8E-6	162,0E-6	4,9E-3	2,0E-3	40,5E-6	40,5E-6	2,0E+0
EV-Komponenten:												
Batterie (klein)												1,7E+0
Batterie (mittel)												7,5E+0
Batterie (groß)												15,0E+0
Kabel												4,9E+0
FCEV-Komponenten:												
FCEV-Systemmodule (Wasser, Luft)	25,9E-3	8,6E-3	12,5E-3	1,5E-3					83,8E-6			1,0E+0
FCEV - Stack					10,0E-3							
H2-Tank												
Ladestation/säule inklusive Ladekabel												
Einzel säule								810,0E-9	810,0E-9	810,0E-9	810,0E-9	8,9E+0
E-Tankstelle								810,0E-9	810,0E-9	810,0E-9	810,0E-9	6,1E+0

Tabelle 10 Substitutionsszenario 2010, 2020, 2030 (teilweise Substitution des E-Motors) [Rohstoffbedarf in kg]

	Neodym	Praseodym	Dysprosium	Terbium	Platin	Palladium	Gold	Silber	Gallium	Germanium	Indium	Kupfer
E-Motor: Substitutions-Szenario 2010, wie Basis-Szenario 2010												
kleiner E-Motor (PM)	150,0E-3	50,0E-3	90,0E-3	9,0E-3					435,0E-6			7,0E+0
großer E-Motor (PM)	360,0E-3	120,0E-3	210,0E-3	21,0E-3					1,0E-3			12,6E+0
E-Motor: Substitutions-Szenario 2020												
kleiner E-Motor (PM)	135,0E-3	45,0E-3	76,5E-3	8,1E-3					391,5E-6			6,3E+0
großer E-Motor FCEV, BEV, REX (FM)												34,0E+0
großer E-Motor (PM)	324,0E-3	108,0E-3	178,5E-3	18,9E-3					931,5E-6			11,3E+0
E-Motor: Substitutions-Szenario 2030												
kleiner E-Motor (PM)	108,0E-3	36,0E-3	53,6E-3	6,5E-3					352,4E-6			5,7E+0
großer E-Motor FCEV, BEV, REX (FM)												30,6E+0
großer E-Motor (PM)	259,2E-3	86,4E-3	125,0E-3	15,1E-3					838,4E-6			10,2E+0

7.2.3 Verknüpfung der Kfz-Antriebstypen mit den Komponenten

Das Szenario Ergebnis (Sz-Ergebnis) berechnet sich für jedes Stützjahr (J) und Szenario (Sz) über die Verknüpfungsmatrix (VM) (siehe Tabelle 11) wie folgt:

$$\text{Sz-Ergebnis (J, Sz)} = \text{Antriebstyp (J, Sz)} \times \text{Komponente (J, Sz)} \times \text{VM}$$

Beispielrechnung für das Basis-Szenario im Jahr 2030, BEV, Rohstoffbedarf Dysprosium:

1.512.000 kg Dy in 2030 (Basis-Szenario) =

7,2 Mio. BEV in 2030 x 0,210 kg Dy in 2030 (im E-Motor, Basis-Sz) x 100% (siehe VM)

Die Quantifizierung für die Antriebstypen in den Szenarien ist über die PKW-Neuzulassungen (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3) dokumentiert. Der Rohstoffbedarf der Komponenten ist in Tabelle 7 bis Tabelle 10 aufgeführt.

Der Verknüpfungswert (z.B. 50 %) ist in Tabelle 11, der Verknüpfungsmatrix der Antriebstypen und Komponenten hinterlegt. In einigen Fällen wird die Zuordnung von PKW-Antriebstypen zu Komponenten auf verschiedene Untertypen der Komponenten verteilt. Die Koeffizienten sind eigene Schätzungen des Projektteams.

Für die Antriebsmotoren sind zwei Größen definiert. Für den Antriebstyp des Hybrid-Fahrzeugs wird zu 100% der kleine Elektromotor zugeordnet. Den Plug-In-Hybriden wird zu 75% ein großer Elektromotor und zu 25% ein kleiner Elektromotor zugeordnet. Dem Range-Extender (REX) wird hingegen, da der REX sowohl einen Generator als auch einen Antriebs-Elektromotor aufweist, rechnerisch 200 % Elektromotor (groß) zugeordnet. Den anderen Antriebstypen (BEV, FCEV) werden die großen Elektromotoren zugeordnet. Zu den Besonderheiten des Substitutions-Szenarios hinsichtlich der Elektromotoren siehe nächstes Kapitel 7.2.4.4.

Die Zuordnung der Leistungselektronik folgt im Allgemeinen der Elektromotorengröße. Als Ausnahme hierzu wird dem REX hier eine leicht abweichende Verteilung zuteil.

Die Batteriegröße wird entsprechend des Leistungsbedarfs den Antriebstypen zugeordnet. Nach den Ausführungen in Kapitel 4 verfügt der Hybrid-PKW nur über eine kleine Batterie. Demgegenüber verfügt der vollelektrische PKW (BEV) über die große Batterie. Den anderen Elektro-PKW wird nach den Erfahrungen des Projektteams eine mittlere Batterie zugewiesen. Die Hybrid-, Plug-In-Hybrid- und vollelektrischen Fahrzeuge sind mit je einem Kabelsatz ausgestattet. Der REX und das FCEV benötigen zwei Kabelsätze, da sie auf zwei Energiequellen (Generator und Batterie im REX, Brennstoffzelle und Batterie im FCEV) zurückgreifen.

Die Brennstoffzelle ist allein dem FCEV-PKW zugeordnet.

Jeder PKW besitzt eine typische Verkabelung, die hier aus Gründen der Modellflexibilität für ICE und nicht-ICE getrennt sind. Die Ladeinfrastruktur (Ladesäule / E-Tankstelle) wird den „ladungsfähigen“ Elektro-PKW zugeordnet. Entsprechend werden dem ICE, dem FCEV und

dem Hybridfahrzeug keine Ladeinstallationen zugeordnet. Eine Aufteilung der Infrastruktur nach (privater) Ladesäule und „öffentlicher“ E-Tankstelle wurde vom Projektteam vorgenommen auf Basis des Wissensstandes (z.B. Plattform Elektromobilität).

Katalysatoren werden allen ICE sowie Elektrofahrzeugen, die auch über einen Verbrennungsmotor verfügen, zugeordnet.

Tabelle 11 Verknüpfungsmatrix (VM) der Antriebstypen und Komponenten

Fahrzeugtyp nach Antrieb	E-Motor			Leistungselektronik		EV-Komponenten			
	kleiner E-Motor (PM)	großer E-Motor (PM)	großer E-Motor (FM)*	LE klein	LE groß	Batterie (klein)	Batterie (mittel)	Batterie (groß)	Batterie-kabel
Mild/Full-Hybrid	100%			100%		100%			100%
Plug-In-Hybrid	25%	75%		25%	75%		100%		100%
Range-Extender			200%	25%	75%		100%		200%
BEV			100%		100%			100%	100%
FCEV			100%		100%		100%		200%
ICE (Diesel/Benzin)									

*) gilt nur für das Substitutions-Szenario, in allen anderen Szenarien werden die Anteile auf den „großen E-Motor (PM)“ übertragen.

Tabelle Fortsetzung

Fahrzeugtyp nach Antrieb	FCEV-Komponenten	Verkabelung im Auto		Ladestation/säule		Weitere E-Anwendungen		Sonstiges	
		ICE	E-Fahrzeug	Einzelsäule	E-Tankstelle	ICE-spez: Li-Masch/Anlasser	nicht ICE-spez:	Katalysator	V-Motor
Mild/Full-Hybrid			100%			100%	100%	100%	100%
Plug-In-Hybrid			100%	60%	20%	100%	100%	100%	100%
Range-Extender			100%	60%	20%	80%	100%	100%	100%
BEV			100%	60%	40%		100%		
FCEV	100%		100%				100%		
ICE (Diesel/Benzin)		100%				100%	100%	100%	100%

7.2.4 Modellierung der Szenarien

Aus den möglichen Modellvariationen werden vier Szenarien ausgewählt um den möglichen Szenarienraum auszuleuchten, wie die folgende Abbildung zeigt:

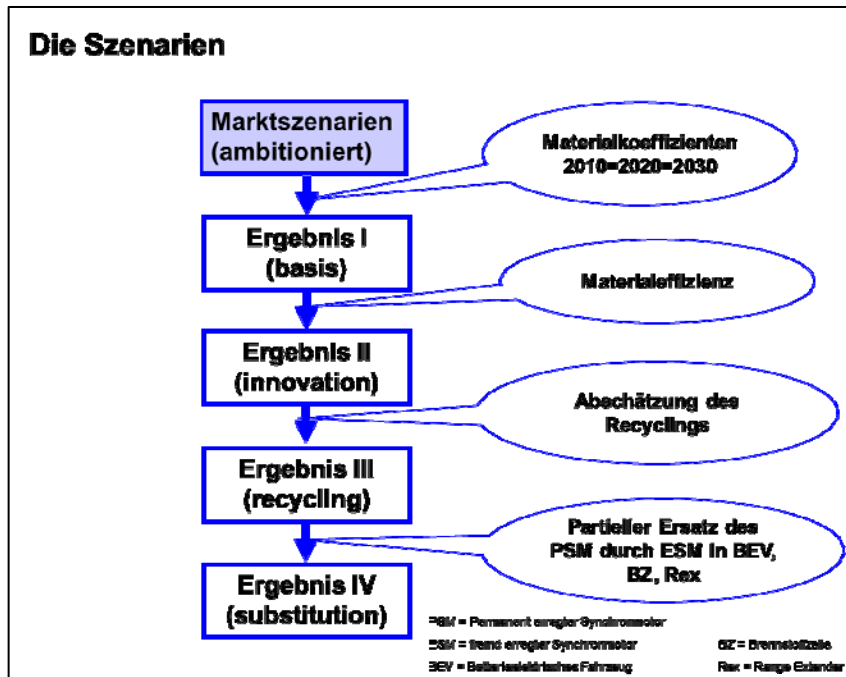


Abbildung 10 Ablaufschema der Szenarien

Die jeweiligen Veränderungen werden kumulativ, d.h. auf das vorhergehende Szenario angewendet. Zusätzlich werden als fünftes Szenario die kumulierten Änderungen mit den Antriebstypen des moderaten PKW-Zulassungsszenarios verknüpft. In der folgenden Tabelle wird der Aufbau der Szenarien nochmals detailliert:

Tabelle 12 Ablaufschema Modellierung

Szenarien	Antriebstypen		Komponente / Maßnahmen			
	Ambitioniert	Moderat	Basis/ Tabelle 7	Innovation Tabelle 8; Tabelle 9	Recycling	Substitution Tabelle 10
I - Basis	X		X			
II - Innovation	X			X		
III – Recycling	X			X	X	
IV - Substitution	X			X	X	X
V – Moderates		X		X	X	X

7.2.4.1 Basisszenario

Im Basisszenario werden die Antriebstypen des ambitionierten PKW Szenarios mit den Basis-Komponenten (siehe Tabelle 7) verknüpft.

7.2.4.2 Innovationsszenario

Im Innovationsszenario werden Effizienzsteigerungen unterstellt. In den konventionellen Anwendungen wie Verkabelung und „weitere Anwendungen“ wird eine mäßige Effizienzsteigerung von 5 % pro Dekade gesetzt. Für Komponenten, die speziell für die Elektrofahrzeuge eingesetzt werden, wird eine höhere Effizienzsteigerung unterstellt, da diese Komponenten teilweise noch in Entwicklung sind. Generell wird eine Effizienzsteigerung von 10 % gesetzt. Für die Seltenen Erden wird ein hoher Innovationsdruck erwartet. In der ersten Dekade von 2010 bis 2020 wird für Neodym, Praseodym und Terbium wie für die anderen Metalle eine Steigerung von 10 % unterstellt. In der zweiten Dekade von 2020 bis 2030 wird aber eine Verdoppelung angenommen, da für diese Metalle ein höherer Vermeidungsdruck angenommen werden kann. Für Dysprosium wird aufgrund der extrem hohen Preise und unsicherer Versorgungssituation eine Effizienzsteigerung von 15 % in der ersten Dekade und 30 % in der zweiten Dekade angenommen. Die abgeschätzten Effizienzsteigerungen für die Metalle sind für die Komponenten in der nachfolgenden Tabelle dokumentiert.

Tabelle 13 Effizienzsteigerung im Innovationsszenario (Anstieg pro Dekade)

	2020 (Anstieg 2010-2020)		2030 (Anstieg 2020-2030)		
	Metalle	Dys- prosium	Seltene Erden	Dys- prosium	Metalle
E-Motor	10%	15%	20%	30%	10%
Leistungselektronik	10%	n.a.	n.a.	n.a.	10%
EV Komponenten	10%	n.a.	n.a.	n.a.	10%
FCEV Komponenten*	10%	15%	20%	30%	10%
Verkabelung	5%	n.a.	n.a.	n.a.	5%
Lade-Infrastruktur	10%	n.a.	n.a.	n.a.	10%
Weit. Anwendung*	5%	n.a.	n.a.	n.a.	5%

* ohne Platin in Brennstoffzelle; ohne Platin und Palladium im Abgaskatalysator

7.2.4.3 Recyclingszenario

Das Recyclingszenario baut auf das Innovationsszenario auf. Das Ergebnis des Innovationsszenario wird um die aus dem Recycling zurückgewonnen Metalle reduziert: Die zurückgewonnene Menge (M_{recyc}) zum Stützzeitpunkt ($Z_{\text{stütz}}$) berechnet sich aus der PKW-Zulassung vor zehn Jahren P_{zu} ($Z_{\text{stütz}} - 10$ Jahre), den Komponenten (Komp) und der Recyclingquote (Rec-quote)

$$M_{\text{recyc}} \text{ (in kg)} = P_{\text{zu}} (Z_{\text{stütz}} - 10) \times \text{Komp} (Z_{\text{stütz}} - 10) \times \text{Rec-quote}$$

Beispielrechnung für das Jahr 2030, BEV, Dysprosium (Elektromotor):

214.800 kg recyceltes Dy aus BEV in 2030 =

1,5Mio. BEV-Zulassungen in 2020 x 0,179kg Dy im E-Motor in 2020 x 80% Rec-quote (2030)

Zur Berechnung der Recyclingmenge in 2010 wird für das Jahr 2000 von einer PKW Zulassung von 50,6 Mio [$P_{\text{zu}} (Z_{\text{stütz}} - 10 \text{ Jahre})$] ausgegangen.

Der gewählte Ansatz stellt eine notwendige Vereinfachung der möglichen realen Entwicklungen dar. Er erlaubt, die wesentlichen Eigenschaften des Recyclings und die Einflüsse des Recyclings auf das Gesamtergebnis abzubilden. In der folgenden Tabelle sind die geschätzten Recyclingquoten⁶ aufgeführt. Während für das Jahr 2010 qualifizierte Schätzwerte auf Basis des bekannten Standes des heutigen Recyclings (siehe z.B. [Graedel et al. 2011]) verfügbar sind, müssen die Recyclingquoten für das Jahr 2020 und 2030 unter Einschätzung der möglichen Fortschritte der Recyclingsysteme abgeschätzt werden. Dabei ist zu beachten, dass für Metalle aufgrund der vorliegenden Szenarien mit einem höheren Druck auf eine Ausschöpfung von Recyclingpotentialen gerechnet wird.

Tabelle 14 Weltweite Recyclingquoten für die prioritären Metalle im Automobilbau (Schätzung Projektteam auf Basis [Graedel et al. 2011])

	2010	2020	2030
Seltene Erden (Dy, Tb, Nd, Pr)	0%	60%	80%
Pt, Pd	55%	70%	80%
Ag, Au	2%	15%	40%
Cu	50%	75%	80%
Ga	0%	10%	25%
In, Ge	0%	5%	15%

⁶ Hiermit sind die sogenannten End-of-Life Recycling Rates (EoL-RR) gemeint [Graedel et al. 2011]. Diese beschreibt für Post-Consumer Materialien die Gesamtausbeute für die Metalle über alle Schritte des Recyclingsystems, d.h. Sammlung, Vorbehandlung, Raffination bis zum Sekundärmetall, das dem Markt wieder zur Verfügung steht.

7.2.4.4 Substitutionsszenario

Die weiter unten aufgeführten Szenarioergebnisse zeigen einen hohen Materialbedarf für Seltene Erden (SE) Metalle, die primär in Elektromotoren eingesetzt werden. Der Vorteil der SE liegt in den aus ihnen hergestellten Permanentmagneten (PM). Diese Permanentmagnete erlauben eine sehr kompakte Bauweise und bei einigen Anwendungen den Verzicht auf ein Getriebe. Es ist allerdings möglich, diese Magnete auf Basis der Seltenen Erden alternativ durch fremderregte Magnete (FM) zu ersetzen (siehe Tabelle 10). Nachteil dieser Motoren mit fremd erregten Magneten ist ihre größere Bauform und zusätzliches Gewicht. Daher wird die mögliche Substitution nur für einige Elektrofahrzeuge vorgeschlagen. Da eine integrierte Bauform (ICE, Getriebe) bei den mit fremderregten Magneten ausgestatteten Elektromotoren als weniger realisierbar erscheint, konzentriert sich die Substitutionsmöglichkeit auf den reinen Elektro-PKW (BEV), den Brennstoffzellen-PKW (FCEV) sowie den Range Extender (REX). Die Substitution wird nur für diese PKW und nur für die großen Elektromotoren angesetzt.

7.3 Ergebnisszenarien

In den Ergebnisszenarien werden die Bedarfe für die prioritären Metalle normiert aufgetragen. Als Normierung dient dabei die jährliche Primärproduktion der jeweiligen Metalle. „100 %“ auf der y-Achse bedeutet demnach die jährliche Primärproduktion im Jahr 2010. Die zur Normierung eingesetzten Werte sind in der folgenden Tabelle dokumentiert.

Tabelle 15 Primärproduktion der Metalle* im Jahr 2010 zur Normierung der Szenarioergebnisse

Metall	Neodym	Praseodym	Dysprosium	Terbium	Platin	Palladium
t/a	25.000	8.000	1.980	375	188	227
Quelle	FVA IZT 2011	FVA IZT 2011	BGR 2011	BGR 2011	Johnson Matthey 2011	Johnson Matthey 2011

Metall	Gold	Silber	Gallium	Germanium	Indium	Kupfer
t/a	2.500	22.200	106	120	574	16.200.000
Quelle	USGS 2011b	USGS 2011c	USGS 2011d	USGS 2011e	USGS 2011f	USGS 2011g

*Die Daten für die Seltenen Erden repräsentieren die Handelseinheit Seltenerd-Oxide

Die Verfügbarkeit ist bei einigen Metallen deutlich höher, da die Sekundärproduktion aus dem Recycling, z.B. bei Kupfer und den Platinmetallen, einen deutlichen Beitrag liefert.

7.3.1 Basisszenario

In der folgenden Abbildung ist das Ergebnis der Berechnung zum Basisszenario graphisch dargestellt. Das Basisszenario berechnet sich aus den PKW-Neuzulassungen des ambitionierten Marktdurchdringungsszenarios sowie dem Materialinput des Basisszenarios.

Da der Materialbedarf für konventionelle PKW (=ICE) nicht mitbilanziert wird, ist in 2010 der Materialbedarf vernachlässigbar. In 2020 ist ein steigender Bedarf für die Seltenen Erden Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium, Platin, Gallium und Kupfer deutlich sichtbar. In 2030 wird der Mehrbedarf der Elektromobilität noch deutlich erhöht.

Für Palladium, Gold, Silber, Germanium und Indium ist ein Mehrbedarf kalkulierbar, der jedoch einen Anteil von weniger als zwei Prozent der Primärproduktion in Anspruch nimmt. Für Kupfer macht sich ein deutlicher Mehrbedarf von ca. 1,6 Mio. t/a, also ca. 10 % der Primärproduktion in 2030 bemerkbar. Der Grund hierfür ist die Verwendung als Leitungsmaterial allgemein sowie in Elektromotoren.

Auch der Bedarf an Platin steigt signifikant an. In 2030 wird ein Bedarf von ca. 42 t/a oder 23 % der Primärproduktion bilanziert. Der Bedarf resultiert hauptsächlich aus dem Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV).

Der Bedarf der Seltenen Erden sowie von Gallium ist, gemessen an der Primärproduktion, nochmal deutlich höher. Die Seltenen Erden werden nahezu ausschließlich für die Antriebsmotoren sowie teilweise für Hilfsmotoren eingesetzt. Da in der Elektromobilität sehr hohe Ansprüche an die Leistungen auch bei erhöhten Temperaturen bestehen, sind in diesen Motoren hohe Anteile an Dysprosium (und je nach Hersteller auch hohe Anteile an Terbium) enthalten. Durch den Einsatz dieser neuen Anwendung wird der Bedarf an Dysprosium in 2030 auf ca. 482 % der Primärproduktion 2010 und für Terbium auf 255 % der Primärproduktion 2010 geschätzt.

Gallium wird in einem hohen Maße in der Leistungselektronik, in geringerem Maße auch in Elektromotoren eingesetzt, so dass auch für dieses Metall ein Bedarf in 2030 von ca. 144 % der Primärproduktion in 2010 berechnet wird.

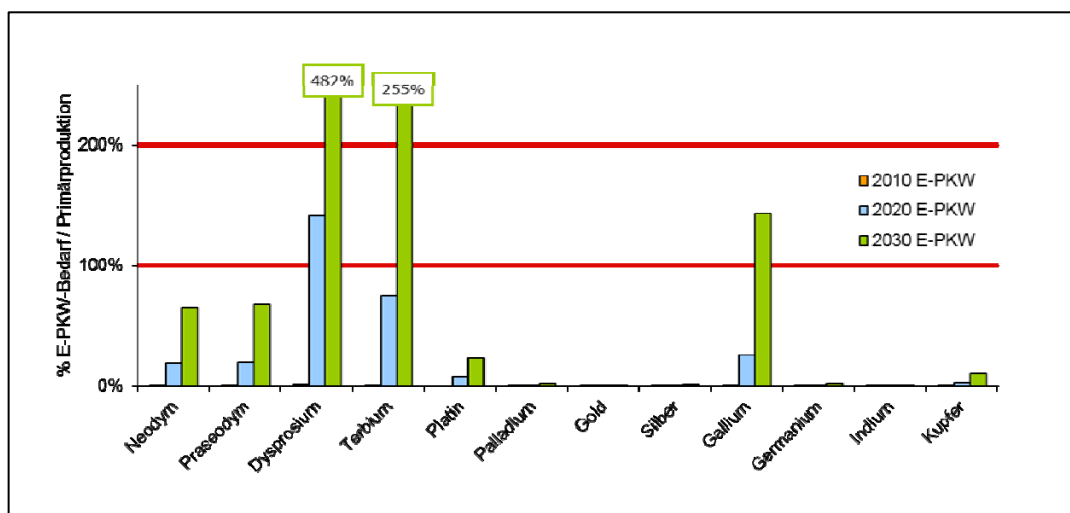


Abbildung 11 Basisszenario: ambitionierte Marktdurchdringung; Materialkoeffizienten 2010 = 2020 = 2030 (außer bei Platin)

Das Basisszenario macht deutlich, dass insbesondere der Bedarf an Seltenen Erden in einem ambitionierten Szenario außergewöhnlich hoch ist. Gegenüber Kupfer und Platin setzt die Automobilindustrie diese Metalle heute nicht in nennenswertem Maße ein. Insbesondere der

Bedarf an Dysprosium muss kritisch diskutiert werden, da die Primärförderung nahezu ausschließlich aus China stammt.

Basisszenario inklusive konventioneller Komponenten

Erweitert man die Komponenten um die konventionellen Bauteile (Katalysator, Verkabelung etc. siehe Kapitel 7.2.2) so berechnen sich höhere Materialbedarfe insbesondere für Platin und Palladium sowie Kupfer. In der folgenden Abbildung sind diese konventionellen Bedarfe schraffiert dargestellt. Es ist zu beachten, dass der Anstieg z.B. beim Palladium ausschließlich in dem Anstieg der weltweiten PKW Neuzulassung begründet ist. Auch ohne den besonderen Bedarf aus der Einführung der Elektromobilität bedingt die ansteigende weltweite Produktion einen zusätzlichen Bedarf von prioritären Metallen für konventionelle Komponenten. Die in unseren Szenarien ohne konventionellen Bedarf skizzierten Bedarfe der Elektromobilität sind zusätzliche Metallbedarfe.

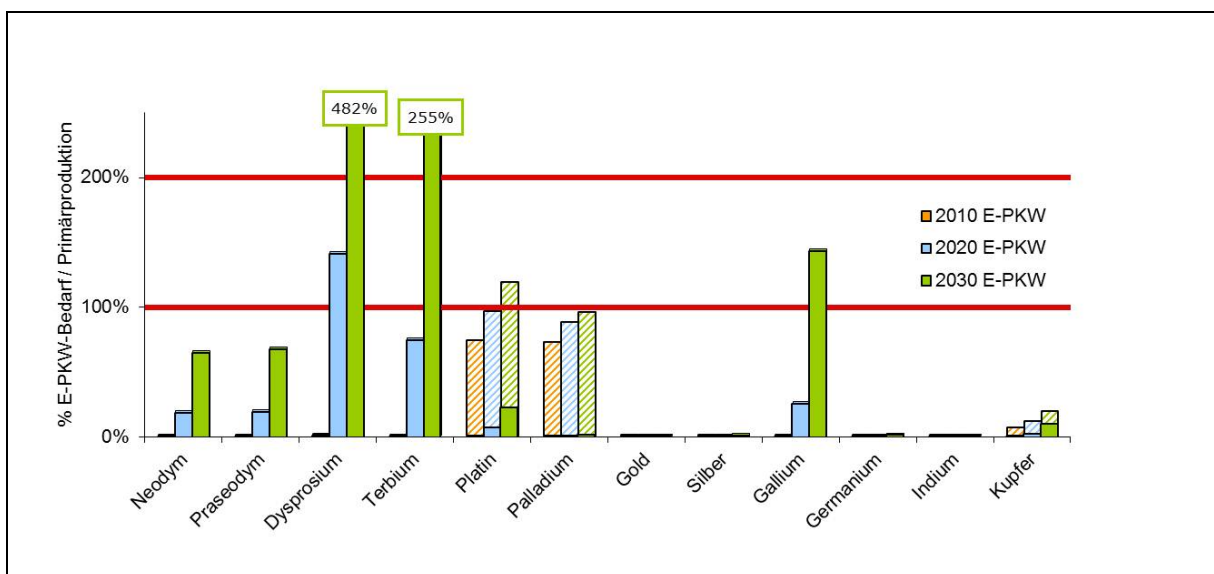


Abbildung 12 Basisszenario inklusive konventionelle Bauteile im ICE (schraffiert dargestellt): ambitionierte Marktdurchdringung; Materialkoeffizienten 2010 = 2020 = 2030 (außer bei Platin)

Im Gegensatz zur Abbildung 11 sind in der obigen Graphik die Metallbedarfe der konventionellen Bauteile schraffiert zusätzlich dargestellt. Die Einbeziehung der konventionellen Bauteile wirken sich auf die Metalle Platin und Palladium (Katalysator) und Kupfer (Verkabelung) aus.

7.3.2 Innovationsszenario

In der Weiterentwicklung des Basisszenarios werden im Innovationsszenario die Materialkoeffizienten verändert. Als Grund hierfür dient die Annahme, dass bei den Komponenten durch laufende F&E-Maßnahmen, angetrieben durch die Ziele Gewichts-, Kosten- und Volumeneinsparung, der Materialbedarf pro Einheit sinkt, also die Materialeffizienz steigt. Die

Effizienzsteigerung wird daher bei neuen Komponenten (Elektromotor) als deutlich höher gegenüber schon bisher gebräuchlichen Komponenten (Kupferleitungen) eingeschätzt. Die Veränderung der Materialbedarfe sind in Kapitel 7.2.4.2 dokumentiert.

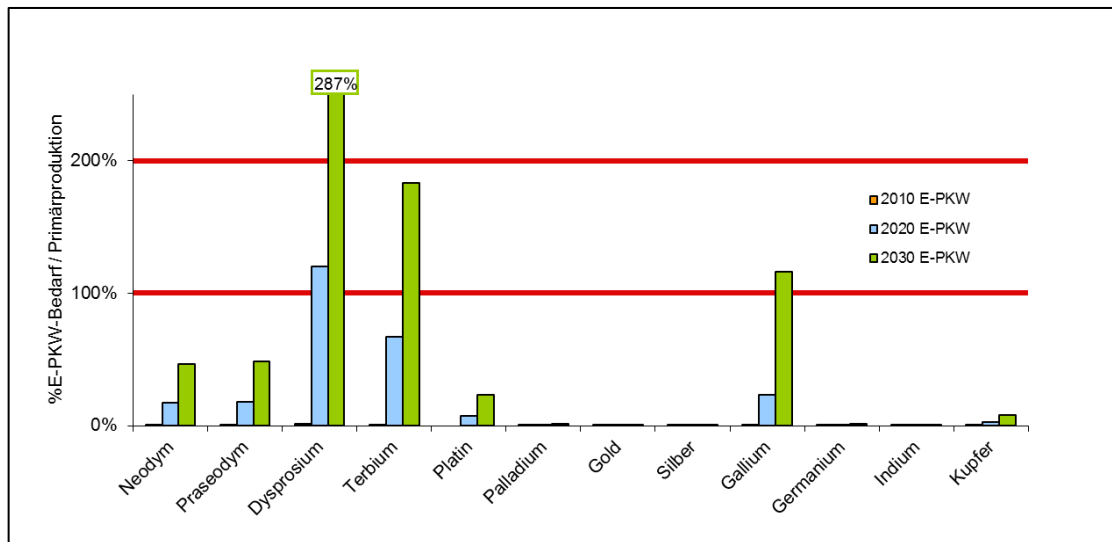


Abbildung 13 Innovationsszenario: ambitionierte Marktdurchdringung abzüglich Innovationspotentiale/Materialeffizienz

In der Abbildung für das Innovationsszenario wird der Effekt illustriert. Die Materialbedarfe für die Seltenen Erden sinken deutlich. In 2030 reduziert sich der Bedarf an Neodym und Praseodym um ca. 28 % gegenüber dem Basisszenario. Für Dysprosium wird eine Abnahme von mehr als 40 % geschätzt.

Trotz dieser Effizienzmaßnahmen bleibt der Bedarf in Relation zu der heutigen Primärförderung für Neodym und Praseodym hoch, und für Terbium und Dysprosium extrem hoch.

7.3.3 Recyclingszenario

Eine Möglichkeit den Primärbedarf der Elektromobilität zu dämpfen ist das Recycling der Metalle. Die Annahmen hierzu sind in Kapitel 7.2.4.3 diskutiert und dargestellt. In der folgenden Abbildung sind die Recyclingmaßnahmen als zusätzliche Maßnahme auf das Innovationsszenario aufgesetzt. Die über das Recycling zurückgewonnenen Metalle werden hierzu direkt mit dem Metallbedarf verrechnet.

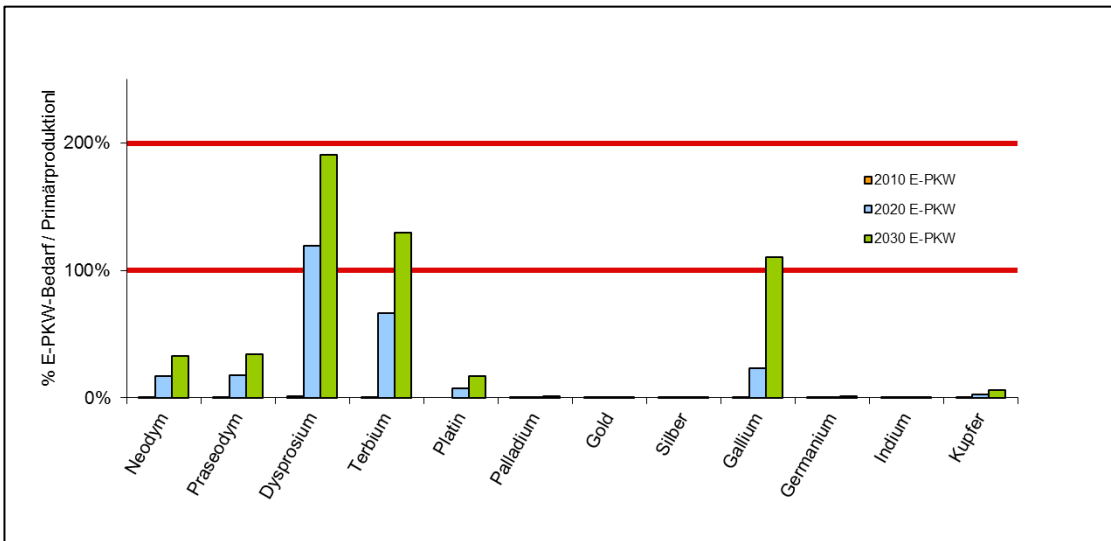


Abbildung 14 Recyclingszenario: ambitionierte Marktdurchdringung abzüglich Innovationspotentiale abzüglich Recycling

Die Maßnahme zeigt eine weitergehende Reduktion der Bedarfe. Die Reduktion ist jedoch nicht so signifikant wie es die angenommenen Recyclingquoten erwarten lassen. Da sich die erzielbaren Recyclingmetalle durch den PKW-Einsatz der Metalle 10 Jahre vorher berechnen, ist die Rückgewinnung von für die Automobilindustrie bisher untypischen Metallen gering. Gemessen am Bedarf 2030 reduziert sich der Bedarf durch Recycling am deutlichsten für Kupfer und Platin aus konventionellen PKW, die allerdings in diesem Szenario nicht einbezogen wird.

Aufgrund der zugrunde gelegten hohen Wachstumsdynamik der Elektromobilität und der hier angesetzten Lebensdauer der PKW von 10 Jahren, kann das Recycling bei hohen Recyclingquoten zwar einen sehr deutlichen Beitrag zur Reduktion der Netto-Bedarfe liefern, jedoch kommt der volle Beitrag erst mit Zeitverzögerung zum Tragen. Während der „Einführungsphase“ müssen die Metalle zu einem sehr großen Anteil aus der Primärproduktion oder anderen Quellen gedeckt werden.

7.3.4 Substitutionsszenario

Der Elektromotor ist durch seinen hohen Bedarf an Seltenen Erden als die Komponente identifiziert worden, welche, gemessen an der Primärproduktion, einen besonders hohen Bedarf aufweist. Die Bauweise des Elektromotors mit einem permanent erregten Magneten ist relativ neu und es gibt andere Bauweisen, die ohne Permanentmagnete auskommen. Wie in Kapitel 7.2.4.4 diskutiert, kann ein Ersatz der Seltenen Erden insbesondere für die Elektro-PKW FCEV, BEV und REX durchgeführt werden. Das Ergebnis für dieses Substitutionsszenario wird in der folgenden Abbildung dargestellt. In diesem Szenario wird die Substitutionsmaßnahme zusätzlich zu dem Recyclingszenario berechnet.

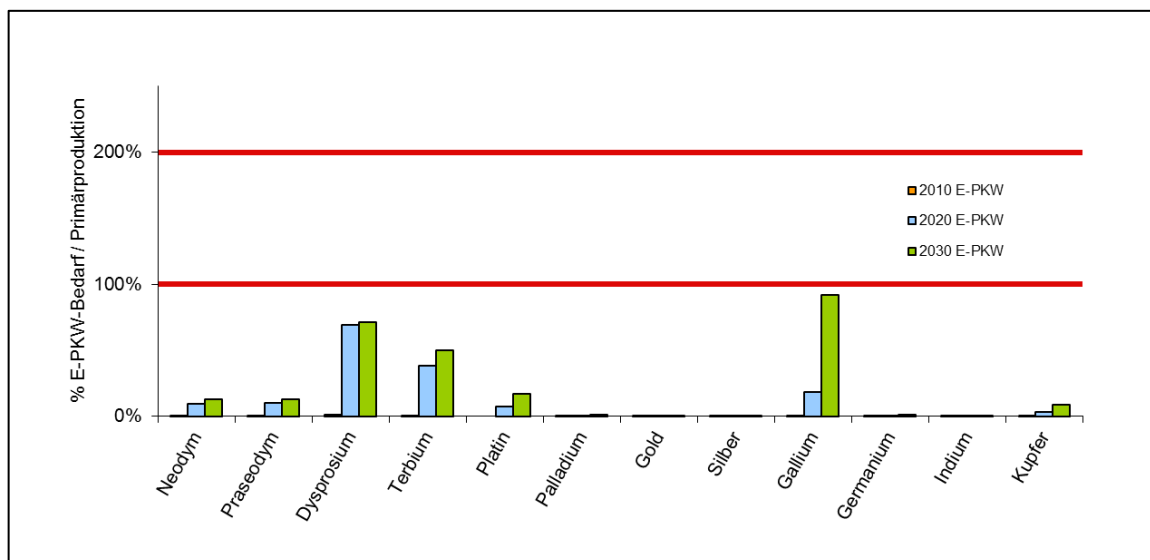


Abbildung 15 Substitutionsszenario: ambitionierte Marktdurchdringung, abzüglich Innovationspotentiale, abzüglich Recycling, abzüglich Substitution eines Teiles der E-Motoren durch fremderregte Motoren (für BEV, REX und FCEV)

Die Bedarfe, insbesondere an den Seltenen Erden, reduzieren sich für das Jahr 2030 deutlich und zwar für Neodym und Praseodym auf 13 % und für Dysprosium auf 71 % der heutigen Primärproduktion. Die Bedarfe können also durch diese Maßnahme um mehr als 60 % reduziert werden.

Auffällig ist, dass die Metallbedarfe an Seltenen Erden vom Jahr 2020 auf das Jahr 2030 nur noch geringfügig ansteigen. Zum einen beträgt das Wachstum von Hybrid-PKW (mild bzw. plug-in), das Haupteinsatzgebiet der Seltenen Erden, in dieser Dekade nur noch 17-Prozentpunkte (pz-Punkte) von 21-pz-Punkte in 2020 auf 38pz-Punkte in 2030. Der Anstieg ist also 80 %. Zugleich wird für diese Dekade ein deutlicher Anstieg der Effizienz angenommen bei gleichzeitigem Einsetzen des Recyclingrückflusses (Reduktion des Bedarfes an Neodym von 21 % auf 13 % der Primärförderung). Zum anderen findet eine Steigerung der FCEV-, BEV- und REX-PKW von 5pz-Punkte auf 22-pz-Punkte statt. Da für diese drei E-PKW-Typen allerdings die Seltenen Erden in den Elektromotoren substituiert werden, resultiert das PKW Wachstum in diesem Szenario nicht in einem Anstieg des Bedarfes an Seltenen Erden.

7.3.5 Moderates Szenario

Die bisherigen Szenarien sind auf Basis einer ambitionierten Marktdurchdringung bei den PKW Neuzulassungen berechnet worden. Um die Alternative einer abgeschwächten Marktdurchdringung der Elektromobilität aufzuzeigen, wird in diesem Szenario das ambitionierte Szenario durch das moderate Szenario ersetzt. Die Details der Szenarien sind im Kapitel 4.2 und im Kapitel 7.2.1 diskutiert. Das in diesem Kapitel vorgestellte Szenario arbeitet mit den reduzierten Marktdurchdringungszahlen des moderaten Szenarios, setzt aber auf den Komponenten des Substitutionsszenarios auf, d.h. inklusive Materialeffizienz, Recycling und Substitution.

Die Ergebnisse dieses Szenarios ähneln denjenigen des Substitutionsszenarios. Die Bedarfe liegen für das Jahr 2030 in der gleichen Größenordnung. So wird für Neodym der Bedarf im Substitutionsszenario mit 13 % und im Moderaten Szenario mit 12 % kalkuliert. Als Grund hierfür sei zum einen der geringe Anstieg der SE-Verbraucher der Hybrid-PKW (von 29 % auf 38 %) genannt, zum anderen wird ein geringerer Recyclingrückfluss bilanziert.

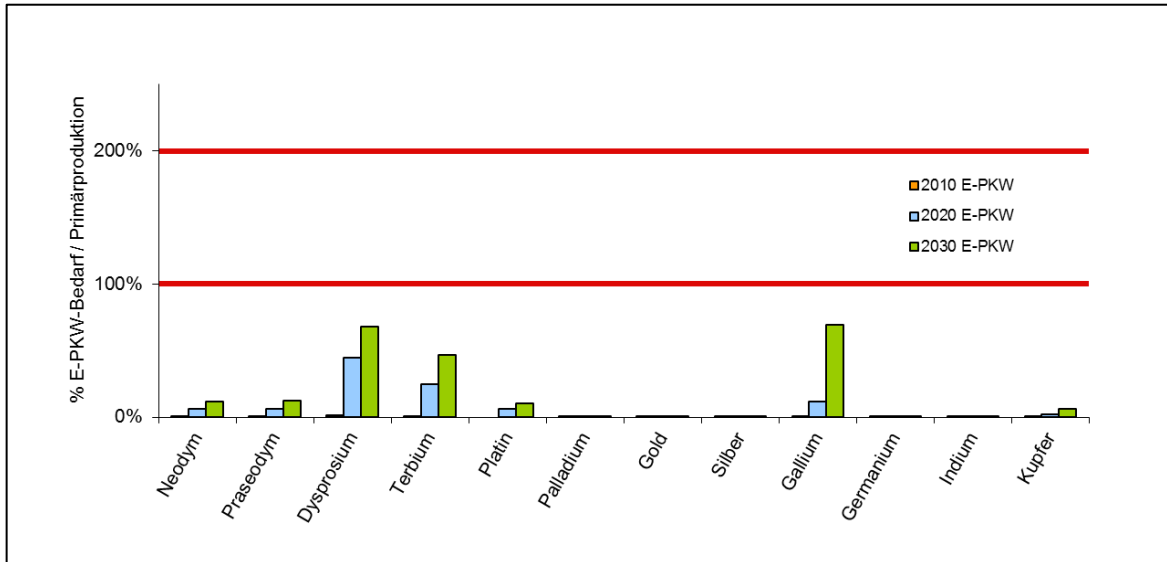


Abbildung 16 Moderates-Szenario: moderate Marktdurchdringung, abzüglich Innovationspotentiale, abzüglich Recycling, abzüglich Substitution

Eine signifikantere Reduktion kann bei Gallium beobachtet werden. Für dieses Metall ist der Bedarf an die Gesamtzahl der Neuzulassungen von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang gekoppelt, deren Anteil von 60 % auf 42 % sinkt. Eine vergleichbare Reduktion findet mit ähnlichen Gründen bei Kupfer statt. Der Bedarf sinkt von 9 % auf 6 % der Primärproduktion.

Weiterhin reduziert sich der Platinbedarf, der nahezu ausschließlich in der Abnahme der Brennstoffzellenfahrzeuge (von 5 % auf 3 %) begründet ist.

8 Umweltauswirkungen der Primärförderung, Reserven sowie Reichweiten der prioritären Metalle

In diesem Abschnitt soll für die 12 prioritären Elemente ein Überblick auf die jeweilige Situation ihrer Reserven und Reichweiten, ihrer Charakteristika hinsichtlich ihrer Rohstoffvorkommen sowie der Umweltauswirkungen ihrer Primärförderung und -produktion gegeben werden. Die Umweltparameter werden auf Basis der Datenbank Ecoinvent V2.2 (2010) erarbeitet. Im Rahmen dieser Studie wird keine Ökobilanz erarbeitet sondern auf bestehende Umwelt-Daten zurückgegriffen. In die Betrachtung der Umweltwirkung geht ausschließlich die Primärproduktion der 12 prioritären Elemente ein.

In diesem Kapitel werden zunächst zentrale Begriffe definiert. Anschließend werden die untersuchten Umweltparameter anhand der prioritären Elemente dargestellt. Schließlich

werden die spezifischen Umweltwirkungen der Primärgewinnung sowie die Reserven und Reichweiten der Metalle 1. Priorität aufgeführt.

8.1 Definition Statische Reichweite, Major Metals und Minor Metals

Die im nachfolgenden verwendete statische Reichweite besagt, wie lange eine Reserve unter den derzeitigen Primärproduktionsmengen zur Verfügung stehen würde. Eine Reserve ist hierbei eine nachgewiesene und genau bestimmte Lagerstätte, die unter den momentanen Bedingungen wirtschaftlich abgebaut werden könnte [USGSAppc 2011]. Somit wird ersichtlich, dass diese Kennziffer nur eine grobe Einschätzung zur Reichweite eines Materials geben kann, da sie Preisentwicklungen und sich verändernde Verbräuche nicht abbilden kann. Trotzdem ist die statische Reichweite ein anerkannter Indikator für die Knappheit eines Rohstoffes, da er auf schnelle und verhältnismäßig einfache Weise erste Indizien zu Knappheiten von Rohstoffen bieten kann.

Die primärseitig gewonnenen Metalle kann man je nach Gewinnungsart in zwei Gruppen aufteilen: Major Metals und Minor Metals.

Bei Major Metals handelt es sich um Metalle, die Bergbautätigkeiten auslösen und auch das Hauptprodukt jener Minentätigkeit sind. Sie werden zumeist in großen Mengen gewonnen und bilden auch den Haupterlösträger jener Unternehmung. Durch die großen Mengen und die zumeist langjährigen Erfahrungen bei der Gewinnung und Aufbereitung jener Erze, werden in der Regel speziell angepasste Verfahren in der ganzen Produktionskette angewendet.

Bei Minor Metals handelt es sich um Metalle, die als Begleiter zum Major Metal bei Bergbautätigkeiten gewonnen werden und somit Nebenprodukte bei der Minentätigkeit, bzw. den nachfolgenden Aufbereitungsprozessen sind. Häufig sind die Metalle nur in sehr geringen Konzentrationen im abgebauten Erz vorhanden und benötigen daher höheren Aufwand bei der Gewinnung, können jedoch u.U. entscheidende Anteile zur Rentabilität der Förderung beitragen. Minor Metals stehen damit in direkter Abhängigkeit zur Primärgewinnung eines oder mehrerer Major Metals. Bei der Betrachtung ist zu beachten, dass einzelne Metalle je nach Lagerstätte und Vorkommen sowohl als Major Metal als auch als Minor Metal angesehen werden können [USGSAppc 2011].

8.2 Parameter der Umweltauswirkungen

In die Analyse der Umweltauswirkungen der prioritären Elemente gehen die Parameter GWP (Global Warming Potential, Klimawandel), Überdüngungspotential, Photochemische Oxidation, Versauerungspotential, KEA (kumulierter Energieaufwand) und der ADP (abiotic depletion potential) der Primärgewinnung der jeweiligen Elemente ein. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Umweltparameter für die 12 prioritären Elemente vorgestellt. Dabei werden die Seltenen Erden aufgrund fehlenden Datenmaterials in Summe dargestellt. Auf

Basis der Ecoinvent-Daten für Seltene-Erden-Oxid wird mit einer eigenen technischen Abschätzung Seltene-Erden-Metall berechnet und fließt in die weiteren Untersuchungen ein.

Der Parameter **Klimawandel**, oder auch GWP (Global Warming Potential) genannt, wird in kg CO₂-Äquivalenten je gefördertes Kilogramm Primärmetall abgebildet. Die Edelmetalle Gold, Platin und Palladium weisen den höchsten GWP mit jeweils über 10.000 kg CO₂-Äquivalenten aus. Gallium, Germanium, Indium und Silber liegen bei 130 bis 210 kg CO₂-Äquivalenten je kg Primärmetall. Während die Primärgewinnung der Seltenen-Erden-Metalle 21 kg CO₂-Äquivalente verursacht, zeigt sich Kupfer mit der geringsten Umweltbelastung je gefördertes kg Primärmetall in diesem Parameter (siehe Abbildung 17).

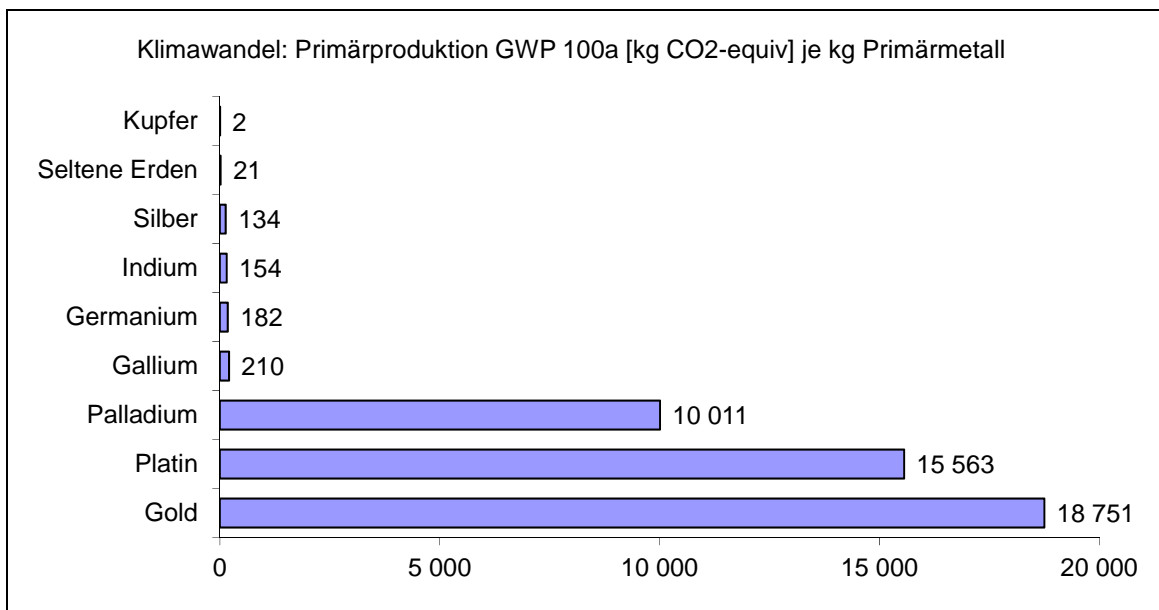


Abbildung 17 Umweltauswirkung nach GWP der 12 prioritären Elemente (eigene Berechnungen nach Daten aus Ecoinvent 2010)

Das **Überdüngungspotential** wird in kg PO₄-Äquivalenten je gefördertes Kilogramm Primärmetall angegeben. Hier weisen Seltene-Erden-Metalle sowie die Metalle Kupfer, Gallium, Germanium und Indium ein Überdüngungspotential von unter einem Kilogramm PO₄-Äquivalenten je gefördertes Kilogramm Primärmetall auf. Gold besitzt mit 1.089 Kilogramm PO₄-Äquivalenten je gefördertes Kilogramm Primärmetall das mit Abstand höchste Überdüngungspotential (siehe Abbildung 18).

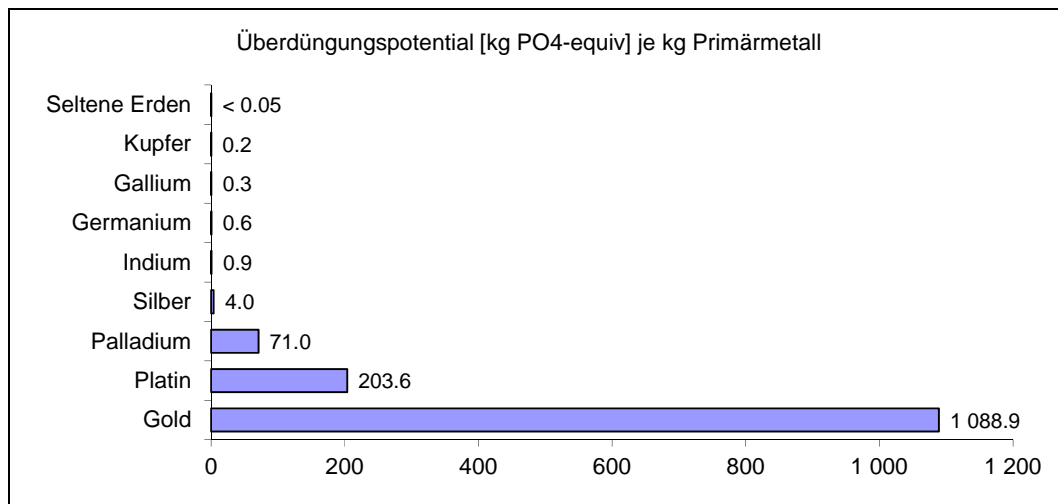


Abbildung 18 Umweltauswirkung nach Überdüngungspotential der 12 prioritären Elemente (eigene Berechnungen nach Daten aus Ecoinvent 2010)

Die Darstellung der **Photochemischen Oxidation** erfolgt in Kilogramm Ethylen-Äquivalenten je gefördertes Kilogramm Primärmetall. Während Seltene-Erden-Metalle, Kupfer und Gallium mit <0,05 kg Ethylen-Äquivalenten und auch Germanium, Indium und Silber mit 0,1 kg Ethylen-Äquivalenten sehr geringe Werte aufweisen, liegen die Platingruppenmetalle Platin und Palladium zwischen 140 und 292 kg Ethylen-Äquivalenten je gefördertes kg Primärmetall (siehe Abbildung 19).

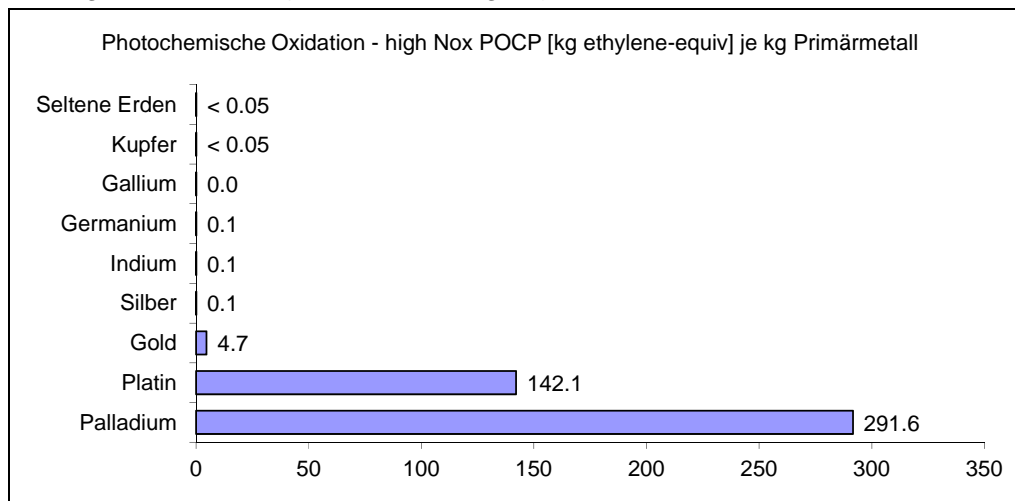


Abbildung 19 Umweltauswirkung nach Photochemischer Oxidation der 12 prioritären Elemente (eigene Berechnungen nach Daten aus Ecoinvent 2010)

Das **Versauerungspotential** wird in Kilogramm SO₂-Äquivalente je gefördertes Kilogramm Primärmetall ausgewiesen. Auch bei diesem Umweltparameter liegen die Platingruppenmetalle Platin und Palladium auf einem sehr hohen Niveau (2.970 – 6.080 kg SO₂-Äquivalente je gefördertes kg Primärmetall). Die Seltene-Erden-Metalle, Kupfer und Gallium liegen bei unter einem Kilogramm SO₂-Äquivalente und Germanium und Indium zwischen

einem und zwei Kilogramm SO₂-Äquivalente je gefördertes Kilogramm Primärmetall (siehe Abbildung 20).

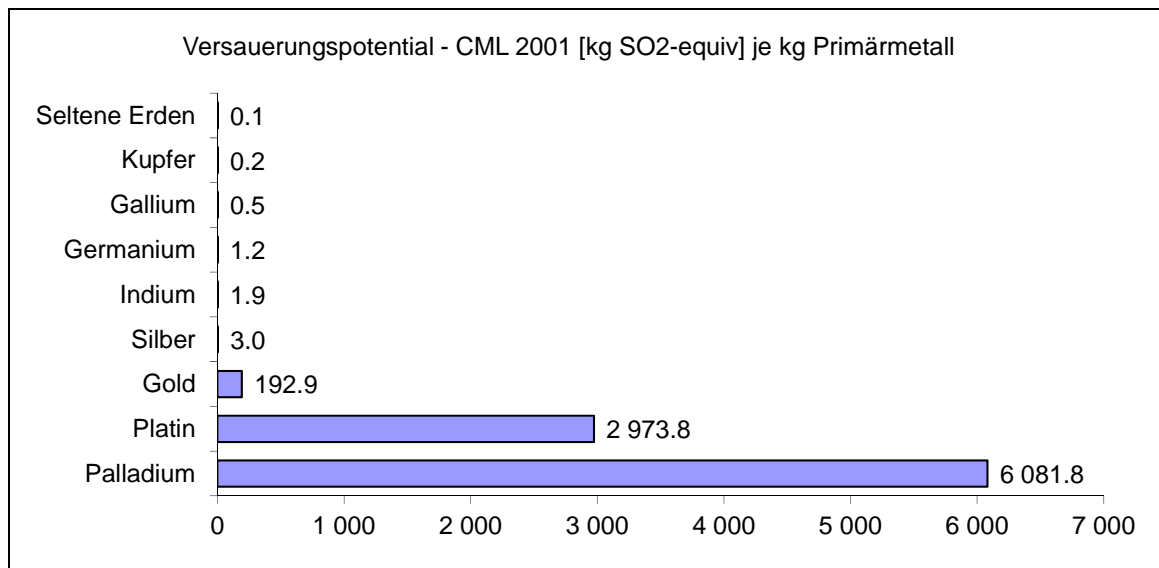


Abbildung 20 Umweltauswirkung nach Versauerungspotential der 12 prioritären Elemente (eigene Berechnungen nach Daten aus Ecoinvent 2010)

Der **KEA** (kumulierte Energieaufwand) setzt sich zusammen aus dem Energiewand für erneuerbare (Biomasse, Wasser, Wind, Sonne) und nicht erneuerbare (Fossil, Nuklear, Primärwald) Energieressourcen. Angegeben wird dieser Parameter in MJ-Äquivalenten je gefördertes Kilogramm Primärmetall. Während Kupfer und die Seltene-Erden-Metalle einen KEA von unter 400 aufweisen, liegen die Platingruppenmetalle Palladium und Platin sowie Gold zwischen 187.000 und 314.000 MJ-Äquivalenten (siehe Abbildung 21).

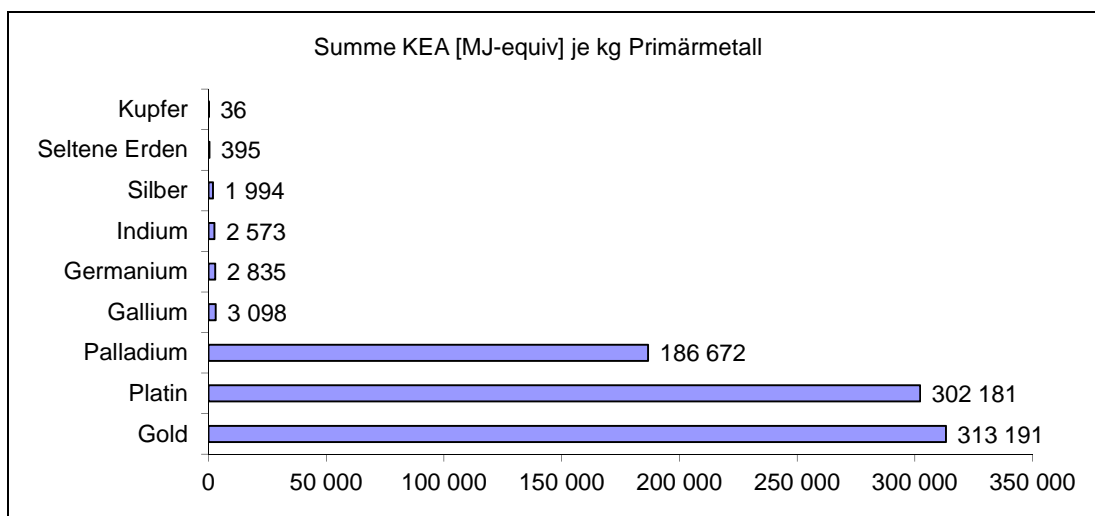


Abbildung 21 Umweltauswirkung nach KEA der 12 prioritären Elemente (eigene Berechnungen nach Daten aus Ecoinvent 2010)

Der Parameter **ADP** (abiotic depletion potential = Abiotischer / elementarer Ressourcenverbrauch) auf Basis der reserve base wird in Kilogramm Antimon (Sb)-Äquivalenten je geförderttes Kilogramm Primärmetall dargestellt. Dieser Parameter stellt die Reduktion des globalen Bestandes an Rohstoffen dar, der aus der Entnahme nicht erneuerbaren Ressourcen resultiert.

Kupfer und Indium weisen einen geringen ADP auf mit 0,0037 bzw. 1,08 kg Sb-Äquivalenten je geförderttes Kilogramm Primärmetall. Gold liegt mit 40,4 kg Sb-Äquivalenten vergleichsweise hoch (siehe Abbildung 22).

Aufgrund von fehlendem Datenmaterial sind keine Daten vorhanden für Gallium, Germanium und die Seltenen Erden.

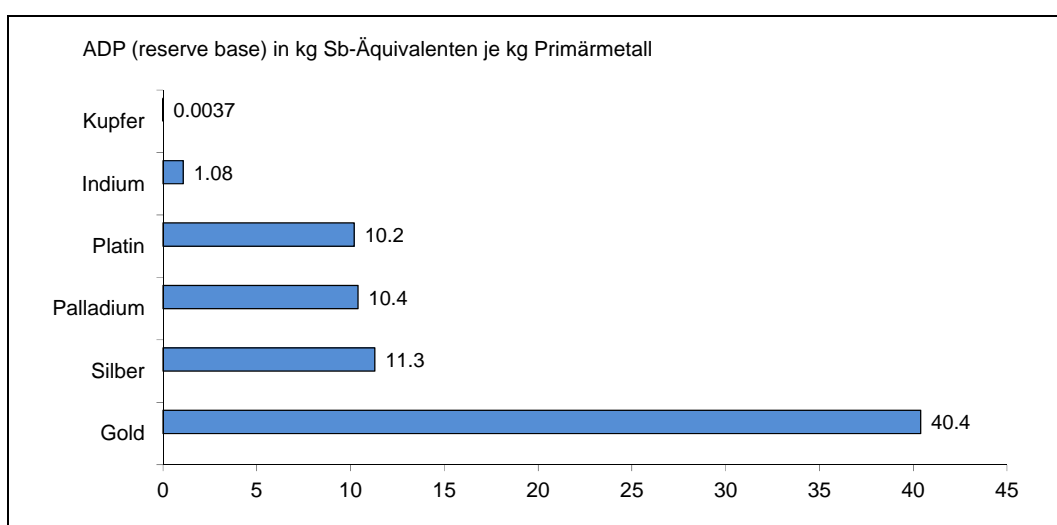


Abbildung 22 Umweltauswirkungen nach ADP (Datensatz nach Ecoinvent V2.01, Charakterisierungsfaktoren nach van Oers et al. 2002)

Die CO₂-Belastung bezogen auf die Rohstoffbedarfe für Elektromobilität in dem Basis-szenario für 2020 und 2030 ist in Abbildung 23 dargestellt. Die aktuellen GWP-Werte werden für die Jahre 2020 und 2030 unverändert fortgeschrieben, da eine Abschätzung von Änderungen dieser Werte mit sehr hohen Unsicherheiten⁷ belastet wäre.

Dargestellt wird zum einen die reine Belastung durch die originären Komponenten der Elektromobilität (ohne konventionelle Technologien wie Katalysator oder Standardverkabelung) in vollen Farben. Zum anderen zeigen die schraffierten Balken die CO₂-Belastung der Primärproduktion des jeweiligen Rohstoffbedarfs für die Komponenten Anlasser, Lichtmaschine, Katalysator im konventionell betriebenen Antrieb sowie für die konventionellen Komponenten im Elektrofahrzeug (Katalysator für den Hybridantrieb, Standardverkabelung, Bremsen).

⁷ Der GWP könnte sinken, da die Technologien effizienter werden oder aber steigen, da die Vorkommen aufgrund der vorangeschrittenen Ausbeute erzarter und damit die Primärgewinnung aufwendiger wird.

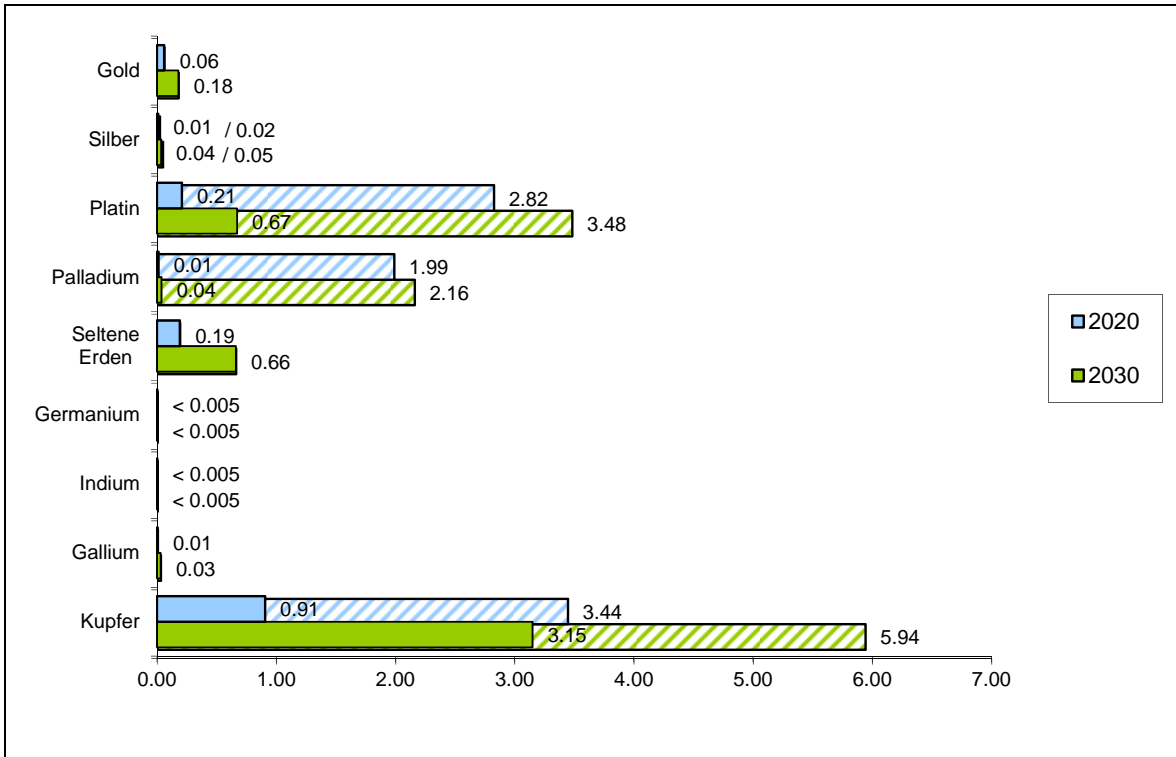


Abbildung 23 CO₂-Belastung (in Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten) der zusätzlichen Rohstoffe im Elektrofahrzeuge im Basis-Szenario 2020 und 2030 (eigene Berechnungen nach Szenarien und Ecoinvent-Daten)

Bei der Interpretation der Daten ist zu beachten, dass in dieser Darstellung die Batterien nicht betrachtet und einbezogen werden.

Kupfer besitzt mit 0,9 (bzw. 3,4) Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten in 2020 und 3,15 (bzw. 5,9) Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten in 2030 den absolut größten Umwelteinfluss. Trotz des geringsten GWP je gefördert Kilogramm Primärmetall bei Kupfer (siehe Abbildung 17) liegt die CO₂-Belastung am höchsten durch den sehr hohen zusätzlichen Materialbedarf bei den Komponenten Elektro-Motor, Leistungselektronik, Verkabelung, Brennstoffzellen-Systemmodul und Ladestation.

Neben Kupfer verursachen die Bedarfe an Seltenen Erden Metallen einen Beitrag zu der CO₂-Belastung mit 0,19 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten in 2020 und 0,66 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten in 2030 durch den Einsatz im Elektromotor.

Am Beispiel der Metalle Kupfer und Seltene Erden Metalle wird in folgender Abbildung die CO₂-Belastung der einzelnen Szenarien dargestellt.

In Abbildung 24 werden die CO₂-Äquivalent-Belastungen der Primärgewinnung mit den Metallbedarfen der einzelnen Szenarien verknüpft.

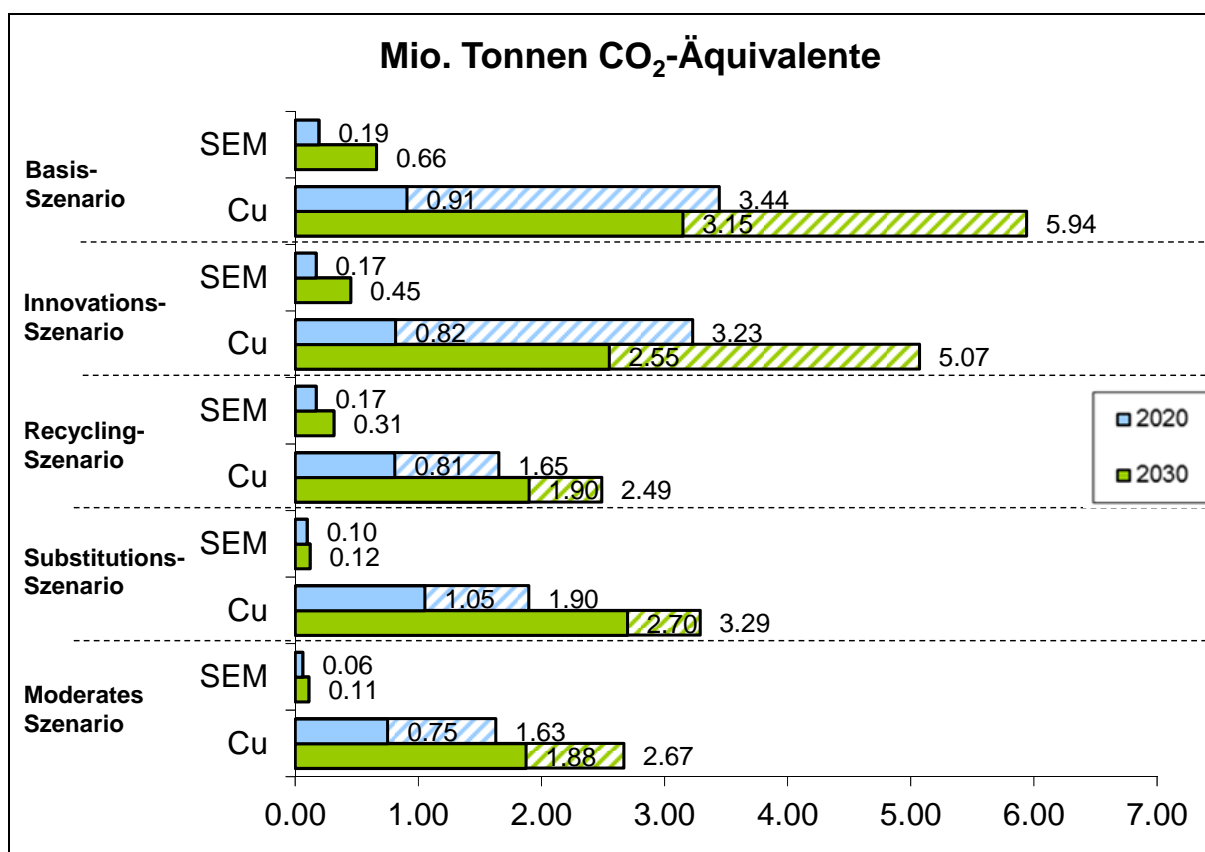


Abbildung 24 CO₂-Belastung (in Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten) des zusätzlichen Rohstoffbedarfs im Elektrofahrzeuge in allen Szenarien für 2020 und 2030 (eigene Berechnungen nach Szenarien und Ecoinvent-Daten)

Die Angaben der CO₂-Belastung der Primärgewinnung des benötigten Bedarfs im Basis-Szenarios entspricht den Angaben für die Seltenen Erden Metalle und Kupfer aus der vorangegangenen Abbildung 23. Das Innovations-Szenario weist eine reduzierte Umweltbelastung auf, die sich aus einem niedrigerem Materialbedarf durch technologische Innovationen und Materialeffizienz in allen Komponenten ergibt. Der verringerte Bedarf an Primärmetall durch die Nutzung von Sekundärmaterial aus dem Recycling reduziert zusätzlich den Primärmetallbedarf im Recycling-Szenario⁸. Im Substitutions-Szenario sinken die Materialbedarfe von den Seltenen Erden Metallen durch die weitere Szenario-Annahme der Substitution von Elektromotoren für batterieelektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellen-Fahrzeuge und Range Extender durch neue Motoren-Technologien. Dies betrifft ca. 33% der gesamten Elektrofahrzeuge in 2030. Diese Innovation der Motoren-Technologie geht jedoch einher mit einem erhöhten Kupferbedarf.

Die Darstellung des moderaten Szenarios beinhaltet die Annahmen der Innovation, des Recyclings und der Substitution und bezieht sich auf eine moderatere Durchdringung der

⁸ Als globale Recyclingquoten für das System Automobil wurden für Kupfer 75% für 2020 und 80% für 2030 unterstellt. Für die Seltenen Erden wurden globale Recyclingquoten aus dem System Automobil 60% in 2020 und 80% in 2030 angenommen.

Elektromobilität auf dem globalen Markt (siehe Kapitel 4). Das geringere Aufkommen an Elektrofahrzeugen führt zu einem niedrigeren Metallbedarf was eine reduzierte Belastung an CO₂-Äquivalenten zur Folge hat.

8.3 Umweltauswirkungen der primären Elemente bei der Primärproduktion

Neben der rein quantitativen Erfassung der Umweltbelastungen über Umweltindikatoren bei der Primärgewinnung der hier betrachteten Elemente, soll auch eine qualitative Einschätzung aufgezeigt werden. Hierbei wird insbesondere auf die Förderung und Aufbereitung eingegangen, um die spezifischen Probleme der jeweiligen Gewinnungsprozesse aufzuzeigen. Dazu werden die aktuellen Fakten hinsichtlich Reserven und statischen Reichweiten sowie Charakteristika ihrer Rohstoffvorkommen aufgeführt.

8.3.1 Kupfer

Kupfer kommt mit einer Häufigkeit in der Erdkruste von ca. 60ppm [Lide 2005] vor und hat somit eine ähnliche Konzentration wie Zink und Kobalt. Es existiert eine Vielzahl an Kupfermineralien, von denen ca. 20 eine wirtschaftliche Bedeutung haben [Lossin 2001]. Die Kupfererze befinden sich zumeist im präkambrischen Schild, sowie in tertiären Faltengebirgen und somit auf allen Kontinenten. Die zur Kupfergewinnung verwendeten Erze sind neben der Kupfergewinnung auch für die Gewinnung einer Vielzahl weiterer Elemente (z.B.: Fe, Pb, Zn, Au, Ag) von besonderer Bedeutung, die im Kupfer-Aufbereitungsprozess als Nebenprodukte gewonnen werden [Lossin 2001]. Die Reserven von Kupfer belaufen sich auf ca. 630 Mio. Tonnen [USGS 2001g] und damit beträgt die derzeitige statische Reichweite ca. 39 Jahre.

Kupfererze ab 0,5 % Cu-Gehalt können übertägig, ab 1% untertägig wirtschaftlich abgebaut werden, insbesondere wenn diese weitere wertvolle Metalle wie Gold oder Silber aufweisen [Lossin 2001]. Die derzeit größten Minen sind die terrassierten Tagebauminen für die Kupfererzgewinnung. Sie bedecken häufig mehr als einen Quadratkilometer und sind mehrere hundert Meter tief. Hierdurch entstehen gewaltige Eingriffe in die Bio- und Hydrosphäre (Grundwasserabsenkung, Sauerwasserbildung), die zu lokalen Änderungen des natürlichen Gleichgewichtes führen können [Restle 2009]. Derzeit werden global über 100.000 t Kupfererz pro Tag gefördert. Hinzu kommen größere Mengen Abraum, um das erzhaltige Gestein frei zu legen [Lossin 2001]. Neben den benötigten Energien für die Bewegung dieser Massen muss auch der große Flächenverbrauch für Lagerung, Verarbeitung und Ablagerung berücksichtigt werden.

Ungefähr 80% der Primärkupferproduktion erfolgt aus sulfidischen Erzen. Deren typische Aufbereitungsabfolge kann wie folgt dargestellt werden [Lossin 2001], vgl. auch Abbildung 25:

Aufkonzentration:

Hier erfolgt eine Feinmahlung des Erzes mit anschließender Flotation, dabei werden über 90% des Kupfers aufkonzentriert, während 95 % der Masse abgetrennt werden.

Optional: Röstung (wird heutzutage kaum noch angewendet)

Dies erfolgt um oxidiertes Material zu erhalten, Vorbereitung des Materials auf nachfolgende Prozesse

- Zweistufige pyrometallurgische Extraktion
 - Schmelzen zum Kupferrohstein
 - Oxidation des Kupferrohsteins zum Konverterkupfer
- Raffination des Konverterkupfers
- Pyrometallurgisch
- Elektrolytisch, hier erfolgt die Gewinnung des Anodenschlammes zur Abtrennung von Gold und Silber

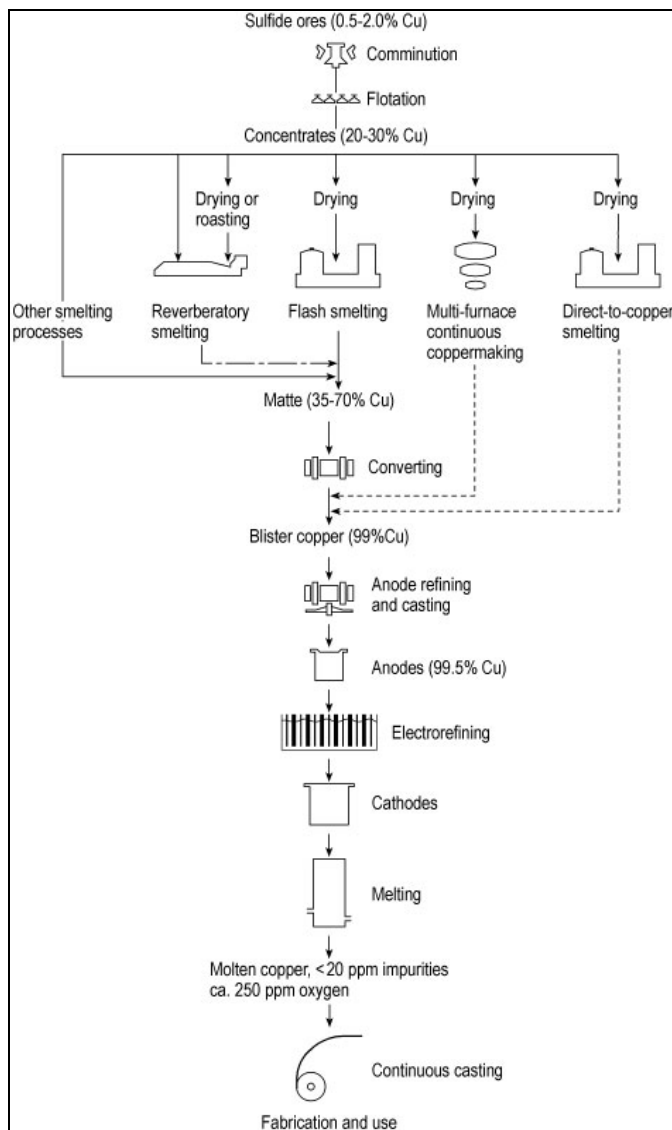


Abbildung 25 Prinzipieller Gewinnungsprozess zur Kupfergewinnung aus sulfidischen Erzen [Lossin 2001]

Dank angepasster, langjährig erprobter Verfahren und großer Massen ist die Kupfergewinnung enorm effizient durchzuführen. Die spezifisch benötigten Energien sind trotz der zu befördernden und zu bearbeitenden Massen relativ gering. Die beträchtlichen Umweltauswirkungen entstehen daher vor allem durch die absolut geförderten und produzierten Massen (Weltjahresproduktion 2010: 16,2 Mio. Tonnen Kupfer [Edelstein 2011]). Durch den Abbau des Erzes kommt es zu enormen Eingriffen in Hydro-, Litho- und Biosphäre [Restle 2009], wodurch es zu Grundwasserabsenkungen, Versauerung des Wassers, Bodenabsenkungen, Zerstörung von Habitaten, Erosion und Flächenverbrauch kommt. Durch die Aufbereitung entstehen große Mengen an Abraum, die abgelagert werden müssen. Weiterhin besteht die Gefahr der Kontamination der Umgebung mit Schwefeloxiden und Schwermetallen bei unzureichenden Filteranlagen in den hydrometallurgischen Prozessen.

8.3.2 Gold

Gold befindet sich in der Erdkruste in einer Konzentration von ca. 0,005 ppm [Binder 1999], wobei die angegebenen Werte eine weite Spanne aufweisen. Es liegt praktisch immer in gediegener Form mit ca. 2-20% Silberanteil im Gestein vor [Pohl 2005].

Die natürlichen Lagerstätten mit gediegenem Gold kann in zwei Typen unterschieden werden. Zum einen die primären, in denen das Gold in Adern mit Quarz, Calcinit, Alunit, u.a. und verschiedenen Sulfiden (Pyrite, Galena, Chalcopyrite u.a.) vorliegt. Zum zweiten die sogenannten sekundären Lagerstätten, bei denen durch Verwitterungsprozesse das Gold freigelegt wurde und sich dann in Geröll, Bächen oder Flüssen abgelagert hat [Pohl 2005]. Die derzeitige statische Reichweite liegt bei ca. 20 Jahren bei Reserven von rund 51.000 Tonnen [USGS 2011b].

Gediegenes Gold liegt äußerst selten in Nugget-Form vor, viel mehr bestehen die Vorkommen aus fein verteilten Kleinstpartikeln, die im umgebenen Gestein eingebunden sind. Somit besteht die Hauptaufgabe bei der Gewinnung im Aufschluss des Gesteins und einer anschließende Aufkonzentration des Goldes [Pohl 2005].

Bei der Gewinnung von Primärgold können dank des hohen Goldpreises schon Lagerstätten mit Konzentrationen von 5 g Gold pro Tonne Gestein ausgebeutet und Aufbereitungsverfahren mit hohen Material- und Energieeinsätzen wirtschaftlich betrieben werden [Renner 2000].

Bedingt durch den hohen Preis und die relativ einfachen Verfahren mit denen Gold gewonnen werden kann, wird ein verhältnismäßig hoher Anteil des gewonnenen Goldes von Selbstschürfern oder (illegalen) Kleinstbetrieben, gerade in Entwicklungsländern, gewonnen. Diese arbeiten zumeist illegal und ohne staatliche Kontrollen [Ebel 2007]. Hierbei werden durch fehlende Sicherungsmaßnahmen, bedingt durch Armut, Unkenntnis oder Gewinnstreben, Gefahren für das körperliche Wohl, sowie die Umwelt in Kauf genommen. In den Kleinbetrieben werden einfache Aufbereitungsverfahren verwendet, die kaum bzw. wenig Kapital- und Materialeinsatz benötigen; von daher ist dieser Bereich auf Goldvorkommen in lockerem Material (Kies, Sand, Ton) beschränkt, die aus Flüssen oder schlecht gesicherten Bergwerken im Selbstbau gewonnen werden.

Das goldhaltige Material wird aufgeschlämmt und anschließend über einfache Dichtentrennverfahren behandelt. Das so gewonnene Goldkonzentrat wird anschließend mittels der ehemals auch als industrielles Standardverfahren genutzten Amalgammethode weiter aufkonzentriert. Hierbei wird das goldhaltige Konzentrat (zum Teil per Hand) mit Quecksilber gemischt, so dass sich das Gold mit dem Quecksilber zu einem Amalgam verbindet. Nach dem Abtrennen des Amalgams wird dieses bei über 600 °C erhitzt, so dass das Quecksilber verdampft und das Rohgold zurück bleibt. Durch den hohen Mengeneinsatz an Quecksilber, bis zu 5 kg_{Hg}/kg_{Au}, welches Großteils an die Umgebung abgegeben wird, werden weite Gebiete auf längere Sicht stark belastet [Gasmi 2004].

Durch den hohen Goldpreis können erhebliche Anstrengungen unternommen werden, um das Gold aus dem Erz zu gewinnen. Als Folge werden in der industriellen Goldgewinnung erhebliche Kapital- und Materialeinsätze aufgewendet um auch schwer zugängliche und prozesstechnisch aufwendigere Erze zu gewinnen. So wird zum Beispiel in Südafrika geplant, Golderze aus Teufen von über 4 km zu gewinnen [Glüsing 2008]. Durch die Gewinnung von Golderzen aus großen Tiefen und in Verbindung mit den geringen Goldkonzentrationen im Gestein, werden erhebliche Energieeinsätze für den Transport des Materials zu den Aufbereitungswerken auf Bodenniveau benötigt.

Durch die geringen Konzentrationen des Goldes im Gestein müssen wiederum große Mengen Material abgebaut, bewegt und verarbeitet werden. Hierdurch entstehen gerade im Tagebau erhebliche Landschaftsverbräuche für die Minen selbst, aber auch für Halden und Aufbereitungsstätten. Zudem entstehen durch die tiefen Einschnitte im Gelände zum Teil erhebliche Veränderungen im Öko- und Hydrosystem (Sauerwasserbildung, Grundwasser-senkungen) der jeweiligen Region [Ebel 2007].

Das bergmännisch gewonnene Material wird in mehreren Stufen stark zerkleinert um das zumeist feinkörnige Gold vom umliegenden Gestein aufzuschließen. Hierfür sind erhebliche Mengen an Zerkleinerungsarbeit erforderlich.

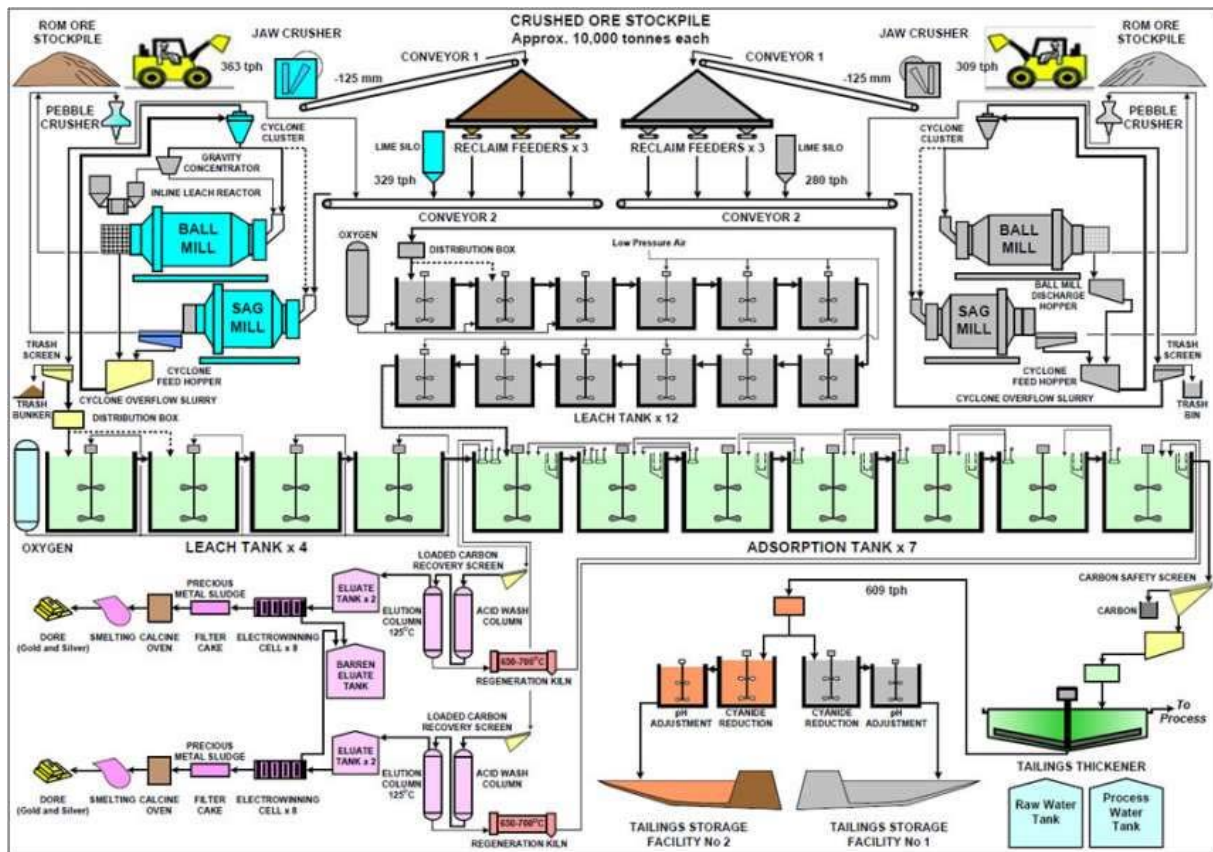


Abbildung 26 Industrielle Gewinnung von Gold mittels des Carbon in Pulp Verfahrens (CIP) [Kingsgate 2011]

Derzeit wird im industriellen Maßstab hauptsächlich Gold über das Cyanid-Verfahren gewonnen. Hierbei wird das Gold mittels des giftigen Cyanids aus dem umgebenen Gestein gelöst. Hierzu wird das fein aufgeschlossene Erz entweder auf Halden gebracht und dann über längere Zeiträume mit Cyanid-Lauge versetzt (bei niedrigen Au-Gehalten) oder in großen Zwangsmischern mit dem Cyanid in Kontakt gebracht. Das Cyanid löst das Gold aus dem umgebenen Gestein und wird anschließend aufgefangen. Die Rückgewinnung des Goldes erfolgt entweder über Zementation, indem der goldhaltigen Lauge Zink beigelegt wird, oder (heutzutage verbreiteter) über Adsorption an Aktivkohle (CIP), hier erfolgt die Rückgewinnung über eine Desorption des Goldes in Autoklaven, vgl. hierzu Abb.26.

Die Cyanidlauge wird beim Prozess im Kreis geführt, um dies zu ermöglichen sind große Absetzbecken und Puffer nötig. Bei unsachgemäßer Lagerung kann es hier zu gefährlichen Unfällen kommen, mit der Folge, dass das giftige Cyanid in die Umwelt austritt und ganze Gebiete stark beeinträchtigt, wie z.B. im Januar 2000 in Rumänien in Baia Mare [IAD].

Die verbleibenden Berge (das vom Gold befreite Gestein) enthalten häufig noch große Mengen an Schwermetallen und Cyanidresten [Renner 2000]. Diese stellen ein erhebliches Gefährdungspotential dar.

Weitere Quellen für Primärgold sind andere Metallgewinnungsprozesse, insbesondere bei der Kupferverhüttung (siehe Kapitel 8.3.1), in denen Gold als Nebenprodukt gewonnen wird.

Hier entsteht bei der Reinigung des Rohkupfers durch das Anodenverfahren der sogenannte Anodenschlamm, in denen sich die edleren Metalle (Ag, Au, Pt) befinden.

8.3.3 Silber

Silber ist mit einer Konzentration von 0,079 ppm in der Erdkruste [Arnold 2007]. Es kommt neben dem gediegenen Zustand in unterschiedlicher Mineralform vor, wie zum Beispiel Silberglanz (Ag_2S) oder Polybasit ($(\text{Ag,Cu})_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$) [Pohl 2005]. Silber ist ein Element, das sowohl als Major Metal als auch als Minor Metal gewonnen wird. So wird nur knapp ein Drittel des Primärsilbers aus Silberbergwerken gewonnen, der Großteil der Produktion wird als Nebenprodukt anderer Buntmetallproduktionen gewonnen. Hierbei spielen insbesondere die Gewinnungsprozesse von Blei, Kupfer und Gold eine Rolle [Pohl 2005].

Die statische Reichweite wird derzeit auf ca. 23 Jahre geschätzt, wobei hier zu beachten ist, dass Silber häufig als Nebenprodukt anderer Gewinnungsprozesse abfällt und somit von diesen abhängig ist. Die Reserven belaufen sich auf 510.000 Tonnen [USGS 2001c].

Die Primärsilbergewinnung aus gediegenem Silber erfolgt über Cyanidlaugung, Thiosulfatlaugung oder das Amalgamverfahren, wobei dieses auf Grund der Umweltgefahren und den geringen Gewinnen heutzutage nur noch sehr selten zum Einsatz kommt. Die Thiosulfatlaugung erfolgt ähnlich wie die Cyanidlaugung, ist heutzutage jedoch von der günstigeren Cyanidlaugung verdrängt worden [Brumby 2008]. Die hier zu erwartenden Umweltbeeinträchtigungen sind vergleichbar zu denen aus der Goldgewinnung mit Hilfe des Cyanidverfahrens.

Bei der Gewinnung von Silber aus Blei(-Zink-)erzen wird der Parkes-Prozess und das anschließende Kupellieren (Treiben) verwendet. Bei der Bleiaufbereitung folgt das Silber dem Blei durch die einzelnen Prozessschritte bis zum Rohblei, wobei es auf eine Konzentration von 0,01 bis 1% vorangereichert wird. Für die Durchführung des Parkes-Prozess wird das nach dem Rösten und Reduzieren der Bleierze entstandene flüssige Rohblei mit flüssigem Zink versetzt. Durch die hohe Löslichkeit des Silbers in Zink geht dieses beim Abkühlen der Schmelze aus der Bleischmelze in das erstarrende Zink über, es bildet sich der sogenannte Zinkschaum. Dieser wird nach dem Abtrennen vom verbleibenden Blei in einem Retorten- oder Vakuumofen destilliert. Der Rückstand enthält neben Blei bis zu 50% Silber, sowie geringe Anteile anderer Elemente. Das nachfolgende Kupellieren (oder auch Treiben) erfolgt durch das Einleiten von Luft in den aufgeschmolzenen Rückstand (Reichblei). Das Blei oxidiert, zusammen mit den weiteren Verunreinigungen, im Gegensatz zu dem edleren Silber und kann dann abgeleitet werden. Hierdurch kann Silber in hoher Reinheit gewonnen werden [Brumby 2008].

Bei der Gewinnung von Silber aus Kupfererzen erfolgt die Trennung von Kupfer und Silber erst sehr spät in der Kupfergewinnungs-Prozesskette. So werden sämtliche mechanischen und pyrometallurgischen Aufbereitungsverfahren gemeinsam durchlaufen (siehe 8.3.1). Die Trennung zwischen Kupfer und Silber (sowie Gold) erfolgt erst bei der elektrolytischen Aufreinigung des Rohkupfers zu Reinkupfer. Hierbei entsteht der sogenannte Anodenschlamm, der Edelmetalle, Kupfer und weitere Metalle enthält. Dieser Anodenschlamm wird

anschließend gesiebt und gelaugt, um große Teile des Kupfers abzutrennen. Die nachfolgende Behandlung des Anodenschlammes hängt stark von der jeweiligen Zusammensetzung ab, die stark variieren kann. So haben sich in der Industrie verschiedenste Aufbereitungsverfahren entwickelt, die größtenteils von der Industrie nicht veröffentlicht werden [Brumby 2008].

Gediegenes Gold hat praktisch immer einen gewissen Legierungsanteil an Silber [Pohl 2005]. Dieses wird nahezu durch den gesamten Aufbereitungsprozess (Bergbau, Aufkonzentration, Laugung, Gewinnung aus der Lauge) zusammen mit dem Gold behandelt. Erst bei der Aufreinigung des Rohgoldes erfolgt die Abtrennung des Silbers vom Gold. Bei dem normalerweise angewandten Millerprozess werden Silber und andere Metalle durch Aufchlorierung abgetrennt. Hierzu wird Chlor durch die Schmelze geblasen, die zu Gold unedleren Metalle bilden Chlorverbindungen, die als Schlacke aufschwimmen. Die Schlacke wird anschließend schrittweise gelaugt, bis Silberchlorid überbleibt. Die Gewinnung von elementarem Silber erfolgt dann über eine Reduktion mit Zinkpulver und eine anschließende elektrolytische Aufreinigung [Brumby 2008].

Gerade bei der Gewinnung aus Silbererzen ist, vergleichbar zum Gold, von starken Umweltbeeinträchtigungen auszugehen. Diese liegen insbesondere bei dem großen Massedurchsatz, der benötigten Energie für den Aufschluss und der Verwendung des giftigen Cyanids. Bei den anderen Gewinnungsprozessen, bei denen das Silber als Minor Metal anzusehen ist, kann nur ein Teil der Umweltauswirkungen der gesamten Prozesskette dem Silber angerechnet werden.

8.3.4 Gallium

Gallium ist ein mit 16 ppm [Krauß 1989] in der Erdkruste vertretenes Element und ist somit häufiger als Blei. Es bildet praktisch keine eigenen Mineralien (Ausnahme: Gallit [Krauß 1989]) und ist in größeren Mengen nur in (Zink- und) Aluminiumerzen zu finden [Pohl 2005]. Dies ist durch die enge geochemische Verwandtschaft zwischen Gallium und Aluminium begründet, hervorgerufen durch ähnliche Atomradien der jeweiligen Ionen [Krauß 1989]. Hierdurch kann Gallium Gitterplätze der Aluminiumionen im Bauxit übernehmen und somit Konzentrationen von 0,003% - 0,008% [Greber 2000] im Bauxit erreichen.

Aus wirtschaftlichen Gründen lohnt es sich nicht, allein auf Grund des Galliums eine Abbautätigkeit von Bauxit zu beginnen [Greber 2000]; es gibt somit keine primäre Minentätigkeit für Gallium [Pohl 2005, Mikolajczyk 2009] und es ist somit ein reines Minor Metal. Derzeit stammen 95% des Primärgalliums aus Bauxit, welches für die Aluminiumoxidherstellung gewonnen wurde. Die restlichen Prozente stammen aus Zinkerzen [Pohl 2005]; dieser Weg verliert jedoch auf Grund geänderter Verfahren bei der Zinkproduktion für die Gewinnung von Gallium stark an Bedeutung [Weiss 1985]. Durch diese enge Bindung der Galliumproduktion an die Bauxitverarbeitung ist die statische Reichweite für Gallium direkt an die statische Reichweite des Bauxits gekoppelt, die derzeit bei ca. 130 Jahren liegt. Die Reserven des Bauxits betragen rund 28 Milliarden Tonnen [USGS 2011h].

Aluminiumoxid (ein Vorprodukt für die Primär-Aluminiumgewinnung) wird aus Bauxit mittels des Bayerprozesses gewonnen, dies ist der derzeit einzig angewandte Prozess bei der Her-

stellung weltweit [Weiss 1985]. Aus dem Bayerprozess kann zusätzlich zum Aluminiumoxid durch zusätzliche Anlagen noch Gallium gewonnen werden. Die Gallium-Extraktionsanlage befindet sich praktisch immer in, oder nahe bei dem Gelände der Aluminium-Oxid-Herstellung [Greber 2000], es existieren keine „reinen“ Primärgallium-Produktionsanlagen [Metalsplace 2011]. Somit besteht auch eine direkte Abhängigkeit zwischen der maximale Größe des Galliumwerkes und der bestehenden Aluminium-Oxid-Hütte.

Der Bayer-Prozess ist das Standardverfahren um Aluminium aus dem Bauxit-Erz zu lösen. Hierzu wird das Bauxit aufgemahlen und mit Natronlauge versetzt. Das Besondere am Bayer-Prozess ist, dass die aluminiumhaltigen Minerale (die auch das Gallium beinhalten) im Bauxit mit NaOH unter verhältnismäßig moderaten hydrothermalen Bedingungen gelöst werden, während andere Komponenten nahezu inert gegenüber dem Prozess sind [Greber 2000].

Durch mehrere Umläufe der Natrium-Aluminatlösung im Bayer-Prozess wird der Galliumgehalt in der Lösung auf 70-150 mg/l erhöht, zur Gewinnung wird jeweils immer nur ein Teil der Gesamtumlaufmenge ausgeschleust. Die Gewinnung des Galliums aus der Lauge kann über drei verschiedene Wege erfolgen [Greber 2000], vgl. Abbildung 27:

- Gezielte Fällung
- Elektrolytische Verfahren
- Extrahierung mittels Komplexbildnern (derzeitiges Standardverfahren)

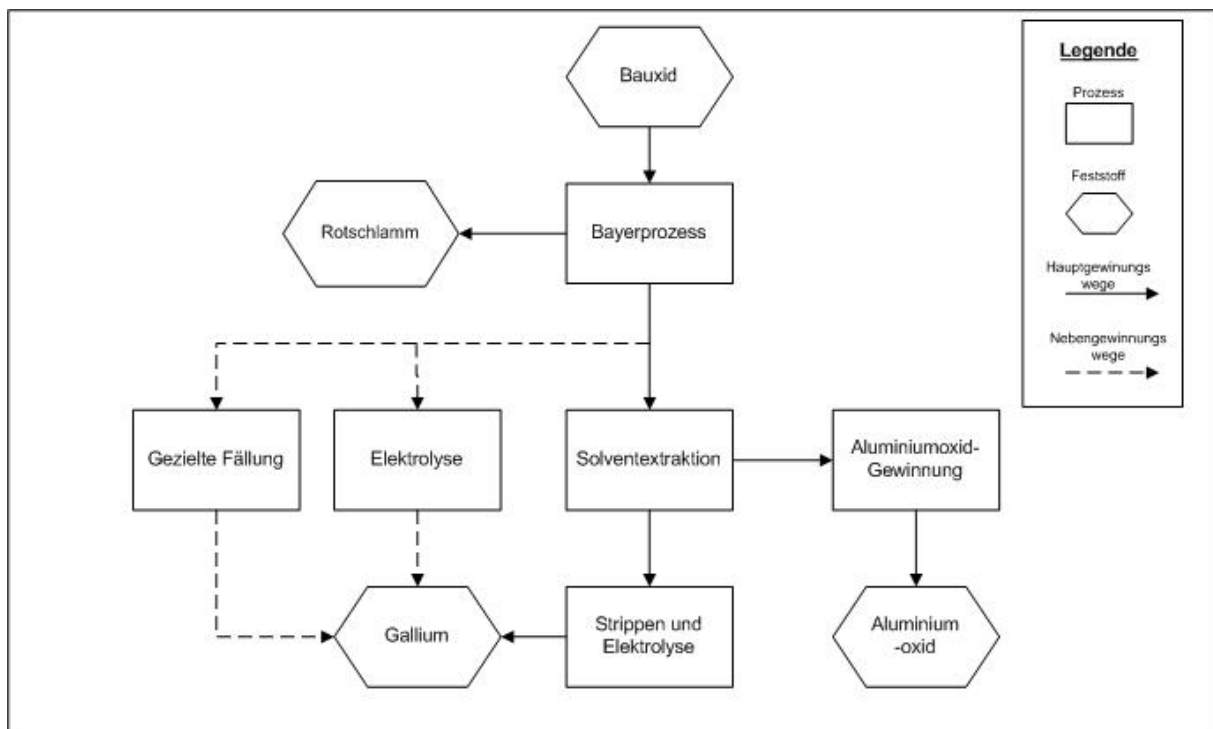


Abbildung 27 Prinzipskizze zur Galliumgewinnung (Darstellung TU Clausthal)

Bei der gezielten Fällung wird die Natron-Aluminatlösung mit CO_2 versetzt, hierbei fällt zuerst reines Aluminiumhydroxid aus, womit sich der Galliumanteil in der Lösung erhöht. Es folgen weitere Fällungsschritte um den Galliumanteil weiter zu erhöhen. Anschließend wird Gallium zusammen mit verbleibendem Aluminium als Hydroxid gefällt. Dieses wird mit Natriumhydroxid aufgelöst, nachfolgend kann über Elektrolyse das Gallium gewonnen werden. Dieses Verfahren ist durch die vielen Fällungsschritte recht arbeitsintensiv und kann daher nur verwendet werden, wenn Arbeits- und Energiekosten gering sind. Derzeit ist nur eine Anlage in China bekannt, die dieses Verfahren anwendet (Jahresproduktion: 5t/a).

Bei den elektrolytischen Verfahren wird ausgenutzt, dass Gallium zusammen mit Quecksilber ein Amalgam bildet, aus welchem mittels Natronlauge das Gallium zurückgewonnen werden kann. Das Quecksilber wird hierbei in einem Kreislauf geführt. Dieses Verfahren benötigt relativ hohe Galliumkonzentrationen in der Lauge, so dass dieses Verfahren in modernen Aluminium-Oxid-Anlagen nicht mehr verwendet werden kann, auch kam es zu erhöhten Konzentrationen von Quecksilber im Laugestrom. Derzeit wird wahrscheinlich außer einer kleineren Anlage in Ungarn kein Gallium mehr durch dieses Verfahren produziert.

Bei der Extrahierung mittels Komplexbildner wird das Gallium mittels Solventextraktion aus der (wässrigen) Lösung gewonnen. Es werden an die jeweiligen Bedingungen passende Komplexbildner verwendet (z.B. Kelex 100), die in einer organischen Phase gebunden sind, bzw. als Festkörper vorliegen. Hierbei wird nicht nur das Gallium, sondern auch Aluminium und Natrium und andere Metalle aus der Lösung an den Komplexbildner gebunden. Diese können Großteils mit schwachen Säuren gestrippt (von dem Komplexbildner abgetrennt) werden, so dass im nachfolgenden Schritt das Gallium mit starker Säure (Salz- oder Schwefelsäure) gewonnen werden kann. Die verbleibenden Verunreinigungen können mittels Elektrolyse umgangen werden, so dass hier bereits Reinheiten bis 99% (z.T. 99,9%) erreicht werden können. Derzeit ist dies das Standardverfahren zur Gewinnung von Primärgallium aus der Lauge.

Beim Gesamtprozess der Galliumgewinnung aus Bauxit entsteht nur ein geringer Mehrverbrauch an Lauge gegenüber dem Aluminium-Oxid-Werk als Ganzes [Morawietz 1964]. Die zur Solventextraktion verwendeten Materialien (Komplexbildner, Säure) können zum Großteil in einer Kreislaufführung gehalten werden und müssen nur begrenzt nachgegeben werden.

Bsp.: Ingal Stade (Verfahren: Komplexbildner):

Produktion: 1 Mio. t Aluminium-Oxid -> 4000 t Na_2O

30 t Gallium -> 10 t Na_2O

Es werden somit 0,25 % mehr an Na_2O benötigt als das ohnehin bestehende Aluminium-Oxid-Werk bereits benötigt [Lochte 2010].

Der Gesamtenergieverbrauch pro hergestellter Tonne Aluminiumoxid wird mit ca. 16.000 MJ veranschlagt [Greber 2000]. Bei der Gewinnung von Gallium (mittels Komplexbildner) werden weniger als ein Prozent vom Stromverbrauch der Anlage, beim Gesamtenergieverbrauch nochmals weit weniger benötigt (allerdings bei erheblich geringeren Produktionsmengen verglichen mit Aluminiumoxid). Die entstehenden Abfälle können entweder in den Gesamtprozess reintegriert werden (schwache Natronlauge) oder ohne Probleme thermisch

behandelt werden (keine Chloride o. ä.) [Lochte 2010]. In wie weit die Möglichkeiten zum Recyclieren und umweltgerechten Entsorgen umgesetzt werden, muss wahrscheinlich regional unterschiedlich bewertet werden. So konnten hierzu keine Informationen aus China, dem größten Produzentenland ermittelt werden.

Da, wie oben schon erwähnt, Primärgalliumwerke nie isoliert arbeiten, sondern immer mit einer Aluminiumoxidhütte verbunden sind, muss die Primärgalliumproduktion in Zusammenhang mit diesem Umfeld betrachtet werden. Durch die Ausnutzung des bei der Aluminium-Oxid-Produktion angewendeten Bayer-Verfahrens ergeben sich hohe Synergien beim Rohstoffaufschluss. Die Gallium-produktionsspezifischen Verfahren sind Stand der Technik und in anderen Bereichen der Hydrometallurgie (Kupfergewinnung) schon lang erprobt. Die hierbei entstehenden Abfälle können zum Teil in den Gesamtprozess reintegriert oder thermisch behandelt werden.

Da die globale Gesamtmenge an produziertem Gallium mit 78-110 t/a [Jaskula 2010] zur Zeit noch recht niedrig ist, sind dementsprechend auch die absoluten Energieaufwendungen und aufgewendeten Materialien zum Gesamtsystem Tonerdeherstellung als relativ gering anzusehen. Jedoch sind, bedingt durch die geringen produzierten Mengen, die geringen Konzentrationen im Ausgangsmaterial sowie die speziellen angewendeten Verfahren relativ hohe spezifische Umweltbelastungen zu erwarten.

8.3.5 Indium

Indium kommt zu ca. 0,05 ppm in der Erdkruste vor [Tolcin 2010]. Die bekanntesten und am meisten verbreiteten Minerale des Metalls sind Indit und Roquésit [Schwarz-Schampera 2002], jedoch kommen diese nicht in abbauwürdigen Mengen vor. Indium muss somit als Beiprodukt aus anderen Metallgewinnungsprozessen gewonnen werden. So liegt Indium in abbauwürdigen Mengen als Fremdatome vor allem in Zinkblende, Bleiglanz und Kupferkies vor [Felix 2000]. Die wichtigsten ökonomischen Anreicherungen treten in Vulkanit- und Sedimentgebundenen Massiv-Sulfid-Lagerstätten auf, diese sind mit Abstand die weltweit größten Akkumulationen von Indium [BGR 2005]. Erze mit hohen Anteilen an Indium besitzen häufig weitere Anreicherungen an anderen Hochtechnologiemetallen wie Ge, Ga, Bi und Tellur [BGR 2005]. Die Gewinnung erfolgt über die Verhüttung dieser polymetallischen Erze die im Wesentlichen Buntmetalle wie Blei, Zink, Kupfer oder Zinn enthalten.

Als Minor Metal steht die statische Reichweite des Indiums in direktem Zusammenhang mit den entsprechenden Major Metals (Zinn und Zink) deren statische Reichweiten bei 20 bzw. 21 Jahren liegen. Die Reserven belaufen sich bei Zinn auf rund 5,2 Mio. Tonnen [USGS 2011j] und bei den Zinkerzen auf 250 Mio. Tonnen [USGS 2011k].

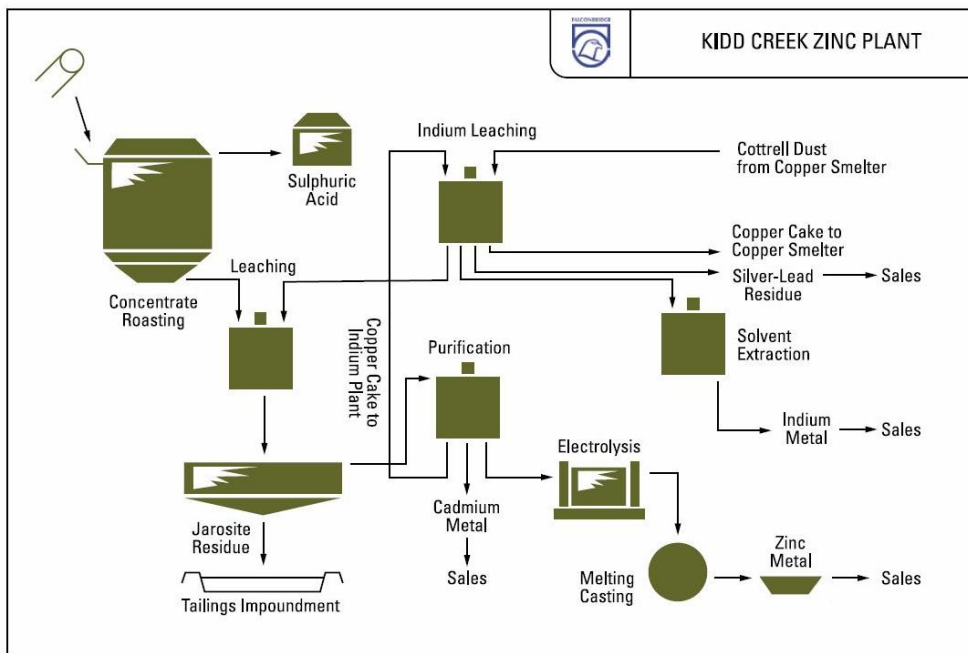


Abbildung 28 Flussdiagramm zur Darstellung des Zink-Schmelze-Prozesses bei der Kid Creek Zink Schmelze mit Indiumgewinnung [Falconbridge 2002]

Die Gewinnung von Indium erfolgt zumeist aus Rückständen der Zinkproduktion; im Ausgangsmaterial Sphalerit (Zinkblende) befindet sich normalerweise 10-20 ppm Indium, vereinzelt können weit höhere Konzentrationen von bis zu 10.000 ppm gefunden werden [Felix 2000].

Die Indiumgewinnung erfolgt über Verfahren in denen sich prozessbedingt Indium aufkonzentriert. Solche angereicherten Rückstände sind etwa die Flugstäube bei der Röstung der Blei-Zink-Erze, das Waschzink bei der New-Jersey- Destillation, die Bleisulfat-Laugerückstände der Zinklaugung für die Elektrolyse sowie das Cadmium-Zementat zur Reinigung der Laugen für die Lithopone-Fällung [Morawietz 1964].

Die anschließende Gewinnung der reinen Metalle erfolgt je nach Konzentrat aus dem Hauptprozess über angepasste Prozesse. Diese enthalten verschiedene Laugenstufen (HCl, H₂SO₄), ggf. Solventextraktionen zur weiteren Aufkonzentration und angepasste Schritte zur Gewinnung des Metalls aus der Lauge. Prozessbedingt kann je nach Rohstoffroute nur ca. 50-80 % des Indiums tatsächlich gewonnen werden. Hierbei können, je nach betrachteter Lagerstätte, weitere Nebenprodukte, wie z.B. Silber gewonnen werden [Felix 2000].

Die Umweltauswirkungen der Primärproduktion können, ähnlich wie bei Germanium und Gallium, in zwei Bereiche eingeteilt werden. Zum einen denjenigen, der durch das Major Metal bestimmt ist, sprich Abbau und Hauptprozess. Dieser ist nicht auf das Minor Metal (hier: Indium) anzurechnen. Zum anderen denjenigen Bereich der speziell der Indiumgewinnung zuzurechnen ist. Hier sind die speziellen Verfahren und den damit verbundenen Material- und Energieaufwendungen zur Gewinnung des reinen Indiums aus den Konzentraten des Hauptprozesses zu nennen.

Durch die im Vergleich zu den zu Indium gehörigen Major Metals (wie z.B. Zink) niedrigen Produktionsmengen (ca. 600 t/a) halten sich die nötigen Materialeinsätze und Energie absolut gesehen im Rahmen. Jedoch ist durch die speziellen Verfahren zur Aufkonzentration, hier insbesondere die Solventextraktion, die geringen Konzentrationen und die geringen produzierten Mengen mit hohen spezifischen Energie- und Materialeinsätzen zu rechnen.

8.3.6 Germanium

Germanium liegt in der Erdkruste in einer Konzentration von ca. 6,7 ppm vor [Binder 1999], und somit in einer ähnlichen Konzentration wie Zink oder Blei, es ist jedoch sehr dispers verteilt. Es bildet verschiedene natürlich Mineralien, wie zum Beispiel Germanit ($\text{Cu}_{26}\text{Fe}_4\text{Ge}_4\text{S}_{32}$), es sind jedoch keine abbauwürdigen Erze, bzw. Lagerstätten bekannt. Von daher wird Germanium als Beiprodukt aus anderen Prozessen gewonnen.

Die statische Reichweite des Germaniums ist als Minor Metal direkt an seine entsprechenden Hauptmetalle gebunden, so dass hier von einer statischen Reichweite von ca. 21 Jahren (Zink)⁹ ausgegangen werden kann. Das Germanium ist als strategisches Metall anzusehen, da es u.a. wichtiger Bestandteil von (militärischen) Nachtsichtgeräten ist. Daher sind belastbare Daten zu diesem Metall generell schwer zu erhalten und besitzen keine generelle Gültigkeit. Derzeit wird Germanium hauptsächlich bei der Verhüttung von Zink- und Kupfersulfiderzen, sowie bei der Verbrennung zur Stromgewinnung von einigen germaniumreichen Kohlen aus den Flugaschen gewonnen [Gubermann 2009]. Hierbei kann die Konzentration bei Zinkerzen 400 ppm, bei Kupfererzen 640 ppm und bei Kohlen 300 ppm erreichen.

Bei den Gewinnungsprozessen werden jeweils natürliche Germaniumsenken im jeweiligen Hauptverfahren ausgenutzt. So werden in thermischen Prozessen die Flüchtigkeit von GeO bzw. GeS genutzt, bei hydrometallurgischen Prozessen erfolgt eine Aufkonzentration über eine Abscheidung von Ge als Sulfid oder Hydroxid. Die aus dem Hauptprozess erzeugten Konzentrate enthalten Ge in einer Konzentration zwischen 7 und 50 % [Scoyer 2000].

⁹ Die Reserven der Zinkerze belaufen sich auf ca. 250 Mio. Tonnen [USGS 2011k]

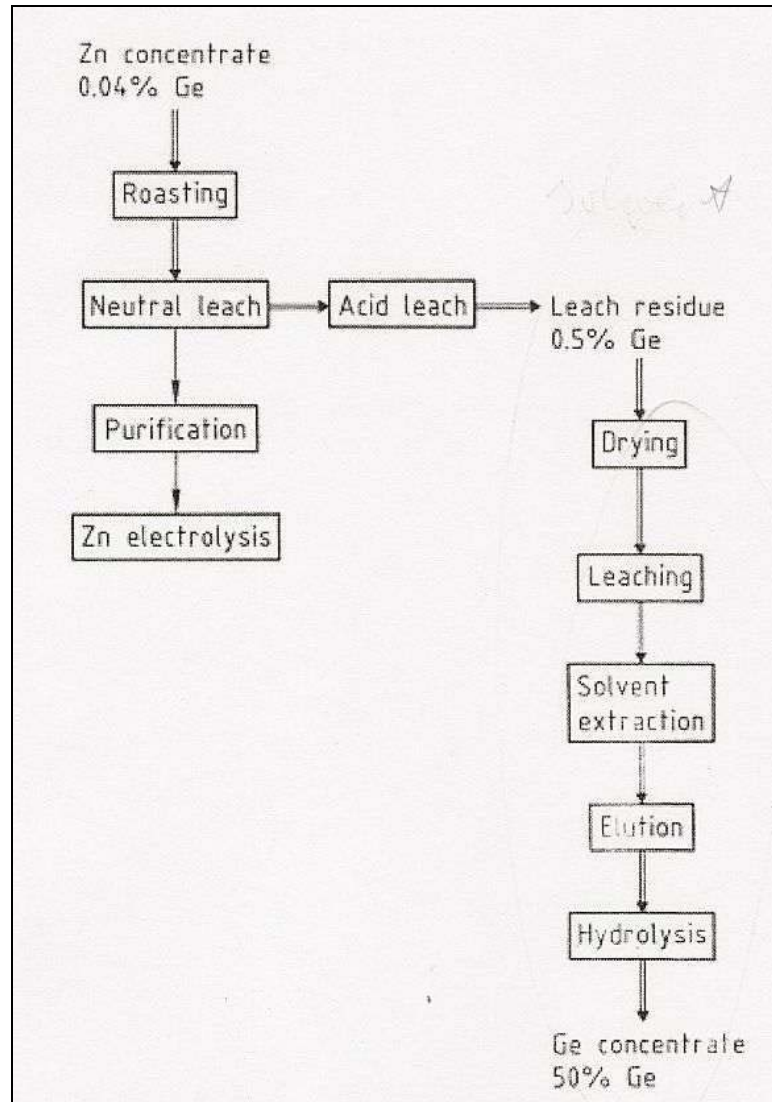
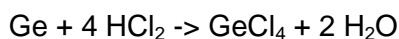


Abbildung 29 Beispiel für die Gewinnung eines Germaniumkonzentrates aus einem Hauptverfahren [Scoyer 2000]

Diese können dann unabhängig von den bis dahin durchlaufenen Prozessen mit nahezu dem gleichen Verfahren zu Germanium aufkonzentriert werden. Hierzu wird das Germaniumkonzentrat mit Salzsäure in einer Chloratmosphäre versetzt.



Das so erzeugte GeCl_4 verdampft bei 83°C , hierdurch wird das Germanium aus dem Verbund gelöst. Das im nachfolgenden von Verunreinigungen gereinigte GeCl_4 -Gas wird hydrolysiert, so dass sich reines GeO_2 (solid) abscheidet. Nach einer Trocknung wird dann bei ca. 650°C eine hydrogen Reduktion im Rohofen durchgeführt, um das elementare Germanium zu erhalten [Scoyer 2000].

Viele der Umwelteinwirkungen bei der Germaniumgewinnung sind nicht direkt dieser anzurechnen, sondern vielmehr dem Hauptprozess, wie zum Beispiel die SO_2 -Belastung durch

die Zink-Industrie. Durch die geringe globale Jahresproduktion von Germanium mit ca. 90 t/a halten sich die nötigen Materialeinsätze und Energie absolut gesehen im Rahmen, jedoch ist durch die geringe Konzentration, die speziellen Verfahren zur Aufkonzentration und die geringen Mengen mit hohen spezifischen Einsätzen zu rechnen.

8.3.7 Seltene Erden

Die Reserven der betrachteten Seltenen Erden Neodym-, Dysprosium-, Praseodym- und Terbium-Oxid betragen ca. 24 Mio. Tonnen (eigene Berechnung nach USGS 2011). Die Primärproduktion in 2010 betrug ca. 35.355 Tonnen für die vier prioritären Seltenen Erden (eigene Berechnungen nach USGS 2011 und BGR 2011). Dabei fallen nach BGR 2011 1.980 Tonnen auf Dysprosium-Oxid und 375 Tonnen auf Terbium-Oxid. Werden diese vier Seltenen Erden in Summe betrachtet, ergibt sich eine statische Reichweite von 679 Jahren.

Es handelt sich bei den Seltenen Erden um Major Metals, die aus den natürlichen Erzen Bastnäsit, Xenotime, Monazit und der Ionen-Adsorption-Ablagerung immer vergesellschaftet mit anderen Seltenen Erden gewonnen werden. Durch das gemeinsame Auftreten und die ähnliche chemische Struktur ist die Trennung der Seltenen Erden sehr zeit- und kostenintensiv.

Derzeit werden die größten Mengen an Seltenen Erden im Tagebau gewonnen. Abgesehen von den Lagerstätten in Südchina enthalten alle Lagerstätten neben den Seltenen Erden auch radioaktive Stoffe, z.B. Uran oder Thorium. Schwermetalle sind ebenfalls in den Erzen enthalten. Dementsprechend führen der Abbau und die Aufbereitung der Seltenen Erden zu einer Vielzahl an Umweltrisiken, wenn nicht umfangreiche Umweltschutztechniken zum Schutz von Grundwasser, Luft und Böden eingesetzt werden. Einen Überblick über die wichtigsten Risiken zeigt Abbildung 30.

Die größten potentiellen Umweltgefährdungen gehen von den sogenannten Flotationsbergen aus. Sie stammen aus der Aufkonzentrierung der abgebauten und anschließend fein gemahlene Erze. Sie bestehen aus einer Mischung aus Prozesschemikalien, Wasser und Chemikalien aus den Trennprozessen sowie fein gemahlene Material und enthalten in fast allen Fällen auch radioaktive Stoffe und Schwermetalle. Üblicherweise werden die Flotationsberge in Absinkweihern geleitet, die entweder künstliche Auffangbecken oder natürliche Gewässer (z.B. Seen) sind. Diese Absinkweihern sind zum Schutz von Dämmen umgeben. Meistens verbleiben die Flotationsberge für immer in den Absinkweihern, die allmählich durch die natürliche Verdunstung austrocknen, wenn kein neues Wasser zugeführt wird. Der Damm muss über Jahrhunderte stabil bleiben, damit die Flotationsberge nicht in die Umgebung gelangen. Hierbei ist zu bedenken, dass die Dämme je nach Standort vielfältigen Risiken wie z.B. Überflutungen durch Sturmwater, mangelnde Langzeitstabilität aufgrund von Baufehlern oder Erdbeben ausgesetzt sind. Ein Dammdurchbruch, wie in Ungarn im Oktober 2010 in einem Aluminiumoxid-Werk geschehen, kann im Fall der Seltenen Erden zu zerstörerischen Umweltauswirkungen mit spezifischen Emissionen von Thorium, Uran, Schwermetallen, Säuren und Fluoriden führen. Weitere potentielle Umwelt-

schäden beim Abbau und der Weiterverarbeitung liegen in zusätzlichen Luftemissionen, Bodenkontamination, Landnutzung etc.

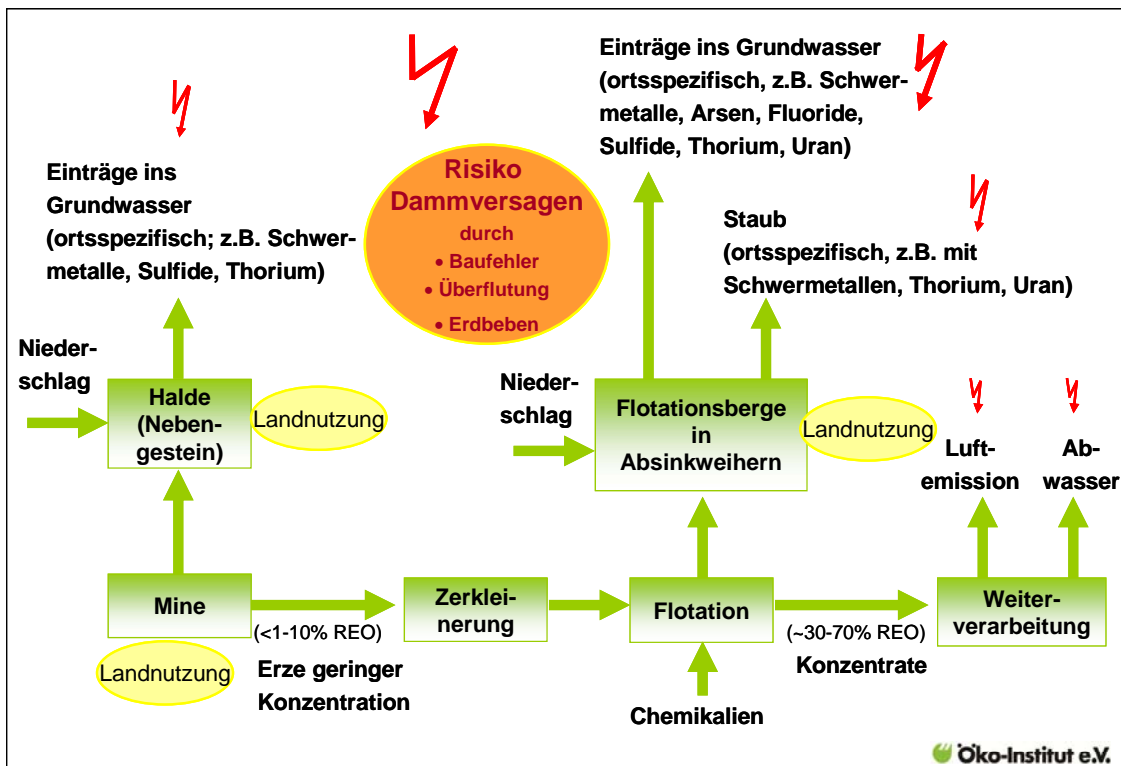


Abbildung 30 Risiken des Abbaus von Seltenen Erden mit unzureichenden Umweltschutzeinrichtungen [Öko-Institut e.V. 2011]

Aufgrund der massiven Umweltprobleme in China hat die Regierung umfassende Pläne zur Optimierung und Konsolidierung der Seltene Erden Industrie – einhergehend mit der Schließung kleinerer Minen - für die nächsten fünf Jahre beschlossen.

8.3.8 Platingruppenmetalle (PGM)

Die zwei prioritären Platingruppenmetalle¹⁰ Platin und Palladium kommen in der Regel nur vergesellschaftet mit den weiteren Platingruppenmetallen Ruthenium, Osmium, Rhodium und Iridium sowie Silber und Gold vor [Holleman Wiberg 2007].

Die Primärmetallproduktion von Platin lag im Jahr 2010 bei ca. 188 Tonnen, wovon 144 Tonnen in Südafrika gefördert wurden. Bei 27.000 Tonnen Reserven liegt die Statische Reichweite von Platin damit bei 144 Jahren [Öko-Institut e.V. 2009 und Johnson Matthey 2011].

Gefördert wird Platin sowohl als Major Metal (in Südafrika) wie auch als Minor Metal der Palladium- / Nickelgewinnung (in GUS). Die primäre Platinförderung findet zu ca. 76% in

¹⁰ Ruthenium wurde im 1. Experten-Workshop in die Gruppe der prioritären Elemente aufgenommen. Im Verlauf der Studie wurde es aber aufgrund der Erkenntnisse wieder herabgestuft in die zweite Priorität.

Südafrika statt [Johnson Matthey 2011]. Hier besitzen die Erze eine vergleichsweise sehr geringe Konzentration an Platin. Infrastrukturfragen (z.B. Stromversorgung) sowie soziale Themen (Landnutzungsrechte usw.) spielen eine übergeordnete Rolle.

Die Primärproduktion von Palladium lag in 2010 bei 227 Tonnen, davon wurden 116 Tonnen aus Russland und 80 Tonnen aus Südafrika gefördert [Johnson Matthey 2011]. Die Reserven liegen bei 26.000 Tonnen, was rechnerisch zu einer statischen Reichweite von 115 Jahren führt [Öko-Institut e.V. 2009]. Palladium wird immer als Minor Metal der natürlichen Platin- und Nickelerze gefördert. Gefördert wird das primäre Palladium zu ca. 51% in Russland [Johnson Matthey 2011]. Dieser Standort zeichnet sich durch alte Aufbereitungsanlagen und einer ungünstigen Lage am Polarkreis aus. Sehr hohe SO₂-Emissionen sind mit der Produktion verbunden. In Norilsk liegt einer der weltweit größten PGM-Primärproduzenten, die an die Nickel- und Kupferproduktion gekoppelt ist. Hier befindet sich durch die PGM-Gewinnung und die Gewinnung der anderen Metalle die größte SO₂-Punktquelle der Welt. Aufgrund der schwefelhaltigen Erze und unzureichender Abgasreinigung ist eine starke Versauerung der Umgebung festzustellen. Dazu kommen Probleme mit Abfällen und den Staubemissionen. Die abgeschiedene Lage wirkt sich nachteilig auf den Abtransport von Schwefel oder Schwefelsäure, die üblichen Produkte der Abgasreinigung, aus.

Exploration sowie die Primärproduktion der Platingruppenmetalle sind sehr zeit- und kapitalintensiv. Die weltweite Förderung der PGM ist auf wenige große Minengesellschaften (wie z.B. Anglo Platinum, Norilsk Nickel) konzentriert, die über eigene Verhüttungs- und Raffinationsbetriebe zur Herstellung des PGM zum Feinmetall verfügen. Bei den kleineren Minengesellschaften wird in der Regel nur die Aufbereitung der Erze durchgeführt und die PGM-Konzentrate an spezialisierte Firmen zur Raffination abgegeben [Hagelüken, Buchert, Stahl 2005].

Die Aufbereitung der feingemahlten Erze erfolgt überwiegend durch Flotation. Die Edelmetalle werden gemeinsam mit Kupfer, Nickel und weiteren Buntmetallen in mehrstufigen pyrometallurgischen Prozessen angereichert und anschließend von den Buntmetallen getrennt. Zunächst wird dabei in Elektro-Lichtbogenöfen eine silikatische, eisenhaltige Schlacke von der buntmetall- und edelmetallhaltigen sulfidischen Matte (grüne Farbe) abgeschieden. Danach erfolgen die Entschwefelung der Matte in Pierce-Smith- oder TBRC-Konvertern sowie die Abtrennung von Eisen als Fayalit-Schlacke. Dabei entsteht eine eisenarme Matte weißer Farbe. Diese Matte wird kontinuierlich abgezogen und in Blöcke gegossen, die über 2-5 Tage kontrolliert abkühlen. Dadurch kommt es zu einer Phasenbildung. Die PGM sind nun mit bis zu 98% Ausbeute angereichert in einer feinkristallinen, metallischen Ni-Co-Fe-Phase, die nach dem Mahlen durch eine Magnetscheidung von der PGM-armen sulfidischen Cu-Ni-Phase getrennt wird. Durch eine Drucklaugung mit H₂SO₄/O₂ werden die Buntmetalle aus der PGM-haltigen magnetischen Phase herausgelöst. Das dabei verbleibende Konzentrat der PGM mit 40 bis 90% ist das Vormaterial für die Feinscheidung [Hagelüken, Buchert, Stahl 2005].

Die Umweltauswirkungen beim Abbau der Platingruppenmetalle sind abhängig von der natürlichen Erzzusammensetzung (der Anteil variiert zwischen 5 und 10 Gramm PGM pro Tonne Erz [Hagelüken, Buchert, Stahl 2005]), der Lage des Standortes, dem Alter der Mine und der Aufbereitungsanlage, der Umweltpolitiken der Staaten sowie der Zusammensetzung des Strommixes.

8.3.9 Umweltentlastung durch Elektro-Mobilität (Ressourcenbetrachtung)

Umweltentlastungen durch den Wegfall oder die Minderung der konventionellen Antriebe sind ebenfalls zu verzeichnen.

In diesem Unterkapitel wird auf die Umweltbelastungen der Primärförderung derjenigen Metalle eingegangen, die in den wegfallenden Komponenten bei vollelektrischen und Brennstoffzellen-Pkw eingehen. Hierbei handelt es sich um die Komponenten Motor, Kraftstoffanlage sowie Abgasanlage und Katalysator. Im Bereich des Motors fallen v.a. Kupfer, Aluminium, Stahl und Eisenwerkstoffe an. Durch den Wegfall der Komponente Abgasanlage werden Kupfer, Stahl und Eisenwerkstoffe eingespart. Ebenfalls entfallen Stahl und Eisenwerkstoffe im Bereich der Kraftstoffanlage. Platin und Palladium werden aus der Komponente Katalysator eingespart.

Für die orientierende Berechnung der mit dem Materialbedarf verbundenen CO₂-Emissionen wurden hier nur die CO₂-Emissionen, die mit der Herstellung der Metalle verbunden sind, herangezogen. Im Jahr 2020 resultiert daraus eine Einsparung von ca. 1,4 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten, im Jahr 2030 beträgt die Einsparung ca. 8,1 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente (siehe Tabelle 16). Für die Berechnung wurde, wie bereits im Kapitel 8.2 beschrieben, der GWP für die Jahre 2020 und 2030 konstant gehalten.

Tabelle 16 Einsparung von CO₂-Emissionen durch Primärmetall-Gewinnung durch geringeren Einsatz der Metalle im Brennstoffzellen- und vollelektrischen Pkw bezogen auf das Basisszenario (Berechnungen für globale Durchschnitts-PKW nach Informationen von Daimler AG)

	Kupfer	Platin	Palladium	Aluminium	Stahl
Einsparung 2020					
in Tonnen Material	ca. 4.500	4	5	ca. 66.700	ca. 250.400
in Tonnen CO ₂ -Äquivalente	ca. 8.600	ca. 70.000	ca. 52.700	ca. 826.000	ca. 415.300
Einsparung 2030					
in Tonnen Material	ca. 26.500	26	31	ca. 394.000	ca. 1.479.200
in Tonnen CO ₂ -Äquivalente	ca. 51.000	ca. 412.400	ca. 311.400	ca. 4.879.500	ca. 2.453.200

Insgesamt kann aus der überschlägigen Rechnung entnommen werden, dass die Größenordnungen der CO₂-Entlastungen durch die weggefallenen Materialbedarfe für die in diesem Projekt behandelten Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs durchaus die Größenordnungen für die zusätzlichen CO₂-Belastungen für die Materialbedarfe der Komponenten der Elektromobilität erreichen. Wie bereits an anderer Stelle betont, sind dies keine Ergebnisse einer umfassenden Ökobilanz: weder sind die Aufwendungen der Produktionsprozesse von den reinen Metallen bis zu den fertigen Komponenten (sowohl für konven-

tionelle als auch für Komponenten der Elektromobilität) erfasst noch die Herstellungskette für die wichtige Komponente Batterie. Entsprechende umfassende Ökobilanzen müssen anderen Projekten vorbehalten bleiben. Die möglichen Einsparungen aus der wichtigen Nutzungsphase der Elektrofahrzeuge sind im Hauptbericht des Projektes OPTUM intensiv thematisiert.

9 Stand und Perspektiven des Recyclings der prioritären Metalle

Eine wesentliche Voraussetzung für die Verwirklichung der zukünftigen Mobilitätskonzepte ist die Sicherstellung der mittel- und langfristigen Ressourcenverfügbarkeit der eingesetzten Sonder- und Edelmetalle für den Masseneinsatz in den Komponenten der zukünftigen Elektrofahrzeuge. Daher ist das umweltgerechte und effiziente Recycling dieser wichtigen Materialien eine wesentliche Voraussetzung.

Mit Markteintritt und zunehmender Marktdurchdringung der Elektrofahrzeuge wird die Nachfrage nach Schlüsselmetallen stark ansteigen, was zu Preiserhöhungen dieser identifizierten Rohstoffe und damit zu erhöhten Kosten von Elektro- und Hybridfahrzeugen führen kann. Abbildung 31 zeigt die Entwicklung der Primärgewinnung der identifizierten relevanten Technologiemetalle für die Elektromobilität der ersten Priorität. Dabei wird der wachsende Abbau in den letzten 30 Jahren im Vergleich zu den letzten 100 Jahren verdeutlicht. Zur Vollständigkeit sei hier erwähnt, dass es neben den Materialbedarfen für die Elektromobilität zusätzlich eine ganze Reihe konkurrierende Anwendungen gibt, die ebenfalls auf entsprechende Elemente zugreifen; siehe Abbildung 32.

Darüber hinaus ist die Primärproduktion einiger wichtiger Rohstoffe für die Elektromobilität wie Seltene Erdelemente (SEE), Platingruppenmetalle, Lithium oder Kobalt, etc. regional stark konzentriert. Für die Hersteller ergibt sich daraus eine hohe Abhängigkeit. Mögliche wirtschaftliche oder politisch destabilisierende Ereignisse in den Förderregionen können sich negativ auf die Rohstoffversorgungssicherheit auswirken und zu erheblichen Preisausschlägen führen, siehe SEE als aktuelles Beispiel. Dementsprechend wird sowohl innerhalb als auch außerhalb der Automobilindustrie das Bewusstsein für mögliche Kosten - und Ausfallrisiken von Rohstoffen noch weiter steigen.

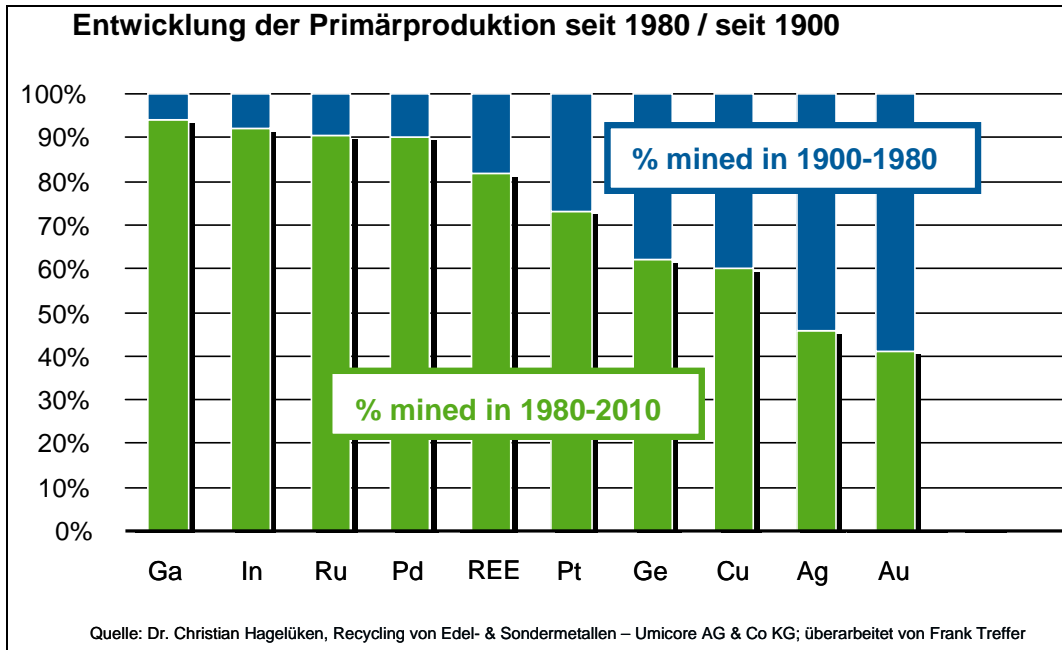


Abbildung 31 Anteil der Weltminenförderung der im Rahmen des Optum-Projektes als relevant eingestuft Technologiemetalle der letzten drei Dekaden im Vergleich zur Gesamtproduktion seit 1900

	Bi	Co	Cu	Ga	Ge	In	Li	REE	Re	Se	Si	Ta	Te	Ag	Au	Ir	Pd	Pt	Rh	Ru
Pharmaceuticals	■						■													
Medical/dentistry																				
Super alloys																				
Magnets																				
Hard Alloys																				
Other alloys																				
Metallurgical	■																			
Glass, ceramics, pigments	■																			
Photovoltaics																				
Batteries																				
Fuel cells																				
Catalysts																				
Nuclear																				
Solder	■																			
Electronic																				
Opto-electric																				
Grease, lubrication																				

Abbildung 32 Konkurrierende Anwendungen hinsichtlich der Technologiemetalle – die relevanten Elemente für Elektromobilität sind hier rot hervorgehoben.

Das Recycling von sich bereits im Wirtschaftskreislauf befindlichen Materialien wird entscheidend einen wichtigen Beitrag dafür leisten, die zukünftige Situation bezüglich der Rohstoff- / Materialversorgung zu entspannen. Ein nicht unerheblicher Teil des Bedarfes kann durch recyceltes Material gedeckt werden, ohne auf die natürlichen Ressourcen alleine zurückgreifen zu müssen. Es zeichnet sich schon jetzt ab, dass immer kostspieligere Verfahren benötigt werden, um natürliche Vorkommen zu identifizieren, zu erschließen und auszubehuten. Damit stellt sich unweigerlich die Frage nach der Wirtschaftlichkeit und der ökologischen Ausgewogenheit neuer Technologien. Insbesondere in Europa und vor allem auch in Deutschland steht aufgrund der hohen Mengen an Altprodukten ein großes und in der Zukunft wachsendes „Sekundärlager“ zur Verfügung, das bisher bei weitem nicht ausreichend genutzt wird.

Recycling von Edel- und Spezialmetallen durch Umicore

Die Umicore AG ist ein weltweit führender Anbieter edelmetallhaltiger, metallurgischer und chemischer Produkte mit über 14.500 Mitarbeitern und einem Jahresumsatz von ca. 6,94 Mrd € in 2009. Der Konzernsitz ist Brüssel. Das deutsche Tochterunternehmen Umicore AG & Co KG verfügt über umfangreiches Know-how auf den Gebieten Katalyse, Edelmetalle, Recycling und Oberflächentechnologie. Umicore gehört im Bereich der Autoabgaskatalysatoren zu den globalen Marktführern. Mit der Übernahme des ehemaligen Edelmetallgeschäfts der Degussa in 2003 hat der Geschäftsbereich Umicore Precious Metals Refining die weltweit führende Position im Bereich des Edelmetallrecyclings übernommen.

Neben allen Edelmetallen werden in großen Rückgewinnungsanlagen mit flexiblen Kapazitäten an den Standorten Belgien und Brasilien auch eine große Bandbreite von Basis- und Sondermetallen zurück gewonnen (in Summe 20 Metalle). Das Unternehmen verbindet industrielles Know-how in der Herstellung von modernen auf Edelmetall basierten Produkten mit einer über 125 Jahre langen Erfahrung im Bereich des Recyclings. In einer der weltweit modernsten Recyclinganlagen in Hoboken bei Antwerpen verarbeitet Umicore ein breites Spektrum an Sekundärmaterialien. Jährlich werden hier mittels eines komplexen pyrometallurgischen Prozesses aus über 350.000 t Einsatzmaterial (Katalysatoren, Leiterplatten, Mobiltelefone, industrielle Zwischenprodukte und Rückstände, Schlacken, Flugstäube, etc.) wertvolle Metalle mit hohen Ausbeuten zurück gewonnen (siehe Abbildung 33).

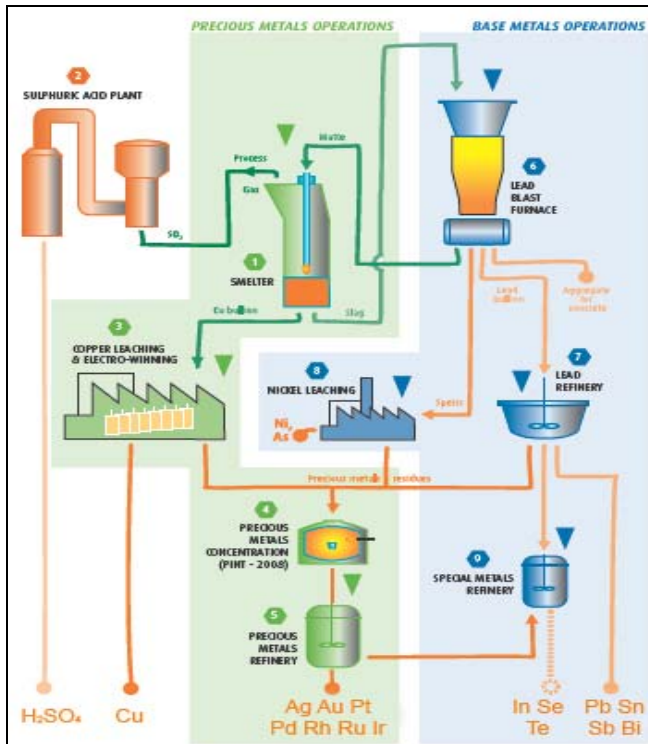


Abbildung 33 Verfahrensfliessbild von Umicore's integrierter Edelmetallhütte in Hoboken bei Antwerpen (Belgien)

Die Prozessführung wurde ursprünglich auf die Edelmetalle optimiert, so dass hohe Durchlaufzeiten und Edelmetallausbeuten erreicht wurden, bzw. werden. Durch die kombinierte Verarbeitung einer großen Bandbreite komplexer, edelmetallhaltiger Materialien lassen sich die Durchsatzquoten zusätzlich erhöhen. Gleichzeitig steigen die Flexibilität und die Unempfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen. Das in der Schmelze enthaltene Kupfer bindet die Edelmetalle und wird beim Abstich direkt granuliert und einem nachgeschalteten Elektrolyseprozess zugeführt, wo letztlich die Edelmetalle vom Kupfer getrennt werden. Die Primärschlacke durchläuft dagegen einen weiteren Hochofenprozess, bei dem Blei und andere NE-Metalle abgetrennt und wiederum, restliche Edelmetallanteile zurückgewonnen werden.

Hierbei tritt erneut Seitenstrommaterial auf, das ebenfalls wieder in den Prozesskreislauf eingesteuert wird und anschließend weiter verarbeitet werden kann. Somit können heute neben den Edelmetallen viele Sondermetalle hochwertig und effizient recycelt werden. Eine höchst wirksame Abgasbehandlungsanlage rundet das Konzept hinsichtlich der Ökologie ab, wodurch die aktuellen und zukünftigen Emissionsgrenzwerte zuverlässig eingehalten werden.

Die so vorangereicherten Konzentrate werden in spezifische, hydrometallurgische Prozesse eingeschleust, bis die einzelnen Elemente in hochreiner Form zurück gewonnen werden. Die jahrelange Praxis zeigt, dass die Verknüpfung von Vorbehandlung der EOL-Komponenten, Festlegung des Einsatzmaterials (siehe Abbildung 34), Sampling-Prozess (siehe Abbildung 35), Pyrometallurgie und Hydrometallurgie und deren ganzheitlichen Optimierung ein wesentlicher Erfolgsfaktor eines modernen Recyclingverfahrens darstellt.

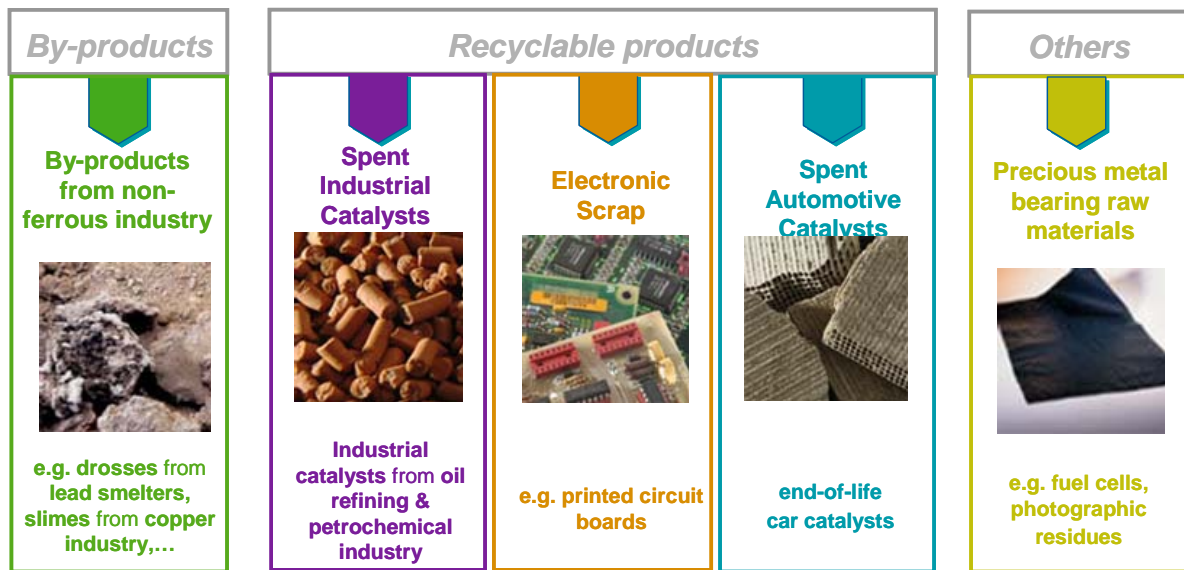


Abbildung 34 Mehr als 200 verschiedene Einsatzmaterialien verdeutlichen die hohe Bandbreite und Flexibilität des Umicore Verfahrens.

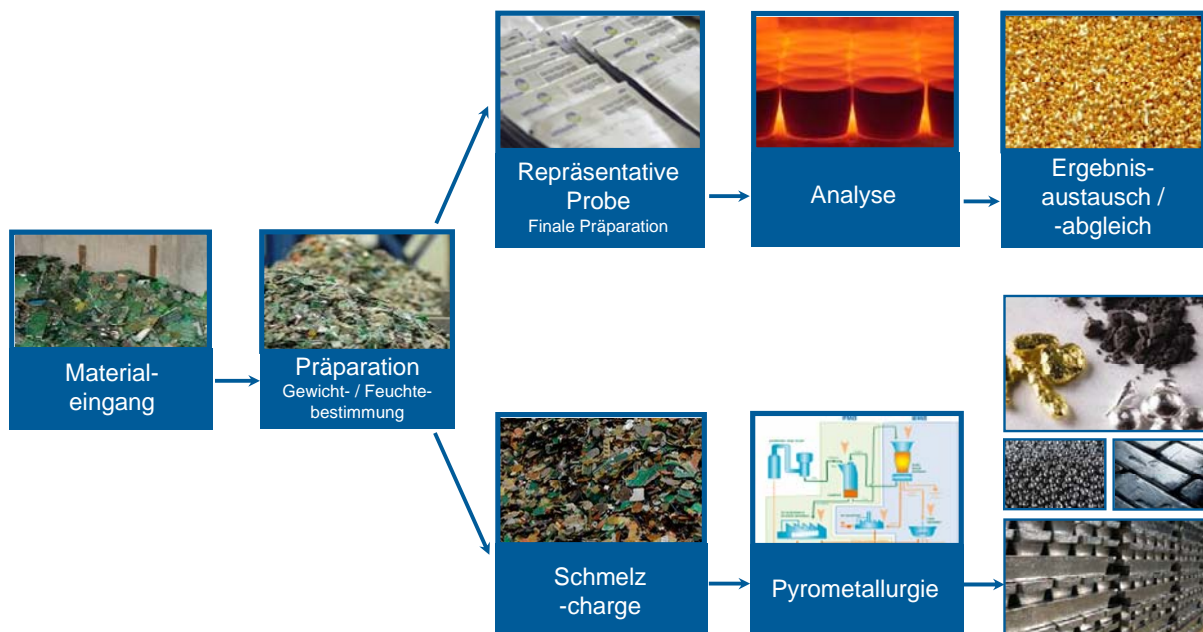


Abbildung 35 Prinzipieller Materialfluss beim Recycling von (hoch) wertvollen Sekundärmaterialien

Die so zurück gewonnenen Metalle werden bei Umicore in chemische (Vor)Produkte überführt und für die Herstellung neuer Anwendungsprodukte genutzt – damit wird der Materialkreislauf geschlossen, siehe Abbildung 36.

Im Rahmen dieser Arbeiten wurde in den letzten Jahren sehr viel Erfahrung in den Bereichen Logistik, Metallmanagement, Analytik / Sampling und Metallrückgewinnung gesammelt. Dies

stellt heute eine entscheidende Grundlage für das zukünftige Recycling von Post-Consumer Anwendungen aller Art dar.

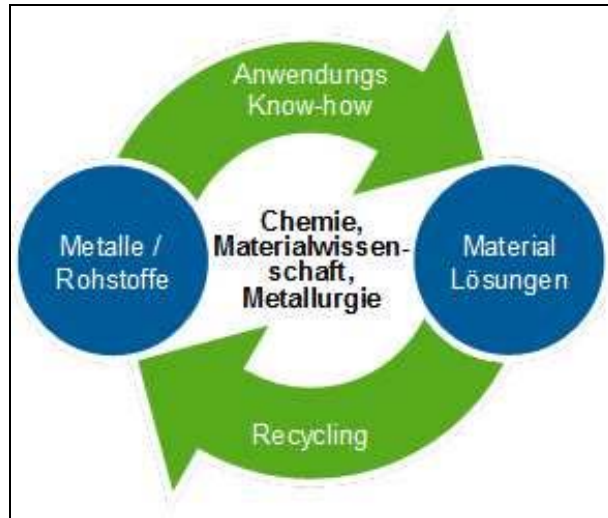


Abbildung 36 Umicore's Prinzip der geschlossenen Materialkreisläufe

Abbildung 37 zeigt die Recyclinganlage der Umicore in Hoboken, die nach dem Prinzip des ganzheitlichen Ansatzes aufgebaut und über die Jahre weiterentwickelt wurde. Hierbei sind mehrere, unterschiedliche Betriebe, angefangen von der Präparation, Voranreicherung über Recycling bis zur Raffination, in einem zusammenhängenden Konzept zusammengeschaltet worden.



Abbildung 37 Umicore's integrierte Metallhütte in Hoboken/Antwerpen. Mit einer Eingangsmenge an Sekundärmaterial von 350.000 t / Jahr ist sie die weltweit größte Recyclinganlage ihrer Art; [Hagelücken, Treffer 2011]

Neben den ressourcenschonenden Aspekten leistet ein modernes Recyclingkonzept zusätzlich wichtige Beiträge, die zukünftig an Wert gewinnen werden und für echte Nachhaltigkeit in den Produktlebenszyklen sorgen werden. Die Vorteile des Recyclings werden nachfolgend kurz zusammengefasst:

- Reduzierung der Umwelteinflüsse des Bergbaus
 - Weniger Energiebedarf/CO₂ (höhere Erzkonzentration; leichter Zugang)
 - Geringerer Land- & Wasserbedarf
 - Geringerer Einfluss auf Biosphäre (Regenwald, (Ant)arktis, Meeresbergbau, etc..)
- Verminderung von Schäden durch Emissionen, Flächenbedarfe einer falsch verstandenen Primärgewinnung
- Verminderung von geopolitischen Abhängigkeiten von Förderländern / -Firmen
- Unterstützung einer ethischen Rohstoffversorgung (transparente Versorgungskette)
- Reduzierung von Versorgungsrisiken aus primärer Koppelproduktion, siehe Abbildung 38
- Stabilisierung der Metall- / Rohstoffpreise -> Schwankungen dämpfen
 - Verbessert Bilanz zwischen Nachfrage & Angebot
 - Verlängert Reichweite der Primär-Ressourcen, verschafft Zeit bis Start neuer Minen
 - Begrenzt Spekulation (breitere Versorgungsbasis ist weniger störungsanfällig)

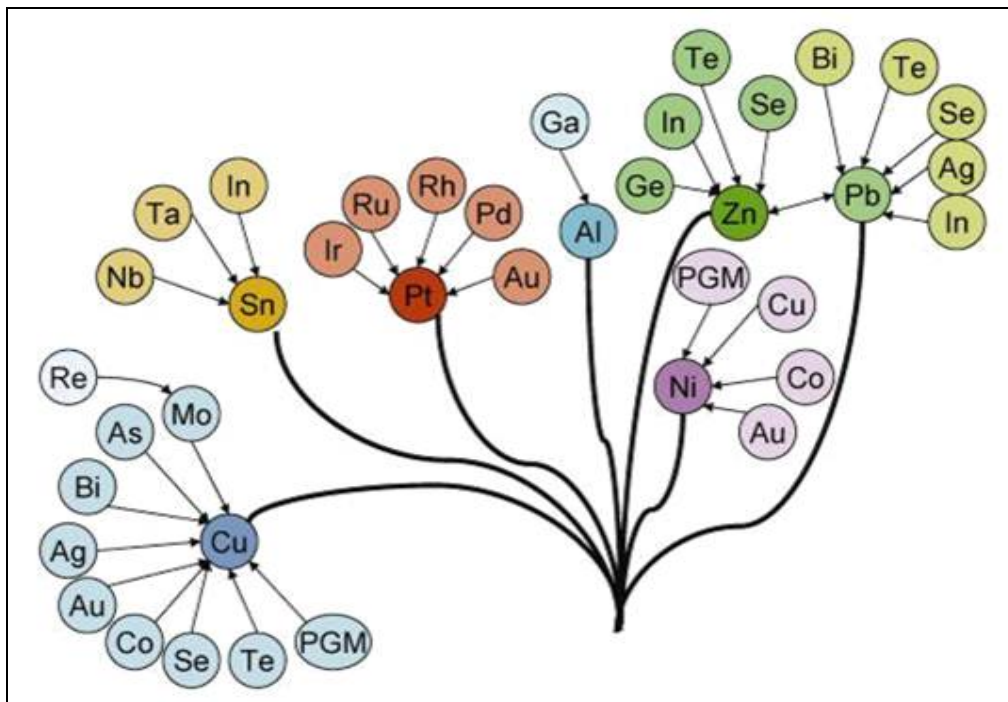


Abbildung 38 Koppelproduktion von Technologiemetallen. Die Darstellung zeigt das Verhältnis der Minor-Metalle als Nebenprodukte der Major-Metalle bei der Primärgewinnung; [Hagelüken, Meskers 2010]

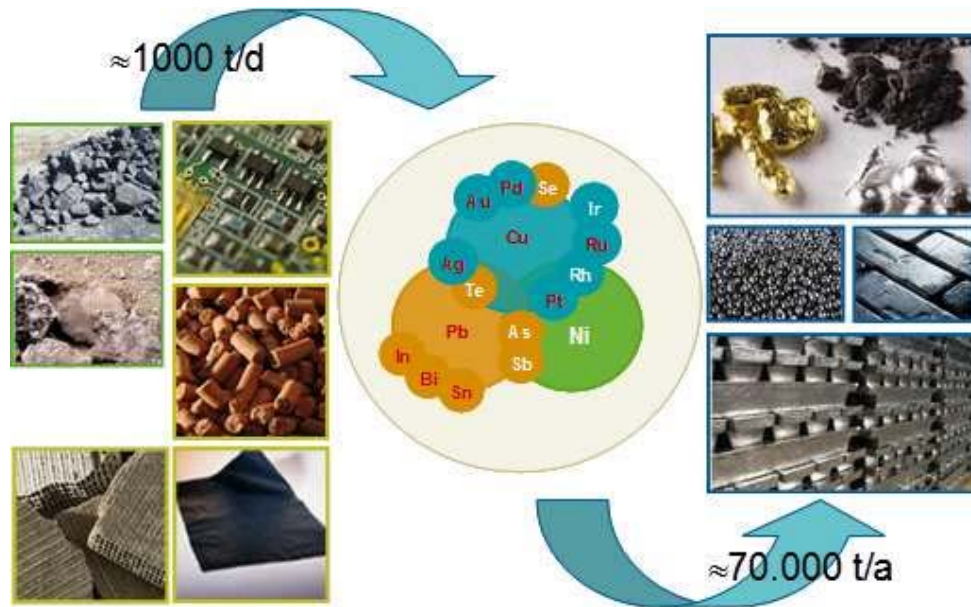


Abbildung 39 Innovative Cu, Pb und Ni – Metallurgie von Edel- und Sondermetallen; [Hagelüken, Treffer 2011]

Dies führt zu den ökologischen Aspekten des Recyclings. Modernes Recycling leistet neben den rein wirtschaftlichen Vorteilen auch ein Höchstmaß an Umweltentlastung. Verglichen werden alleine nur die erreichbaren Materialkonzentrationen aus der Primärgewinnung mit den Quoten des Recyclings. Zur Verdeutlichung wurde hier das Beispiel Platingewinnung gewählt. Für die Gewinnung von 1kg Platinmetallen, zum Beispiel aus einer südafrikanischen Mine, müssen ca. 150 t Erz aus bis zu 1.000m Tiefe abgebaut und gefördert werden. Das so geförderte Erz muss anschließend gemahlen, flotiert und schließlich pyrometallurgisch und hydrometallurgisch verarbeitet werden. Die Erze enthalten neben den PGM große Mengen an Kupfer und Nickel sowie auch nennenswerte Gehalte an Chrom, Eisen, Kobalt, Wismut, Arsen, Selen, Tellur etc. in der Regel als sulfidische Verbindungen, die abzutrennen sind. Während der Aufbereitung werden pro Kilogramm PGM nahezu 400 t Tailings und Schlacken erzeugt, welche deponiert werden müssen. Hier wird deutlich, dass neben der Naturbelastung und dem Flächenbedarf auch ein hoher Energieverbrauch entsteht. Im Vergleich hierzu befinden sich in den Gebrauchsgütern bereits deutlich höhere Konzentrationen. In ausgedienten Autoabgaskatalysatoren beispielsweise sind pro Tonne ca. 0,5 kg PGM enthalten, die mit deutlich geringerem Aufwand durch Recycling hochrein zurückgewonnen werden können. Alle Komponenten des Katalysators, sowie alle Schlacken und Abwässer werden nachbehandelt und weiterverwertet. Abbildung 40 unterstreicht die Notwendigkeit Altgaskatalysatoren und natürlich auch andere PGM-haltigen EOL-Produkte zu recyceln

anhand der SO₂ Emissionen bei der Herstellung von Katalysatoren mit primär erzeugten PGM und rezyklierten PGM.

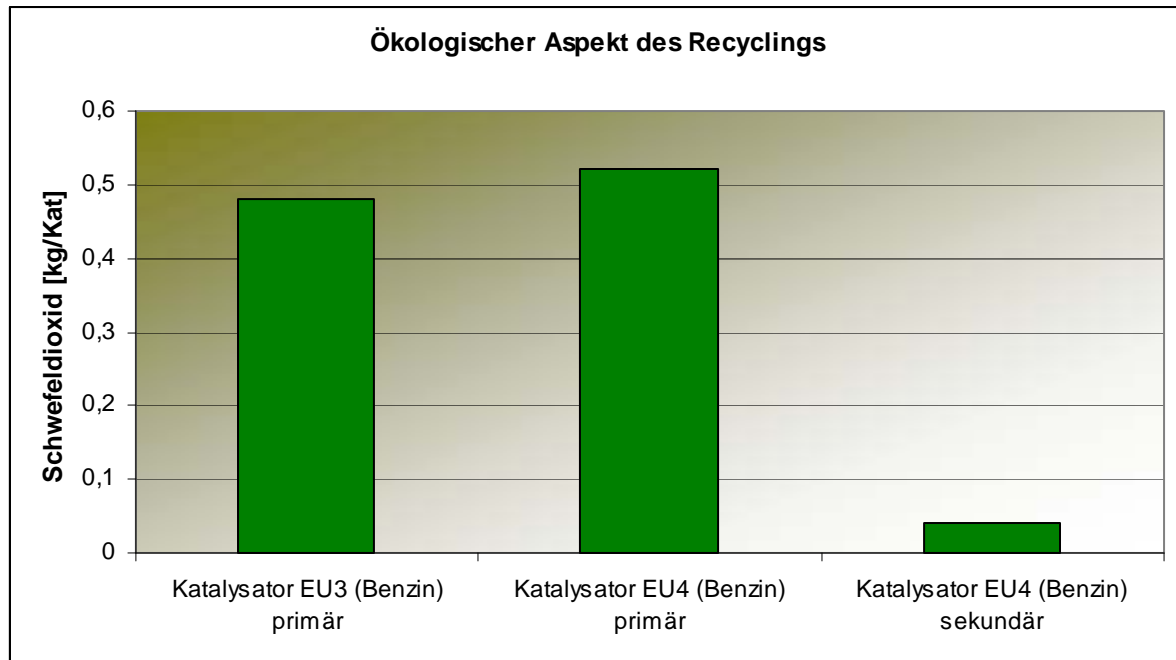


Abbildung 40 Vergleich der bei der Katalysatorherstellung emittierten SO₂ Schadstoffmengen zwischen primär gewonnenen PGM zu sekundärem PGM (Urban – Mining) – überarbeitete Grafik von F. Treffer; ursprüngliche Datenquelle [Hagelüken et al. 2005]

Es ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass der technische Fortschritt nicht ohne die Primärgewinnung stattgefunden hätte und Recycling die Primärgewinnung auch annähernd nicht vollständig ersetzen kann – zumindest nicht solange die Nachfrage nach Technologiemetallen weiterhin so stark ansteigt, wie bisher. Daher ist vielmehr die Primärgewinnung mit dem „Urban - Mining“ als komplementäre Quellen der zukünftigen Rohstoffversorgung zu verstehen. Allerdings zeigt das Beispiel der PGM Platin und Palladium bereits heute – trotz noch bestehender Optimierungspotenziale vor allem in den globalen Sammelstrukturen – welche relevanten Beiträge eine moderne Recyclingwirtschaft leisten kann. Für diese beiden Metalle wird im globalen Maßstab bereits mehr als die Hälfte der globalen Nachfrage durch Sekundärmetalle, d.h. durch Recycling von Palladium und Platin aus Industrie- und Autoabgaskatalysatoren, Altschmuck, Dentalanwendungen, Elektronikschrott etc. gedeckt [Graedel et al. 2011]. Ein wesentlicher Aspekt, der ein effizientes Recycling maßgeblich mitbestimmt, sind die tendenziell sehr geringen Konzentrationen der Technologiemetalle in den meisten Anwendungen und ihren Komponenten. Oft sind es gerade diese Elemente, die einen beträchtlichen Materialwert der Geräte bilden. Dieser Trend ist insbesondere im Fahrzeugbereich schon lange festzustellen, wo kleinere Elektronikschaltungen (edelmetallhaltig), Elektromotoren (SEE-Magnete) oder vergoldete Steckkontakte mit den verschiedensten Komponenten sehr fein und im Fahrzeug breit verteilt sind. Bei den üblichen, etablierten Verwertungsprozessen für Fahrzeuge, würden diese Elemente in den Shredderfraktionen unwiederbringlich verloren gehen.

Ganzheitliche Recyclingkonzepte sind die einzige Antwort, die Erhaltung von Wertmaterialien für den Wirtschaftskreislauf, bzw. hohe Wiedergewinnungsraten zu sichern. Recyclingkonzepte, die bereits in der Design- und Entwicklungsphase von Produkten beginnen. Durch recyclingfreundliche Konstruktionen und Materialkombinationen, sowie Sammelkonzepte, in Abstimmung mit dem Recyclingprozess wird am Ende des Produktzyklus für eine nachhaltige Verwertung frühzeitig gesorgt. Das folgende Schema soll diese Aussage verdeutlichen. In Abbildung 41 wird der Recyclingprozess von EOL-Produkte bis hin zu den wiedergewonnenen Metallen dargestellt. Das angeführte Fallbeispiel unterstreicht die Notwendigkeit, dass die beteiligten Prozesse aufeinander abgestimmt sein müssen. Es reicht alleine nicht aus, dass ein moderner Recyclingprozess 95% Rückgewinnungsquote oder höher garantiert, wenn zuvor nur 50% der EOL-Produkte erfasst werden. Denn bei im Durchschnitt recht hohen, angenommenen 90% Sortiereffizienz und 80% Aufbereitungsrate werden entlang der gesamten Recyclingkette letztlich nur 34% erreicht.



Gesamtwirkungsgrad bestimmt durch schwächstes Glied

$$\text{Beispiel: } 50\% \times 90\% \times 80\% \times 95\% = 34\%$$

Abbildung 41 Typischer Wirkungsgrad von Technologiemetall Recyclingketten; [Hagelüken, Treffer 2011]

Europäische Recyclinganlagen sind technisch in der Lage ein Großteil der Metalle mit guten Ausbeuten zurückzuholen. Es bestehen jedoch tatsächlich erhebliche Defizite in einer zielgerichteten, dem Produkt und seinen beteiligten Metallen spezifizierten Erfassung in Abstimmung mit der darauffolgenden Recyclingtechnologie (zur Vertiefung siehe auch [Öko-Institut e.V. 2009]).

Eine solche Recyclingkette wird im Detail verfahrenstechnisch anders aufzubauen sein, wenn es um die Wiedergewinnung der Technologiemetalle geht, wo die Qualität der zurückgewonnenen Elemente im Vordergrund steht als ein Konzept für das Recycling von Massenerohstoffen (z. B. Stahl und Kupferschrott), das hauptsächlich durchsatzoptimiert ist. Diese wesentliche Unterscheidung wird bei der Vergabe von Recyclingaufträgen nicht angemessen berücksichtigt. Dadurch werden „Technologiemetall-Recycler“ mit „Massenstrom-Recyclern“ verglichen und bewertet. Somit werden Zuschläge erteilt, die der Volkswirtschaft und Ökologie letztlich in signifikanter Weise schaden.

Schätzungen zufolge werden in Europa beispielsweise nur 60% der EOL-Elektrogeräte den zur Verfügung stehenden Recyclingprozessen zugeführt, wodurch der europäischen Wirtschaft insgesamt ein erheblicher Schaden an nicht genutzten Sekundärressourcen entsteht.

Zu den nichterfassenden EOL-Komponenten besteht ein großer Anteil an Verlusten durch den sogenannten „Abfalltourismus“. Hier gelangen hochwertige Materialien in die Hände von „Hinterhofbetrieben“, die mit primitivsten, aber sehr stark umweltbelastenden und gesundheitsschädlichen Mitteln arbeiten. Dabei wird lediglich eine Größenordnung von unter 30% der Wertmaterialien zurückgewonnen. Der Rest der Materialien geht verloren.

Auch bei Altfahrzeugen bestehen erhebliche Defizite. So werden nur ca. 16% der in Deutschland abgemeldeten Fahrzeuge in Deutschland verwertet. Der Rest wird von den Recyclingstatistiken nicht erfasst. Die offizielle nationale Recyclingquote von über 85% adressiert dieses Problem nicht und ist in dieser Hinsicht wenig hilfreich. Hieran lässt sich die Hauptherausforderung der Zukunft gut erkennen und ableiten. Das Recycling der Zukunft darf nicht länger alleine nur auf die Recyclingtechnologie beschränkt sein, sondern muss eine ganzheitliche Betrachtung und Bewertung des gesamten Recyclingsystems erfahren. Die Aspekte, die hierbei den Erfolg bestimmen sind:

- Die grundsätzliche Rezyklierbarkeit der Materialien
- Zugänglichkeit und Erfassbarkeit der Komponenten in der Anwendung
- Anreizsysteme zur Sammlung und Recycling von EOL-Geräten
- Entwicklung und Etablierung von stoffspezifischen Recyclingketten inklusive der abgestimmten Vorbehandlungs- und Präparationsverfahren; siehe Abbildung 42.
- Management des sekundär Materialflusses hinsichtlich der geeigneten Recyclingketten
- Aufbau von Recyclingkapazitäten mit entsprechenden Sicherungssystemen für die notwendigen Investitionen



Abbildung 42 Zusammenstellung der wichtigsten Vorbehandlungs- bzw. Präparationsverfahren

Die im Rahmen des Optum-Projektes identifizierten relevanten, prioritären Schlüsselemente für Elektromobilität werden nachfolgend auf Basis der vorgestellten Recyclingtechnologie auf Rezyklierbarkeit untersucht und bewertet. Wobei zwischen den Recyclingraten von „Post-Consumer – Komponenten“, also inklusive der dem Recycling vorgeschalteten Schritten (wie z. B. die Sammlung) und der Einschätzung der technischen Rückgewinnung der einzelnen Schlüsselemente (also eine technische Machbarkeit) unterschieden wird.

Abbildung 43 zeigt die heutigen Recyclingraten der prioritären Schlüsselemente insgesamt, einschließlich aller beteiligten Recyclingstufen entlang der genannten Recyclingketten, vergleiche Abbildung 41.

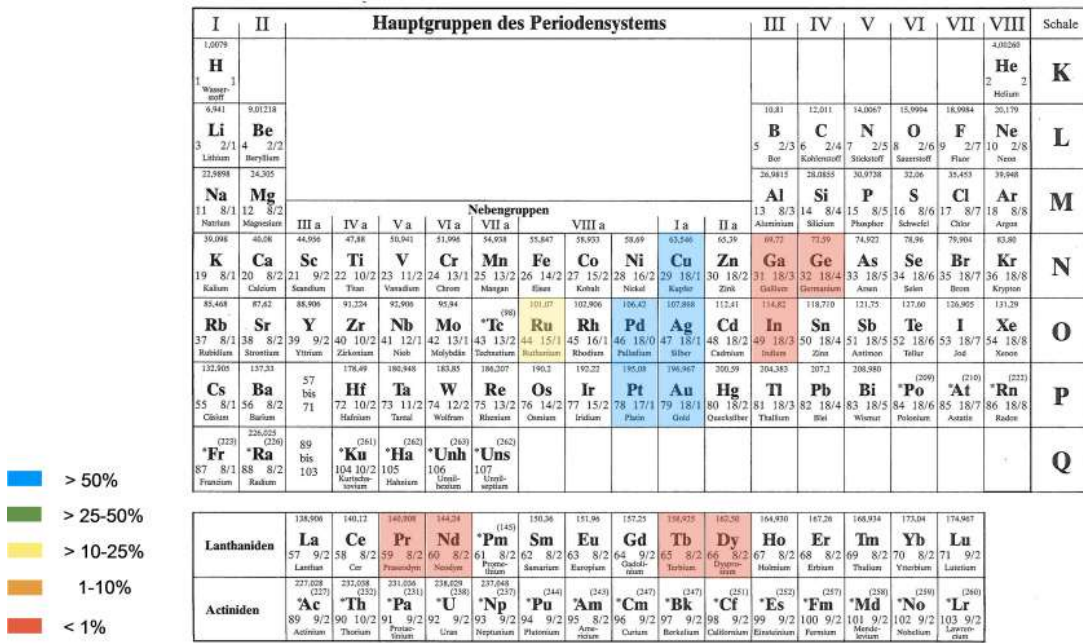


Abbildung 43 „Post-Consumer Recyclingraten“ der relevanten Schlüsselmetalle der Elektromobilität – aktuelle Einschätzung, überarbeitete Darstellung von F. Treffer, Datenquelle [Graedel et al. 2011]

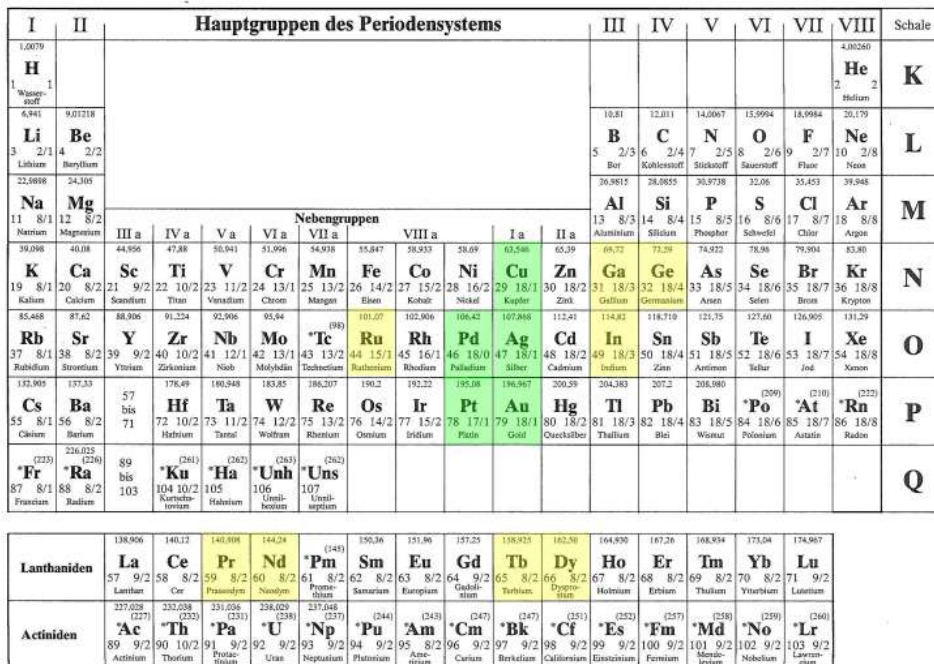


Abbildung 44 Einschätzung der Rezyklierbarkeit der relevanten Schlüsselmetalle auf Basis des vorgestellten Recyclingverfahrens – Umcore Verfahren

Wie in folgender Abbildung graphisch dargestellt ist die Rezyklierbarkeit der prioritären Schlüsselmetalle (Elemente der ersten Priorität) technisch wie folgt einzuschätzen, bzw. zu erläutern:


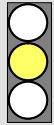
Element (1. Priorität)	Einschätzung der Rezyklierbarkeit	Wertung
Palladium	Das Recycling von Edelmetallen stellt kein metallurgisches Problem dar. Die wichtigste Voraussetzung ist eine gezielte Vorbehandlung der EOL Produkte, damit die Edelmetalle tatsächlich dem eigentlichen Recycling / Refining zugeführt werden und nicht durch eine falsche Aufbereitung in anderen Fraktionen verloren gehen.	
Silber		
Platin		
Gold		
Kupfer	Kupfer dient in pyrometallurgischen Prozessen als „Sammler“ für Edelmetalle und kann über Leaching und elektrolytische Abscheidung vollständig mit hoher Reinheit zurück gewonnen werden.	
Gallium	In niedrigen Konzentrationen bestehen kaum Chancen eines wirtschaftlichen Recyclings, ähnlich wie bei den Seltenerd-elementen (SEE) steigt die Rezyklierbarkeit mit zunehmender (Auf)Konzentration. In Pyrometallurgischen Prozessen (Umicore; Hoboken) werden Ga, Ge verdampft und in der Flugasche des behandelten Abgasstromes gesammelt.	
Germanium		
Indium	Die zumeist niedrigen Konzentrationen in den EOL-Produkten stellen für das Recycling eine Herausforderung dar. Daher wären bei In und Ru die Verluste hoch wenn diese, selbst in aufbereiteter Form, direkt zu Beginn des Recycling Prozesses eingebracht werden würden. Bei einer Einschleusung von Ru in die pyrometallurgische EM-Aufkonzentration, (Umicore; Hoboken) oder von In in den Blei Prozess (Umicore; Hoboken) ergibt sich für beide eine bessere Rückgewinnungsquote.	
Ruthenium		
Praseodym	Als Spurenelemente in komplexen Mischmaterialien gelangen die Seltenerd-elemente zumeist in die Schlacke und sind dann dort soweit verdünnt, dass sich das Recycling der einzelnen Elemente nicht lohnt. Die Rezyklierbarkeit wird deutlich erhöht bei höheren SEE Konzentrationen bereits im Produkt (s. Dauermagnete), oder über Anreicherungsverfahren in der Schlacke (s. Recycling von NiMH-Batterien; Umicore UHT). Die Recyclingverfahren / Aufbereitungsverfahren von SEE befinden sich im Entwicklungsstadium / Lösungsansätze sind zum Teil vorhanden.	
Neodym		
Terbium		
Dysprosium		

Abbildung 45 Einschätzung der Rezyklierbarkeit der prioritären Elemente

Aufgrund der langjährigen Erfahrung in der Aufbereitung und dem Recycling der PGM können sämtliche, für die Elektromobilität als relevant eingestuft Edelmetalle einschließlich Kupfer zuverlässig und effizient zurückgewonnen werden, wobei die elementbezogenen Recyclingraten im Refining zum Teil bis zu größer 95% betragen. Wie bereits oben ausführlich

beschrieben, hängt die Gesamtrecyclingrate von allen Schritten der Recyclingkette ab, daher ist den vorgelagerten Schritten wie Sammlung, Sortierung, Zerlegung usw. große Relevanz zuzuordnen.

Die Rückgewinnung von Gallium, Germanium, Indium, Ruthenium, den Seltenerdelementen Praseodym, Neodym, Terbium und Dysprosium ist dagegen ohne zusätzlichen prozesstechnischen Aufwand schwierig bis wirtschaftlich nicht sinnvoll. Aus dem Blickwinkel der Recyclingkette ist hier in den kommenden Jahren in zusätzlichen Entwicklungsaufwand zu investieren.

Trotz allem, die Chancen zur Rückgewinnung dieser „gelben“ Elemente aus EOL-Produkten sind durchaus vielversprechend, vor allem unter Berücksichtigung des ganzheitlichen Ansatzes, wo insbesondere recyclingfreundliches Design, Rücknahme- bzw. Sammelsysteme mit den Vorbehandlungsschritten (Aufkonzentrationen) und der eigentlichen Recycling- und Refiningtechnologie in einander greifen. Hauptsächlich für diese prozesstechnische Abstimmung besteht Entwicklungsaufwand, also entlang der gesamten Lebenszykluskette eines Produktes. Nur so können alle genannten Elemente zukünftig wirtschaftlich zurückgewonnen werden. Hierbei liegt der Schwerpunkt vor allem anderen Verfahrensstufen bei den Vorbehandlungsprozessen, die aufgrund des Trends zu dissipativen Elementkonzentrationen in den einzelnen Komponenten eine höhere Aufmerksamkeit verlangen und nach effizienteren Lösungen rufen. Dies wird durch erste Ergebnisse einiger Entwicklungsarbeiten insbesondere zum Thema Recycling von Ga, In und den SEE belegt.

10 Bedarfsentwicklung der Metalle für Elektromobilität im Vergleich zum Gesamtbedarf

Die Bedarfsentwicklung der Szenarien wurde in Kapitel 7 ausführlich beschrieben. Im folgenden Kapitel werden die Bedarfsentwicklung über alle Anwendungen betrachtet im Vergleich zur aktuellen Primärproduktion sowie den Bedarfsszenarien zur Elektromobilität. Die Bedarfsentwicklung über alle Anwendungen bezieht sich bei den Seltenen Erden auf das Jahr 2015 (Ausnahme Praseodym auf 2014), sowie bei Indium und Gallium auf das Jahr 2020. Diese unterschiedlichen Betrachtungszeiträume sind den unterschiedlichen hierzu verfügbaren Quellen geschuldet. Des Weiteren wird die Preisentwicklung der 12 prioritären Elemente betrachtet.

10.1 Seltene Erden

Haupteinsatzgebiet der Seltenen Erden Neodym, Praseodym und Dysprosium (hier als Metalle in Legierungen) sind Permanentmagnete. (Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete). Innerhalb der Magnetanwendungen können für das Jahr 2010 für die Elektromobilität (Pkw) nur sehr geringe Anteile festgestellt werden. Es dominieren noch zahlreiche klassische Magnetanwendungen wie z.B. PC's, Notebooks, Medizin, Lautsprecher, Elektromotoren für Industrie und sonstige industrielle Anwendungen (vgl. [Öko-Institut e.V. 20119]). Die Wachstumsraten der Magnetanwendungen liegen mit ca. 12,5% pro Jahr bis 2014 höher als bei

anderen Anwendungen der Seltenen Erden (5-8% pro Jahr). Dabei steigt der Anteil der Magnetanwendungen für Neodym und Praseodym auf ca. 80% bzw. 74% an. Dieser Anteil könnte bis 2020 bzw. 2030 noch weiter zunehmen.

Nach den Ergebnissen des Projektes OPTUM-Ressourcen sowie weiteren Arbeiten des Öko-Instituts wird die Elektromobilität über 2020 bis 2030 bedeutende Anteile an den Magnetanwendungen für die Seltenen Erden erreichen (insbesondere Dysprosium). Ebenfalls wird die Windkraft zukünftig steigende Anteile benötigen. Die beiden Anwendungen Elektromobilität und Windkraft sind starke Nachfragetreiber in der Zukunft.

Nach den heutigen Erkenntnissen werden auch bis 2020 bzw. 2030 die Magnetanwendungen der entscheidende Wachstumstreiber für Neodym, Praseodym und Dysprosium insgesamt bleiben. Nur entscheidende Innovationen der Magnet- oder Motorentechnologien könnten diesen Trend aufhalten.

10.1.1 Neodym

Neodym wird eingesetzt in den Anwendungsbereichen Magnete (ca. 77%), Batterien¹¹ (ca. 12%), Keramik (ca. 3%), Glas (ca. 2%), Katalysator (ca. 1%) und sonstigen Anwendungen (ca. 5%) (siehe Abbildung 46).

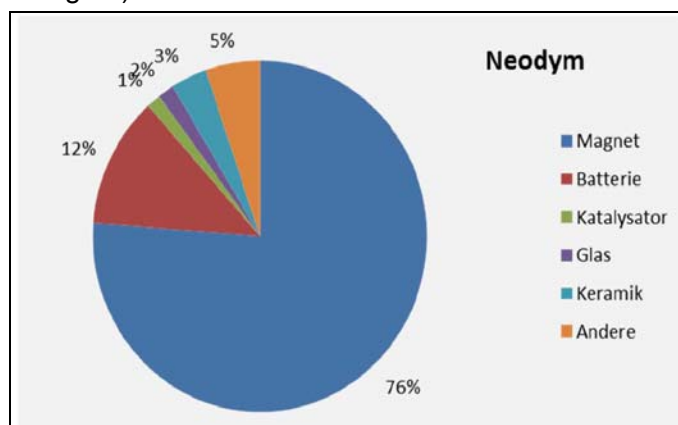


Abbildung 46 Anwendungsbereiche von Neodym 2010 (Kalkulation Öko-Institut)

Der Anteil der Magnetanwendungen von Neodym im Jahr 2010 für die Elektromobilität (Pkw) innerhalb der Magnetanwendungen liegt bei ca. 0,25% (eigene Kalkulation Öko-Institut). Für die Zukunftstechnologie Windkraft ist ein Anteil der Magnetanwendungen im Jahr 2010 von ca. 2% festzustellen. Die Neodym-Bedarfe zeigen ein starkes Wachstum bis 2015. Vor dem Hintergrund der stark wachsenden konkurrierenden Anwendungen und der Export-Restriktionen aus dem Hauptförderland China ist dieser Wachstumspfad als kritisch anzusehen.

¹¹ Es ist zu beachten, dass Neodym bei den Batterien als Mischmetal (NiMH) eingesetzt wird und in der Primärproduktion nicht separiert werden muss.

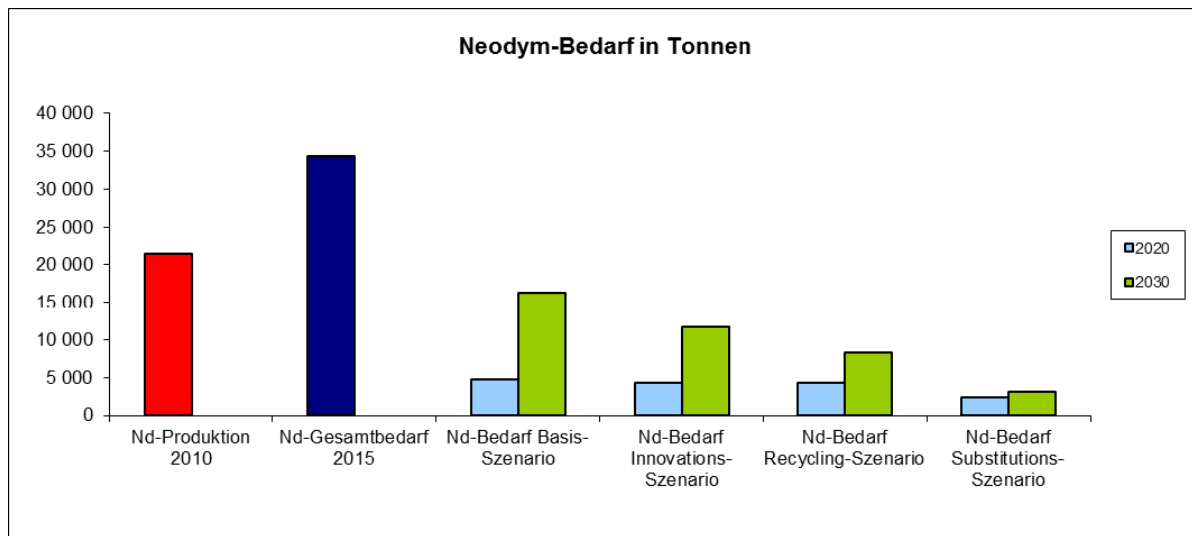


Abbildung 47 Neodym-Gesamtbedarfe in Tonnen [IMCOA 2011, Öko-Institut e.V. 2011, Berechnungen Öko-Institut e.V.]

Nach den Ergebnissen des Projektes sowie weiteren Studien des Öko-Instituts bezüglich Seltenen Erden und Windkraft ist von einem starken Anstieg des Anteils an den gesamten Neodym-Magnetanwendungen auszugehen. Nach Kalkulationen des Projektteams könnte der Anteil der Elektromobilität bis 2020 für Neodym auf bis zu 12% und bis 2030 auf 12-25% an den Neodym-Magnetanwendungen ansteigen.

Der Preis von Neodym ist in den vergangenen Jahren stark angestiegen. Vor 10 Jahren lag das Preisniveau für ein Kilogramm Neodym-Metall bei ca. 15 USD und sank bis auf 6,4 USD / kg im Jahr 2003. Bis Anfang 2010 pendelte der Preis zwischen 17 und 50 USD / kg Neodym. In 2010 stieg der Preis explosionsartig an, was sich in 2011 fortsetzte. Grund für den Preisanstieg liegt in der Exportbeschränkung der Seltenen Erden aus China, wo zu 97% die Seltenen Erden gefördert werden. Der Höchstpreis lag bei knapp 500 USD / kg im Spätsommer 2011. In den vergangenen Wochen konnte ein leichter Preisrückgang verzeichnet werden. Die VR China veranlasste daraufhin die vorübergehende Einstellung der Produktion von Seltenen Erden, um den Preis auf hohem Niveau zu halten [Spiegel 2011]. Sowohl die Rohstoffpolitik der VR China als auch die noch fehlenden Konkurrenten auf dem Rohstoffmarkt der Seltenen Erden lassen vermuten, dass sich in der nahen Zukunft das Preisniveau von Neodym auf ähnlich hohem Niveau fortsetzt; zumal die Gesamtnachfrage wächst. Die genaue zukünftige Preisentwicklung ist allerdings nicht vorhersehbar.

10.1.2 Praseodym

Die Anwendungsbereiche von Praseodym (siehe auch Abbildung 48) liegen in Magneten (ca. 71%), Batterien¹² (ca. 10%), Polierpulver (ca. 6%), Keramiken (ca. 5%), Katalysatoren (ca. 3%), Glas (ca. 1%) und sonstigen Anwendungen (ca. 4%).

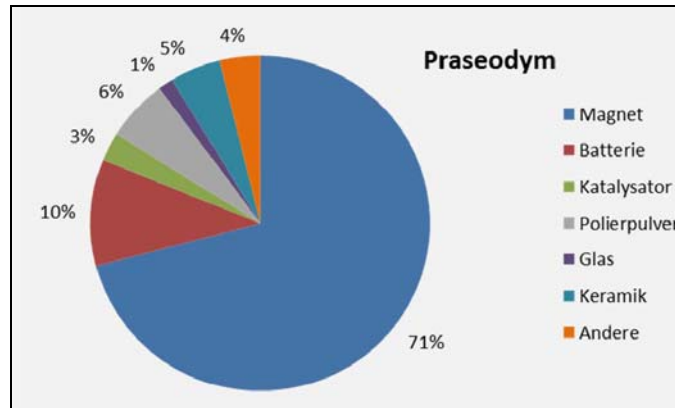


Abbildung 48 Anwendungsbereiche von Praseodym (Kalkulation Öko-Institut)

Der heutige Anteil der Magnetanwendungen von Praseodym für die Elektromobilität (Pkw) innerhalb der Magnetanwendungen liegt bei ca. 0,25% (eigene Kalkulation Öko-Institut).

Die Gesamtbedarfe für Praseodym steigen von 2010 bis 2014 um ca. 50%.

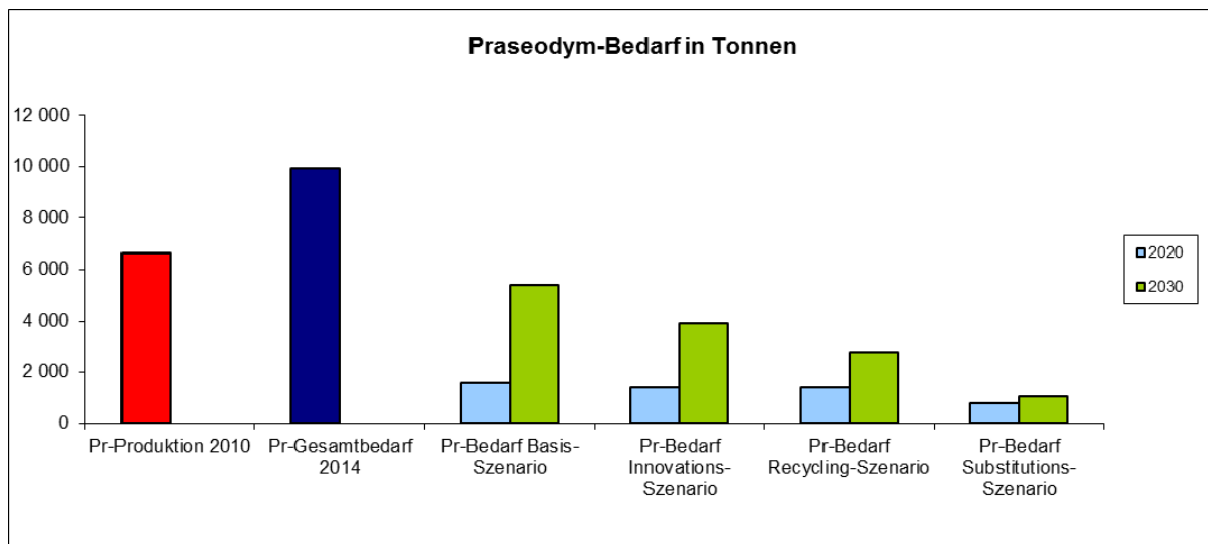


Abbildung 49 Praseodym-Gesamtbedarfe in Tonnen [Öko-Institut e.V. 2011, Berechnungen Öko-Institut e.V.]¹³

¹² Es ist zu beachten, dass Praseodym bei den Batterien als Mischmetal (NiMH) eingesetzt wird und in der Primärproduktion nicht separiert werden muss.

¹³ Pr-Gesamtbedarf 2014: Es wurde sich auf die Studie „Study on Rare Earths and Their Recycling“ bezogen und der Mittelwert der Angaben von Lynas 2010a und IMCOA/Kingsnorth berechnet.

Nach Kalkulationen des Projektteams könnte der Anteil der Elektromobilität bis 2020 für Praseodym auf bis zu 12% und bis 2030 auf 12-25% an allen Neodym-Magnetanwendungen ansteigen.

Die Preisentwicklung von Praseodym verläuft parallel zu der Neodym-Preisentwicklung. Es ist ein starker Preisanstieg von Praseodym (Metall) in den vergangenen Jahren festzustellen. Vor 10 Jahren lag das Preisniveau für ein Kilogramm Praseodym (Metall) bei ca. 9 USD und sank bis auf 6 USD / kg im Jahr 2002/2003. Bis Anfang 2010 pendelte der Preis zwischen 10 und maximal 50 USD / kg Praseodym. In 2010 stieg ebenfalls der Preis von Praseodym sehr stark an, was sich in 2011 fortführte. Der Höchstpreis lag bei ca. 280 USD / kg im Spätsommer 2011. In den vergangenen Wochen konnte ein leichter Preisrückgang verzeichnet werden, der geringer ausfiel als bei Neodym. Die zukünftige Preisentwicklung ist nicht vorhersehbar, allerdings lassen die Rohstoffpolitik der VR China als auch die noch fehlenden Konkurrenten auf dem Rohstoffmarkt der Seltenen Erden ein vergleichbares Preisniveau in der nahen Zukunft annehmen.

10.1.3 Dysprosium

Dysprosium wird zu 100% in Magneten eingesetzt. Innerhalb der Magnetanwendungen liegt heute der Anteil der Magnetanwendungen im Elektrofahrzeug bei ca. 1,4% (eigene Kalkulation Öko-Institut). Für die Zukunftstechnologie Windkraft beträgt der Anteil an den Magnetanwendungen heute ca. 5%. Bis 2020 könnte nach Einschätzung des Öko-Instituts der Anteil der Magnetanwendungen allein für die Elektromobilität auf 60% und bis 2030 auf 65-90% steigen.

In Abbildung 50 wird der sehr große Dysprosium-Bedarf für den Bereich der Elektromobilität deutlich.

Nach den Szenarien-Bedarfsanalysen in dem Projekt OPTUM-Ressourcen steigen die Dysprosiumbedarfe sehr stark an.

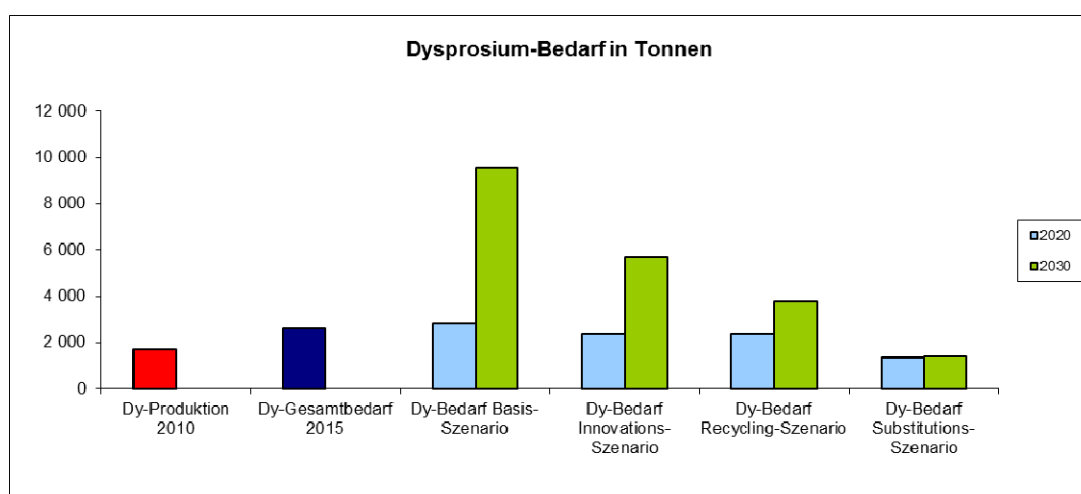


Abbildung 50 Dysprosium-Bedarfe in Tonnen [BGR 2011, IMCOA 2011, Öko-Institut e.V. 2011, Berechnungen Öko-Institut e.V.]

Die Preisentwicklung von Dysprosium (Metall) zeigt den stärksten Anstieg bei den Seltenen Erden. Bei einem Preis von ca. 40 USD / kg Dysprosium noch vor 10 Jahren und einem zwischenzeitlichen Preisverfall auf knapp 30 USD / kg in 2003 stieg der Preis in den folgenden Jahren kontinuierlich auf ca. 150 USD bis Ende 2009. Im Jahr 2010 ist auch bei Dysprosium der Preisanstieg festzustellen, der allerdings am stärksten ausfiel. Mit 3.100 USD / kg Dysprosium wurde der Höchstpreis im Spätsommer 2011 erreicht. Eine leichte Preisdämpfung ist auch bei Dysprosium in den vergangenen Wochen festzustellen. Der Preis liegt aber weiterhin auf einem sehr hohen Niveau. Die zukünftige Preisentwicklung lässt ein ähnlich hohes Preisniveau vermuten aufgrund der Rohstoffpolitik Chinas, fehlender Angebote sowie der stark wachsenden Nachfrage.

10.1.4 Terbium

Die Einsatzbereiche von Terbium liegen in 2010 zu ca. 89% in Leuchtmitteln und ca. 11% in Magneten. Innerhalb der Magnetanwendungen liegt der Anteil der Magnetanwendungen des Elektrofahrzeugs bei ca. 5,7%. Bis 2014 nehmen die Magnetanwendungen leicht zu auf ca. 13%. (eigene Kalkulation Öko-Institut)

In Abbildung 51 wird der zusätzliche Bedarf an Terbium durch die Elektrifizierung des Automobilsektors nach den verschiedenen Szenarien für die Jahre 2020 und 2030 verdeutlicht.

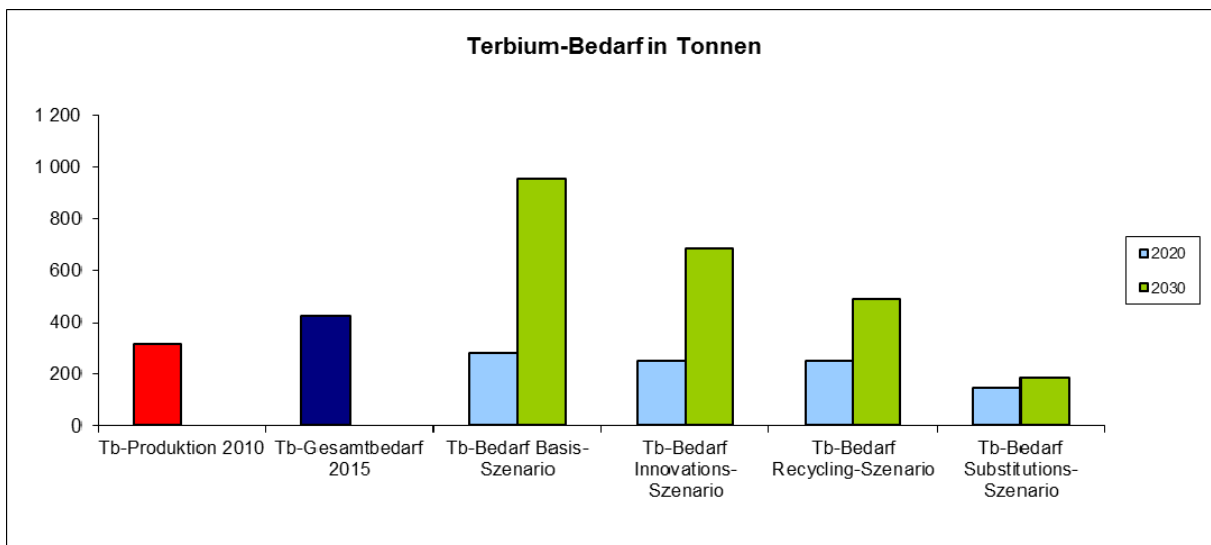


Abbildung 51 Terbium-Bedarfe in Tonnen [BGR 2011, IMCOA 2011, Öko-Institut e.V. 2011, Berechnungen Öko-Institut e.V.]

Der Preisverlauf für das Metall Terbium verläuft ähnlich der anderen Seltenen Erden. Das Preisniveau vor 10 Jahren lag bei ca. 300 USD / kg Terbium. Zwischenzeitlich sank der Preis auf knapp 180 USD / kg in 2003 und pendelte sich in den Folgejahren zwischen 400 und 900 USD ein. Anfang 2010 ist wie bei den anderen Seltenen Erden der starke Preisanstieg zu verzeichnen. Im Spätsommer 2011 lag der Preis für ein Kilogramm Terbium bei knapp 5.000 USD. Auch bei Terbium ist eine leichte Preisdämpfung in den vergangenen Wochen festzu-

stellen. Die Rohstoffpolitik Chinas, die noch fehlenden Wettbewerber auf dem Angebotsmarkt der Seltenen Erden und die stark wachsende Nachfrage deuten auf weiterhin hohe Preise hin. Allerdings ist die zukünftige Preisentwicklung nicht vorhersehbar.

10.2 Gallium

Die wesentlichen Anwendungsbereiche von Gallium liegen in integrierten Schaltungen, der Photovoltaik, der Optoelektronik wie z.B. LED's oder Dioden sowie speziellen Legierungen.

Die Gallium-Bedarfe über alle Anwendungen sind für 2010, 2015 und 2020 in Abbildung 52 nach den jeweiligen Anteilen der Anwendungsfelder dargestellt.

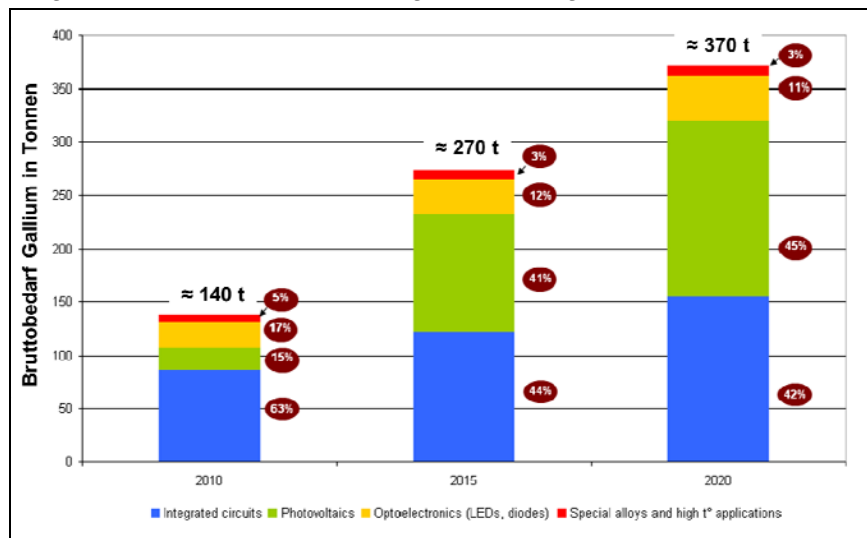


Abbildung 52 Gallium-Bedarfe nach Anwendungen 2010, 2015, 2020 [EU critical raw materials 2010]

Bis 2020 wird von einem sehr starken Nachfragewachstum von ca. 16% pro Jahr ausgegangen. Bis 2030 liegt die geschätzte Nachfragesteigerung bei 14% p.a. Da das Galliumpotential aus der gegenwärtigen globalen Bauxitförderung bei weitem nicht ausgeschöpft wird, stehen hier Möglichkeiten zur Verfügung, die wachsende Nachfrage zu bedienen. Voraussetzung hierbei ist aber ein rechtzeitiger Anstoß zur Optimierung der Galliumgewinnung aus Bauxit im Rahmen der Tonerdegewinnung. In Abbildung 53 werden die zukünftigen Bedarfe für Gallium zum einen über alle Anwendungen bis 2020 dargestellt und zum anderen werden die Ergebnisse der Galliumbedarfe für die Elektromobilität aus den einzelnen Szenarien für 2020 und 2030 abgebildet.

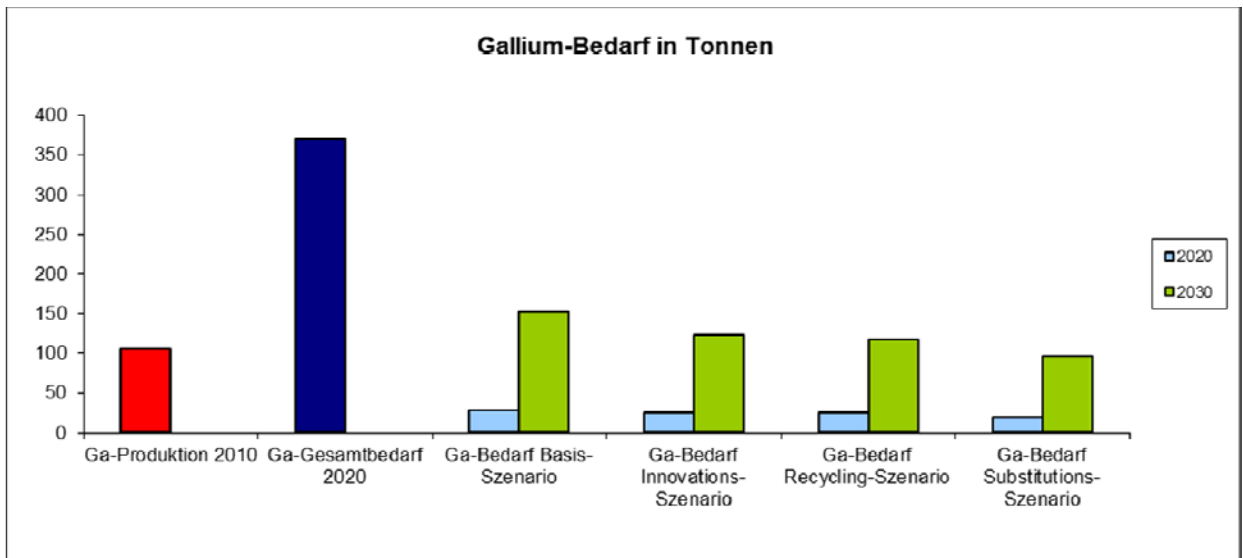


Abbildung 53 Gallium-Bedarf in Tonnen [USGS 2011, EU critical raw materials 2010, Berechnungen Öko-Institut e.V.]

Die Preisentwicklung von Gallium zeigt im Vergleich zu den Seltenen Erden ein gänzlich differenziertes Bild. Vor 10 Jahren lag das Preisniveau von einem Kilogramm Gallium zwischen 300 und einem kurzzeitigen Peak auf 2.000 USD / kg. Bis 2006 ist ein Preisverlauf auf einem Niveau um 300 USD / kg Gallium festzustellen. In den vergangenen Jahren ist ein leicht steigendes Preisniveau auf ca. 700 – 800 USD / kg zu verzeichnen. Die zukünftige Preisentwicklung ist nicht vorhersehbar. Allerdings ist hier auf das starke Nachfragewachstum von Gallium hinzuweisen.

10.3 Indium

Das Hauptanwendungsgebiet von Indium liegt in der Display-Technik mit 83% in 2010. Des Weiteren wird Indium im Bereich Photovoltaik, Legierungen und Halbleiter eingesetzt. Das Nachfragewachstum für Indium wird auf 8,7% p.a. geschätzt [EU critical raw materials 2010]. Bis 2030 könnten Steigerungsraten in ähnlicher Größenordnung auftreten. Das Anwendungsgebiet der Elektromobilität nimmt bei Indium keinen mengenmäßig ausschlaggebenden Charakter ein. Jedoch ist aufgrund der sehr stark wachsenden Nachfrage im Bereich Photovoltaik die Konkurrenz dieses Sektors sehr groß. Mögliche Spannungen bei der Versorgung würde daher auch die Elektromobilität nicht unberührt lassen.

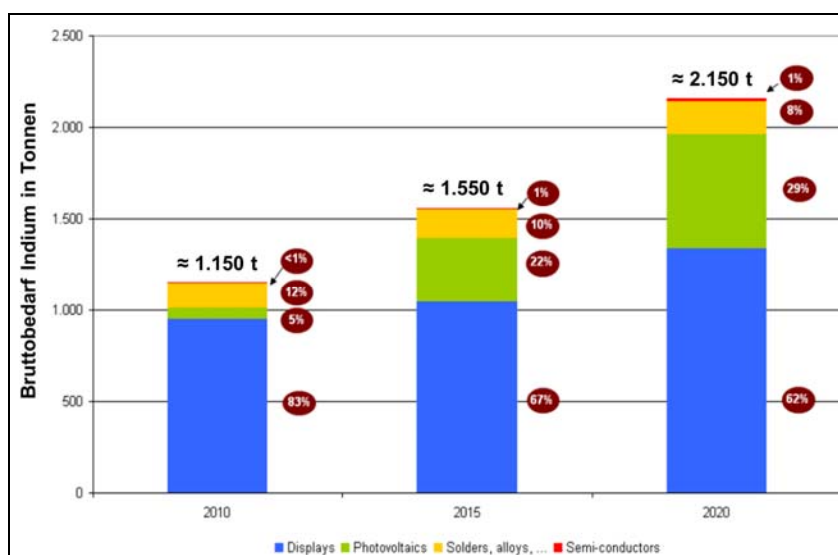


Abbildung 54 Indium-Bedarfe nach Anwendungen 2010, 2015, 2020 [EU critical raw materials 2010]

Der Preisverlauf von Indium in den vergangenen Jahren zeigt ein eher heterogenes Bild. Vor 10 Jahren lag das Preisniveau für ein Kilogramm Indium bei ca. 90 USD. Ein starker Preisanstieg auf über 1.000 USD je Kilogramm Indium ist in den Jahren 2005 / 2006 zu verzeichnen. Anschließend sank der Preis auf ca. 300 USD in 2009 und steigt seither kontinuierlich mit phasenweisen Abschwüngen. Das derzeitige Preisniveau liegt bei ca. 700 USD je Kilogramm Indium.

10.4 Kupfer

Kupfer besitzt eine Vielzahl an Anwendungsfeldern. Neben dem Hauptanwendungsgebiet der Übertragung von elektrischer Energie¹⁴ (ca. 26%) liegen weitere Verwendungssegmente in der Wasserversorgung, den Wärmetauschern für Haushaltsgeräte, Verbraucherprodukten¹⁵, Mechanischen Bauteilen¹⁶, Daten- und Signalübertragung, Architektur¹⁷ und in Antriebsmotoren für Schienenfahrzeuge und Schiffe und der Standard-Kfz-Verkabelung sowie Elektromotoren [Fraunhofer ISI 2010].

Die Elektrifizierung des Pkw-Antriebes führt zu einem Nachfragewachstum an Kupfer im Automobilsektor. Das jährliche Nachfragewachstum über alle Anwendungen wird bis 2020 und 2030 auf 5,3% geschätzt [Fraunhofer ISI 2010]. Die Marktdurchdringung der Elektromobilität bewirkt zwar auch einen Beitrag zum Nachfragewachstum wie die Szenarioergebnisse dieses Projektes gezeigt haben. Allerdings ist der Einfluss der Elektromobilität

¹⁴ In Form von Starkstromerkabel, Seekabel, Stromleitungen in Gebäuden usw.

¹⁵ Z.B. Türklinken, Herde, Öfen, Münzen, Schmuck, Lote

¹⁶ Z.B. Bleche, Messingventile, Lagerwerkstoffe

¹⁷ Z.B. Dächer, Fassaden, Regenrinnen

auf die globale Gesamtnachfrage nach Kupfer aufgrund des sehr breiten Anwendungsspektrums von Kupfer nur moderat.

In 2002 lag der Kupferpreis bei 1,4 USD je Kilogramm und stieg kontinuierlich bis 2006 auf knapp 8 USD je Kilogramm. Dieses Preisniveau wurde mit Schwankungen gehalten bis Sommer 2008. Der Preiseinbruch durch die Finanzkrise führte zu einem Preisverfall auf 2,80 USD je Kilogramm Kupfer. Anschließend erholte sich der Kupferpreis wieder und lag Anfang 2011 bei 10 USD je Kilogramm. Derzeit liegt der Kupferpreis bei 7,3 USD je Kilogramm [Finanzen 2011], die zukünftige Preisentwicklung ist nicht vorhersehbar.

10.5 Gold

Der Hauptanwendungsbereich der industriellen Goldproduktion liegt mit ca. 75% in der Uhren- und Schmuckherstellung. Neben der Zahnmedizin, der Lebensmittelindustrie (Blattgold) und dem Kunsthandwerk wird Gold auch verwendet im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik, insbesondere der IT- und Unterhaltungselektronik sowie dem Investment [Gold Infos 2011]. Zum Nachfragewachstum von Gold bis 2020 und 2030 liegen keine aktuellen Quellen vor. Die Analyse der Nachfrageentwicklung in den vergangenen zehn Jahren lässt auf eine weitgehend konstante Nachfrage schließen. Aufgrund der ausgereiften Recyclingstrukturen für Edelmetalle (inkl. Gold) kann auch ein moderates Nachfragewachstum durch verstärktes Recycling z.B. von Altschmuck, Dentalmaterial und Elektronik in der Zukunft hinsichtlich des Drucks auf die Primärressourcen gedämpft werden. Nichtsdestotrotz ist für Gold eine Untersuchung hinsichtlich der Nachfrageentwicklung und Angebotsbefriedigung wichtig, da der Goldbergbau mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden ist.

Die Preisentwicklung von Gold zeigt einen dauerhaften Anstieg in den vergangenen 10 Jahren. Dies hängt u.a. mit der wachsenden Verschuldung öffentlicher Haushalte und der damit verbundenen Schwächung des US Dollars zusammenhängen [Gold 2011]. Vor 10 Jahren lag der Goldpreis bei ca. 9.000 USD / Kilogramm. Der kontinuierliche Preisanstieg in den vergangenen Jahren führte dazu, dass das Allzeithoch von 1980 im Sommer 2011 überschritten wurde mit einem Preis von knapp 52.000 USD / Kilogramm [Metal Markets 2011]. Die zukünftige Preisentwicklung ist nicht vorhersehbar.

10.6 Silber

Silber wird vor allem verwendet für die Schmuck- und Silberwarenindustrie (ca. 34%), elektrischen und elektronischen Anwendungen (ca. 24%), Photographie / Spiegel (ca. 20%) und den Katalysatoren (ca. 6%). Weitere 16% fallen in den Bereich der sonstigen Anwendungen (Solarpanel, Batterien, Plasma-Bildschirme) [EU critical raw material 2010]. Die zukünftige Silber-Nachfrage wird bis 2020 bzw. 2030 um ca. 3,8% jährlich steigen [EU critical raw material 2010]. Vor allem die steigende Nachfrage an RFID-tags und der zunehmende Einsatz von Solaranlagen wird die Silbernachfrage in der Zukunft beeinflussen.

Die Preisentwicklung der letzten 10 Jahr von Silber zeigt ein nahezu stetig steigendes Bild, mit Ausnahme des Preiseinbruchs Ende 2007 (Finanzkrise). Im Jahr 2001 lag der Silberpreis je Kilogramm bei ca. 130 USD. Ein kontinuierlicher Preisanstieg bis Ende 2007 auf ca. 640

USD je Kilogramm ist zu verzeichnen. Der Preiseinbruch durch die Finanzkrise ließ den Silberpreis auf knapp unter 320 USD je Kilogramm fallen, um daraufhin stetig zu steigen. Im Frühjahr 2011 stieg der Silberpreis nahezu an den historischen Silberhöchstpreis aus dem Jahr 1980 (1.566 USD / kg) mit 1.560 USD / kg. Eine leichte Preisdämpfung in 2011 führt zu einem aktuellen Preis von knapp 1.030 USD je Kilogramm Silber [Silber 2011]. Die zukünftige Preisentwicklung ist nicht vorhersehbar.

10.7 Germanium

Germanium findet vor allem Anwendung in den Bereichen der faseroptischen Systeme (ca. 30%), Infrarot-Optik (ca. 25%), Polymerisations-Katalysator (ca. 25%), Teile für Elektro- und Solargeräte (ca. 15%) sowie sonstigen Bereichen wie z.B. Medizin (ca. 5%) [EU critical raw materials 2010]. Für das zukünftige Nachfragewachstum ist von einer Verachtfachung des Bedarfs für die faseroptischen Systeme auszugehen. Hinzu kommen Steigerungen des Bedarfs für die anderen Anwendungen wie z.B. Nachtsichtgeräte im Automobilbereich [EU critical raw materials 2010]. In Summe wird das Nachfragewachstum bis 2020 bzw. 2030 auf ca. 5% pro Jahr geschätzt (Kalkulation Öko-Institut).

Generell ist die Datengrundlage für Germanium im Vergleich zu den anderen Metallen eher gering. Informationen zu Germanium sind vielfach unter Verschluss durch die sensiblen Anwendungen im militärischen Bereich (z.B. Nachtsichtgeräte etc.). Das British Geological Survey wird Anfang nächsten Jahres eine Studie herausgeben, in der u.a. Germanium intensiv untersucht wurde unter Mitwirken der BGR.

Der Preis für Germanium lag in 2004 bei ca. 500 USD je Kilogramm. Ein stetiger Preisanstieg auf knapp 1.600 USD / kg ist bis zum Sommer 2006 zu verzeichnen. Anschließend sank der Preis wieder auf knapp 800 USD in 2010. Seit Ende 2010 steigt der Preis wieder kontinuierlich an und liegt derzeit auf dem Preisniveau von Sommer 2006. Die zukünftige Preisentwicklung ist nur schwer vorhersehbar. Steigende Nachfrage aber auch unsichere Datengrundlagen erschweren die Einschätzung zusätzlich.

10.8 Platingruppenmetalle

Die Anwendungsbereiche von Platin liegen neben dem Autoabgaskatalysator (ca. 40%) in den Bereichen Schmuck (ca. 31%), Industrie-Anwendungen (ca. 21%) und Investment (ca. 8%) [Johnson Matthey 2011]. Palladium findet vor allem Anwendung in dem Bereich der Autoabgaskatalysatoren (ca. 57%), den Industrie-Anwendungen (ca. 26%), dem Investment (11%) und der Schmuckindustrie (6%) [Johnson Matthey 2011].

Die jährlichen Wachstumsraten bis 2030 werden bei Platin und Palladium auf jeweils ca. 3% geschätzt (eigene Kalkulation Öko-Institut). Die Preisentwicklungen von Platin und Palladium sind differenziert voneinander zu betrachten, da sie nicht immer parallel verlaufen.

Die Preisentwicklung von Platin zeigt größere Schwankungen in den vergangenen 10 Jahren. In 2001 sank das Preisniveau auf ca. 14.000 USD / kg Platin. In den folgenden Jahren stieg der Preis kontinuierlich bis Sommer 2008 auf den Höchstpreis von ca. 66.000

USD je Kilogramm Platin. Aufgrund der Finanzkrise kam es bis Ende des Jahres 2008 zu einer deutlichen Preissenkung (ca. 27.000 USD / kg). Seither steigt der Platinpreis kontinuierlich mit einer schwachen Dämpfung in den vergangenen Wochen. Derzeit liegt der Platinpreis auf einem Preisniveau von ca. 49.000 USD / kg [Johnson Matthey 2011a].

Die Preisentwicklung von Palladium zeigte in der Vergangenheit ebenfalls Schwankungen. Von 1997 bis Januar 2001 stieg der Preis von 4.000 USD / kg auf 35.000 USD / kg, um bis Ende 2002 wieder auf ein Niveau von 8.000 USD abzufallen [Hagelüken, Buchert, Stahl, 2005]. Der Palladiumpreis ist seither nicht mehr über den Platinpreis gestiegen und spiegelt den Platinpreisverlauf auf niedrigerer Ebene wider. So stieg auch der Palladiumpreis bis 2008 an (ca. 15.000 USD/kg), um zum Ende des Jahres 2008 eine deutliche Preissenkung zu verzeichnen (ca. 5.600 USD/kg). Seitdem steigt der Palladiumpreis kontinuierlich an, mit einer kurzen Preisdämpfungsphase im Sommer 2010. Wie bei den anderen Metallen auch, kam es in den vergangenen Wochen zu einer kleinen Preisabschwächung. Derzeit liegt das Preisniveau von Palladium bei ca. 20.000 USD je Kilogramm Palladium [Johnson Matthey 2011a]. Eine zukünftige Preisentwicklung von Palladium und Platin ist nicht vorhersehbar.

11 Fazit und Handlungsempfehlungen für Ressourceneffizienz bzgl. Elektromobilität

Aus den umfangreichen Ergebnissen des Projektes „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität“, die in den vorangegangenen Abschnitten dokumentiert sind, hat das Projektteam von Öko-Institut, Umicore, Daimler AG und TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik folgende wesentliche Schlussfolgerungen gezogen:

- Die Versorgung mit **Seltenen Erden** – vor allem Dysprosium – ist besonders kritisch. Ressourceneffizienz und technologische Substitution weisen mittelfristig das größte Potential zur Eindämmung von Versorgungsengpässen auf. Recycling ist mittel- und langfristig eine wichtige Option zur Verringerung von Verknappungssituationen, allerdings aufgrund der stetig steigenden Gesamtnachfrage und der langen Lebensdauer der Produkte in den nächsten Jahren mit eher geringen Effekten.
- **Gallium** wird auch in vielen Anwendungsbereichen außerhalb der Elektromobilität (z.B. PV, LED) eingesetzt. Es ist mit starken Bedarfszuwächsen zu rechnen. Kurzfristig nicht, aber langfristig könnte die Versorgung mit Gallium kritisch werden bei starkem Nachfragewachstum und fehlenden Gegenmaßnahmen (Ausbau der globalen Gewinnungskapazitäten für Gallium als Nebenprodukt aus dem Bayer-Prozess (Tonerdegewinnung) und realer Einstieg in das Post-consumer-Recycling).
- **Indium** besitzt keinen entscheidenden Beitrag für die Elektromobilität. **ABER:** Es gibt viele konkurrierende Anwendungsbereiche mit starken Wachstumsraten. Indium kommt nur als Minor Metal vor und muss daher stark im Auge behalten werden.
- **Germanium** besitzt keinen entscheidenden Beitrag für die Elektromobilität. **ABER:** Es könnten große Wachstumsraten in anderen Anwendungen (z.B. Glasfasertechnik,

LED) auftreten und es fehlen grundlegende Informationen zu Germanium (das „Phantom“-Element) und dessen Bedarfsentwicklung.

- **Die Edelmetalle Silber, Gold, Palladium und Platin** spielen ebenfalls eine Rolle in den Komponenten für die Elektromobilität; hier wäre vor allem Platin für Brennstoffzellenfahrzeuge wichtig. Umgekehrt kann durch die Entwicklung der Elektromobilität bzgl. vollelektrischer Fahrzeuge der Nachfragedruck auf Platin und Palladium durch den Entfall des Autoabgaskatalysators gemindert werden.
- **Die aktuelle kritische Versorgungssituation bei einigen Seltenen Erden** ist ein warnendes Beispiel dafür, dass Engpässe trotz global hoher geologischer Reserven zumindest temporär auftreten können, wenn geopolitische Faktoren (nahezu ausschließliche Förderung in einem Land) mit einem rasanten Nachfragewachstum korrelieren. Hieraus gilt es Lehren für die Zukunft zu ziehen, um proaktiv rechtzeitig Gegensteuern zu können (durch rechtzeitige Erkundung und Erschließung von Lagerstätten, Diversifizierung der Versorgung, Förderung des Recycling usw.).

Aus den Ergebnissen und Schlussfolgerungen heraus hat das Projektteam Handlungsempfehlungen abgeleitet, die auf dem Abschlussworkshop den beteiligten Fachakteuren zur Diskussion gestellt wurden. Es zeigte sich eine breite Übereinstimmung bzgl. der Empfehlungen. Nichtsdestotrotz sind wichtige Anregungen hinsichtlich der Handlungsempfehlungen aus dem Kreis der externen Akteure an das Projektteam herangetragen worden, die in die folgende Liste der Handlungsempfehlungen eingeflossen sind:

- **Hinsichtlich des drohenden „Flaschenhalses“ bei Seltenen Erden müssen parallel verschiedene Entlastungsstrategien gefahren werden**
 - F&E bzgl. Verminderung von Seltenen Erden (v.a. Dysprosium) in Magneten für E-Motoren sowie bzgl. SE-freien E-Motoren
→ *Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie OEMs (Hersteller von Elektromotoren, Magnethersteller) und Wissenschaft hinsichtlich Innovation*
 - Entwicklung von Recyclingtechnologien für Permanentmagnete aus verschiedenen Anwendungen
→ *Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie Recyclingwirtschaft und Wissenschaft*
 - Förderung von umweltfreundlicher Primärförderung von SE (Standards!)
→ *Zuständig: Bundesregierung und EU-Kommission im Rahmen internationaler Verhandlungen, Minenunternehmen im Bereich Seltener Erden*
- **Förderung eines umweltverträglicheren Bergbaus zur Gewinnung von kritischen Metallen**

- Große Potenziale zur besseren Ausschöpfung natürlicher Ressourcen bestehen in höheren Gewinnungsraten bei der Primärförderung und Aufbereitung vieler Metalle (z.B. Seltene Erden). Weiterhin bestehen für wichtige Minor Metals wie Indium Potenziale aus nicht genutzten Rückständen zum Teil stillgelegter Förderstandorte.
→ *Zuständig: BGR und Institute im Bereich Bergbau und Aufbereitung für die Erkundung von Bergbaurückständen und technische Kooperationen und Knowhow-Transfer zur optimierten Förderung*
- **Entwicklung von Recyclingstrategien und – technologien für das Recycling von Leistungselektronik aus Alt-Elektrofahrzeugen**
 - Rückgewinnung von Kupfer, Gallium, Edelmetallen usw.
→ *Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie Recyclingwirtschaft und Wissenschaft*
- **Allgemeiner Forschungsbedarf**
 - Potenzialanalysen und Recyclingmöglichkeiten für die „normale“ Elektronik und sonstige Magnetanwendungen in zukünftigen PKW aller Art bezüglich Edel- und Spezialmetallen inkl. Seltener Erden.
→ *Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie Recyclingwirtschaft und OEMs (Hersteller von Autoelektronik und Magneten)*
- Bzgl. Gallium, Indium und Germanium werden auch aus anderen Anwendungen **deutliche Zuwächse** erwartet: unklar ist z.Zt. ob durch technologische Revolutionen wie LED-Technik oder Fotovoltaik (nach Fukushima) die Wachstumsraten und damit die Versorgungsrisiken noch unterschätzt werden:
Untersuchungsbedarf bzgl. der mittel- und langfristigen Effekte auf die E-Mobilität und Entwicklung von Lösungsstrategien!
→ *Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme*

Um eine breite Wirkung zu erzielen und wichtige Diskussionen anzustoßen, werden die Projektpartner sowie das BMU die Projektergebnisse sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene auf diversen Wegen wichtigen Akteurskreisen vermitteln und präsentieren.

12 Literatur

- Arnold 2007 Lehrbuch der Anorganischen Chemie; Arnold F. Holleman, Nils Wiberg: 102. Auflage. De Gruyter, Berlin 2007, ISBN 978-3-11-017770-1, S. 1433.
- BGR 2005 Indium: Metallogenetische und lagerstättenkundliche Stellung in Massivsulfidlagerstätten Kanadas, Südafrikas und Chinas; http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Projekte/Rohstoff-Forschung-abgeschlossen/LF_Indium_Safrika_Kanada.html
- BGR 2011 Elsner, Harald: Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden – Entwicklung “Grüner Technologien” gefährdet? Commodity Top News Nr. 36
- Binder 1999 Lexikon der chemischen Elemente; Harry H. Binder; S. Hirzel Verlag Stuttgart; 1999
- Boston Consulting Group 2009 The Comeback of the Electric Car? – How Real, How Soon, and What Must Happen Next, Boston Consulting Group, Published 2009
- Brumby 2008 Silver, Silver Compounds and Silver Alloys; Brumby et al; Wiley-VCH Verlag; Online veröffentlicht 2008
- DfT 2010 UK Department of Transport: “Platinum and Hydrogen for Fuel Cell Vehicles”; (Download am 18.05.2011) <http://www.dft.gov.uk/pgr/roads/environment/research/cqvcf/platinumandhydrogenforfuelcell3838?page=3>
- Ebel 2007 Cyanid-Phytoremediation mit Eichhornia crassipes; M. Ebel; Dissertation an der RWTH Aachen; 2007
- Ecoinvent 2010 Datenbank Version V2.2 <http://www.ecoinvent.org/>
- Edelstein 2011 Copper; D. L. Edelstein; USGS; 2011
- EU critical raw material 2010 European Commission Enterprise and Industry: Annex V to the Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials
- Falconbridge 2002 Falconbridge Limited, 2002, Kidd Creek plant: Web site at http://www.falconbridge.com/our_business/copper_kidd_creek.html. (Accessed November 29, 2002.) - Indium By John D. Jorgenson and Micheal W. George; USGS; Open-File Report 2004-1300
- Felix 2000 Indium and Indium Compounds; N. Felix; Wiley-VCH Verlag; Online-Veröffentlichung: 2000
- Finanzen 2011 Kupferpreise (Download am 25.10.2011) http://www.finanzen.net/rohstoffe/kupferpreis/historisch@intPageNr_34@intag1=1@inMonat1=1@inJahr1=2001@inTag2=25@inMonat2=10@inJahr2=2011
- Fraunhofer ISI 2010 Angerer, Mohring, Marscheider-Weidemann, Wietschel: Kupfer für Zukunftstechnologien, Karlsruhe, Juli 2010
- FVA / IZT 2011 Marwede M.: Kritische Rohstoffe der elektrischen Antriebstechnik, IZT 2011
- Gasmi 2004 Gold und Silber- Von der Lagerstätte bis zur Verwendung; L. El Gasmi; Universität Karlsruhe, IMG; 2004
- Glüsing 2008 Der Fluch des Goldes; Glüsing, et al.; Der Spiegel 12/2008
- Gold 2011 Goldpreisentwicklung (Download am 25.10.2011) <http://www.gold-goldbarren.com/goldpreise/goldpreisentwicklung/>
- Gold Infos 2011 Gold-Infos.eu: „Gold in der Industrie & Technik“ <http://www.gold-infos.eu/Gold-Industrie-Technik.html> (Download am 14.10.2011)
- Graedel et al. 2011 Graedel, T. E. und 7 Mitautoren, “Recycling rates of metals“, United Nations Environment Programme, (UNEP edits.) 2011

Greber 2000	Gallium and Gallium Compounds; Ullmann´s Encyclopedia; J. F. Greber; Wiley-VCH Verlag und GmbH & Co KgaA, Weinheim; Published Online : 15 JUN 2000
Guberman2009	Germanium; D. E. Guberman; USGS; 2009
Hagelüken et al. 2005	Hagelüken, C. und 16 Mitautoren, "Autoabgaskatalysatoren", Kontakt & Studium, Band 612, Expert-Verlag, 2005
Hagelüken, Buchert, Stahl 2005	Hagelüken, C., Buchert, M., Stahl, H.: Stoffströme der Platingruppenmetalle – Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle, GDMB Medienverlag, Clausthal–Zellerfeld 2005
Hagelüken, Meskers 2010	Hagelüken, C., Meskers, C. M., "Complex life cycles of precious and special metals", Chapter 10 from the Strüngmann Forum Report, Linkages of Sustainability edited by Thomas E. Graedel and Ester van der Voet, 2010.
Hagelüken, Treffer 2011	Hagelüken, C., Treffer, F., „Beitrag des Recyclings zur Versorgungssicherheit – Technische Möglichkeiten, Herausforderungen und Grenzen“, EuroForum-Konferenz in Stuttgart“, Mai 2011
Hollemann Wiberg 2007	Lehrbuch der Anorganischen Chemie 102. Auflage, 2007
Honda 2011	http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx (05. Oktober 2011)
IAD 2000	Zyanid-Unfall in Baia Mare, Rumänien, IAD, Limnological Reports, Volume 33, Proceedings 33 rd Conference, Osijek, Croatia 2000
IMCOA 2011	"Rare Earth Opportunities – Real or Imaginary?" by Dudley J Kingsnorth, April 2011
International Energy Agency 2009	Technology Roadmap – Electric and plug-in hybrid electric vehicles
Jaskula 2010	Gallium; Jaskula, B.W. Mineral Commodity Summaries; U.S. Geological Survey; 2010
Johnson Matthey 2011	Platinum 2011, Johnson Matthey Public Limited Company, Mai 2011 http://www.platinum.matthey.com/publications/pgm-market-reviews/archive/platinum-2011/
Johnson Matthey 2011a	Preise http://www.platinum.matthey.com/pgm-prices/price-charts/ (Download am 25.10.2011)
Kingsgate 2011	http://www.kingsgate.com.au/thailand/processing-plant-flowsheet.htm
Krauß 1989	Untersuchungen über Angebot und Nachfrage mineralischer Rohstoffe, Sondermetalle, Band XXII ; Krauß, u.a.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1989
LiBRi 2011	Treffer, F., Goldmann, D., Buchert, M. et al.: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRi, 2011
Lide 2005	Lide D.R. (ed.): CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85. Auflage, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2005. Section 14, Geophysics, Astronomy, and Acoustics; Abundance of Elements in the Earth's Crust and in the Sea.
Lochte 2010	Kommunikation mit Hr. Lochte von der Ingal Stade am 29.10.2010
Lossin 2001	Copper; Adalbert Lossin; Online-Veröffentlichung 2001
McKinsey&Company 2009	Roads toward a low-carbon future: Reducing CO2 emissions from passenger vehicles in the global road transportation system
McKinsey&Company 2010	Beitrag der Elektromobilität zu langfristigen Klimaschutzzielen und Implikationen für die Automobilindustrie
Metal Markets	http://www.metalmarkets.org.uk/2011/07/26/1616-80-per-troy-ounce-another-

2011 [record-high-for-gold/](#) (Download am 25.10.2011)

Metalsplace 2011 Gallium: The slippery metal; <http://metalsplace.com/news/articles/25203/gallium-the-slippery-metal>

Mikolajczyk 2009 Availability of Indium and Gallium; Mikolajczyk (Director, Metals and Chemicals; Indium Corporation); Sept. 2009

Mitsubishi 2011 <http://www.imiev.de/docs/iMiEV-daten.pdf> (05. Oktober 2011).

Morawietz 1964 Herstellung von hochreinem Indium durch Amalgam-Elektrolyse; Dr. Phil. Nat. Morawietz; Chemie-Ing.-Tech 36. Jahrg. 1964/Nr. 6

Öko-Institut e.V. 2009 Buchert, M.; Schüler, D.; Bleher, D.: Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential (UNEP edits.) Juli 2009

Öko-Institut e.V. 2011 Schüler, D.; Buchert, M.; Merz, C.; Dittrich, S.; Liu, R.: Study on Rare Earths and Their Recycling, Öko-Institut e.V. Darmstadt, Januar 2011

Opel 2011 http://www.opel-ampera.com/index.php/ger/mpere/how_it_works/erev_voltec (05. Oktober 2011)

Pohl 2005 Mineralische und Energie-Rohstoffe, Eine Einführung zur Entstehung und nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten; Walter L. Pohl, Institut für Umweltgeologie TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig; E.Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung; Stuttgart 2005

Renner 2000 Gold, Gold Alloys and Gold Compounds; Renner et al; Wiley-VCH Verlag; Online-Veröffentlichung: 2000

Renner 2000 Gold, Gold Alloys and Gold Compounds; Renner et al; Wiley-VCH Verlag; Online-Veröffentlichung: 2000

Restle 2009 Rohstoff Kupfer; M. Ebert, M. Restle, P. Nobs; Stiftung Praktischer Umweltschutz Schweiz Pusch; Zürich; 2009

Schwarz-Schampera 2002 Indium-Geology, Mineralogy and Economics; U. Schwarz-Schampera, P.M. Herzig; Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg;2002

Scoyer 2000 Germanium and Germanium Compounds; J. Scoyer, H. Guislain, H. U. Wolf; Wiley-VCH Verlag; Online-Veröffentlichung: 2000

Silber 2011 Silberkurs der letzten 10 Jahre (Download am 25.10.2011) <http://www.silber.de/silberkurs.html>

SolviCore 2011 Persönliche Kommunikation mit Herrn Frank Treffer am 19.05.2011

Spiegel 2011 Spiegel Online: China kappt Produktion von Hightech-Metallen 20.10.2011 <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/0,1518,792935,00.html>

Tolcin 2010 Indium; A. C. Tolcin; USGS 2010

Toyota 2011 http://de.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius, (22. September 2011)

Truckenbrodt 2011 A. Truckenbrodt; Automotive Fuel Cells, The road to Emission-Free Mobility; AFCC PP-Präsentation, March 2011: http://www.afcc-auto.com/files/AFCC_Standard_March_2011_170311presented.pdf (Download am 17.5.2011)

Umicore 2011 Persönliche Kommunikation mit Herrn Frank Treffer am 18.05.2011

USGS 2011 Commodity Top News Rare Earths 2011

USGS 2011a Commodity Top News Platinum Group Metals 2011

USGS 2011b Commodity Top News Gold 2011

USGS 2011c Commodity Top News Silber 2011

USGS 2011d Commodity Top News Gallium 2011

USGS 2011e Commodity Top News Germanium 2011

USGS 2011f Commodity Top News Indium 2011

USGS 2011g	Commodity Top News Copper 2011
USGS 2011h	Commodity Top News Bauxite and Alumina 2011
USGS 2011j	Commodity Top News Tin 2011
USGS 2011k	Commodity Top News Zinc 2011
USGSAppc 2011	http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2011/mcsapp2011.pdf
van Oers et al. 2002	van Oers, L.; de Koning, A.; Guinée, J.B.; Huppes, G.: Abiotic resource depletion in LCA – Improving the characterization factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook; Road and Hydraulic Engineering Institute, Netherlands, 2002
Weiss 1985	SME Mineral Processing Handbook, Editor: N.L. Weiss; American Institute of Mining, printed by: Kingsport Press, Kingsport, Tn, USA, 1985

Anhang

Anhang 1 Teilnehmerliste des 1. Experten-Workshops „Ressourcen für Elektromobilität“ am 29.09.2010 in Berlin

Name	Institution
Christian Kawohl	Aurubis AG
Mathias Samson	BMU Ref IG I 5
Dr. Frank Lehnert	BMW AG
Martin Steinbild	Chemetall
Dr. Klaus Ruhland	Daimler AG
Sven Knoefel	Daimler AG
Dr. Eckhard Schüler-Hainsch	Daimler AG
Dr. Bernd Grieb	Fa. Magnequench
Dr.-Ing. Luis Tercero	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
Dr.-Ing. Nils Nissen	Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM
Tobias Klier	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Ingrid Ott	GGEMO
Heinz-Dieter Heibach	Hitachi
Axel Schober	I+ME ACTIA
Hans-Joachim Steinwachs	I+ME ACTIA
Stefan Seum	Öko-Institut e.V.
Dr. Matthias Buchert	Öko-Institut e.V.
Florian Hacker	Öko-Institut e.V.
Dr. Wolfgang Jenseit	Öko-Institut e.V.
Stefanie Dittrich	Öko-Institut e.V.
Dr. Thorsten Mausbach	Robert Bosch GmbH
Heiko Weller	Robert Bosch GmbH
Dr. Ulrich Bast	Siemens AG
Dr. Tina Dettmer	Technische Universität Braunschweig Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF)

Name	Institution
Kai Rasenack	Technische Universität Clausthal
Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann	Technische Universität Clausthal Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
Prof. Dr. Arno Kwade	TU Braunschweig
Regina Kohlmeyer	UBA FG III 1.2
Kristine Koch	UBA FG III 1.2
Frank Treffer	Umicore AG & Co. KG
Prof. Dr. Armin Reller	Universität Augsburg
Dr. Rolf Blank	Vacuumschmelze GmbH & Co. KG
Nadine May	VDI / VDE
Franz Dorninger	Voest-Alpine
Dr. Dieter Schmid	Volkswagen AG
Dr. Marko Gernuks	Volkswagen AG

Anhang 2 Teilnehmerliste des 2. Experten-Workshop „Ressourcen für Elektromobilität“ am 31.05.2011 in Berlin

Name	Institution
Christian Kawohl	Aurubis AG
Markus Becker	BMU Ref IG I 5
Mathias Samson	BMU Ref IG I 5
Linda-Maree Klimesch	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Martin Steinbild	Chemetall
Dr. Klaus Ruhland	Daimler AG
Sven Knoefel	Daimler AG
Dr. Eckhard Schüler-Hainsch	Daimler AG
Dr. Bernd Grieb	Fa. Magnequench
Tobias Klier	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Heinz-Dieter Heibach	Hitachi
Axel Schober	I+ME ACTIA

Name	Institution
Volker Handke	IZT
Dr. Matthias Buchert	Öko-Institut e.V.
Dr. Wolfgang Jenseit	Öko-Institut e.V.
Florian Hacker	Öko-Institut e.V.
Stefanie Dittrich	Öko-Institut e.V.
Dr. Alexandra Wilde	Robert Bosch GmbH
Dr. Thorsten Mausbach	Robert Bosch GmbH
Dr. Jens-Oliver Müller	Siemens AG
Kai Rasenack	Technische Universität Clausthal
Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann	Technische Universität Clausthal Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
Dr. Christoph Herrmann	TU Braunschweig
Patricia Egede	TU Braunschweig
Regina Kohlmeyer	UBA FG III 1.2
Jan Kosmol	UBA FG III 2.2
Frank Treffer	Umicore AG & Co. KG
Dr. Rolf Blank	Vacuumschmelze GmbH & Co. KG
Nadine May	VDI / VDE Innovation + Technik GmbH
Franz Dorninger	Voest-Alpine
Dr. Dieter Schmid	Volkswagen AG
Dr. Marko Gernuks	Volkswagen AG

Anhang 3 Teilnehmerliste des Abschluss-Experten-Workshops „Ressourcen für Elektromobilität“ am 28.09.2011 in Berlin

Name	Institution
Christian Kawohl	Aurubis AG
Markus Becker	BMU Ref IG I 5
Mathias Samson	BMU Ref IG I 5

Name	Institution
Uwe Nestle	BMU Ref WA III 1
Dr. Peter Buchholz	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Martin Steinbild	Chemetall
Dr. Klaus Ruhland	Daimler AG
Sven Knoefel	Daimler AG
Dr. Eckhard Schüler-Hainsch	Daimler AG
Dr. Bernd Grieb	Fa. Magnequench
Axel Schober	I+ME ACTIA
Hans-Joachim Steinwachs	I+ME ACTIA
Volker Handke	IZT
Dr. Matthias Buchert	Öko-Institut e.V.
Dr. Wolfgang Jenseit	Öko-Institut e.V.
Florian Hacker	Öko-Institut e.V.
Stefanie Dittrich	Öko-Institut e.V.
Dr. Thorsten Mausbach	Robert Bosch GmbH
Dr. Jens-Oliver Müller	Siemens AG
Dr. Michael Oehlers	SolviCore GmbH & Co. KG
Kai Rasenack	Technische Universität Clausthal
Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann	Technische Universität Clausthal Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
Dr. Tina Dettmer	TU Braunschweig
Patricia Egede	TU Braunschweig
Regina Kohlmeyer	UBA FG III 1.2
Jan Kosmol	UBA FG III 2.2
Lars Mönch	UBA FG I 3.2
Frank Treffer	Umicore AG & Co. KG
Dr. Rolf Blank	Vacuumschmelze GmbH & Co. KG
Dr. Randolf Schließer	VDI / VDE
Stella Konietzko	Volkswagen AG
Dr. Dieter Schmid	Volkswagen AG
Dr. Marko Gernuks	Volkswagen AG