

# Cobalt

Studie über die Nutzung  
des kritischen Materials Cobalt vor  
dem Interessenbereich des ESM

Jörg Nispel, Karina Fries,  
Rebecca Hentschel,  
Gert Homm, Armin Reller

*December 2014*

# **STUDIE ÜBER DIE NUTZUNGSPOTENZIALE DER KRITISCHEN METALLE COBALT UND MOLYBDÄN VOR DEM INTERESSENBEREICH DES ESM**

## **COBALT**



# STUDIE ÜBER DIE NUTZUNGSPOTENZIALE DER KRITISCHEN METALLE COBALT UND MOLYBDÄN VOR DEM INTERESSENBEREICH DES ESM

**Dr. Jörg Nispel, M.Sc. Karina Fries, Dipl.-Ing. Rebecca Hentschel und Dr. Gert Homm**

**Prof. Dr. Armin Reller**

Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS  
(in Alzenau und Hanau)

## COBALT



# Inhalt

Abbildungsverzeichnis .....	8
Tabellenverzeichnis.....	9
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Verfügbarkeit .....</b>	<b>12</b>
2.1 Minen, Konzerne und Standorte .....	12
2.2 Länderkonzentration .....	14
2.3 Begleit-/Hauptmetalle .....	16
2.4 Gesetzgebungen für höhere vertikale Transparenz .....	16
<b>3 Nutzen nach Funktion und Anwendung.....</b>	<b>19</b>
3.1 Eigenschaften .....	19
3.2 Anwendungen .....	20
3.3 Funktionen.....	21
3.4 Substitution .....	24
<b>4 Kritikalität.....</b>	<b>27</b>
<b>5 Unternehmensclusterung.....</b>	<b>30</b>
5.1 Clusterung nach Funktionen .....	30
5.2 Clusterung nach Relevanz (strategisch, technisch, ökonomisch) .....	30
5.2.1 Hohe ökonomische Relevanz.....	32
5.2.2 Hohe technische Relevanz.....	32
5.2.3 Hohe strategische Relevanz.....	32
5.3 Clusterung nach Parallel-Verarbeitung .....	33
<b>6 Vorhandene Re-Phasen .....</b>	<b>34</b>
6.1 Art der Re-Phasen .....	34
6.2 Kritische Hinterfragung des elementaren Rückgewinns .....	36
<b>7 Analyse der Ergebnisse   Co .....</b>	<b>37</b>
7.1 Interpretation.....	37
7.2 Trends.....	41
7.2.1 Automobilsektor .....	41
7.2.2 Stahlleichtbau .....	41
7.2.3 Batteriesysteme.....	42
7.2.4 Synthetische Kraftstoffe .....	46
7.2.5 Superlegierungen.....	47
7.3 Kriterienbewertung .....	50
7.3.1 Kommentare zur potenziellen Entwicklung .....	52
7.3.2 Entwicklungspotenziale.....	55
<b>8 Allgemeines Fazit.....</b>	<b>57</b>
<b>9 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>59</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stoffgeschichten nach <sup>©</sup> Reller/Zepf 2010. ....	11
Abbildung 2: Minenstandorte Cobalt nach Ländern und Betreiber (USGS MYB 2013). ....	13
Abbildung 3: Globale Minenproduktion und Preisentwicklung von Cobalt 1900 bis 2011 (USGS 2014). ....	14
Abbildung 4: Monatliche Preisentwicklung der letzten acht Jahre von Cobalt (Free market, min. 99,8 %) (BGR 2014). ....	14
Abbildung 5: Länderanteile der Weltproduktion von Cobalt (USGS MCS 2014). ....	15
Abbildung 6: Vergleich von World Governance Index (WGI) 2012, Human Development Index (HDI) 2012 und Environmental Performance Index (EPI) 2014 der Cobalt-Hauptförderländer. ....	16
Abbildung 7: Zertifizierungs-ansätze und ihre Bezugspunkte in der Wertschöpfungskette von Konfliktrohstoffen (DIHK 2012). ....	17
Abbildung 8: Hauptanwendungen von Cobalt weltweit (CDI 2013). ....	20
Abbildung 9: Phasendiagramm des Werkstoffverbundes Wolframcarbid-Cobalt. (Zhang 1999). ....	22
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Umicore-Recyclingprozesses für NiMH und Li-Ion-Batterien (Caffarey 2010) (Gaines 2011). ....	35
Abbildung 11: Cobaltnachfrageszenarien bis 2020 (Buchert 2009). ....	37
Abbildung 12: Struktur des europäischen Cobaltmarktes (Tercero 2012). ....	38
Abbildung 13: Marktentwicklung des Karosserieleichtbaus. ....	41
Abbildung 14: Entwicklung der weltweiten Autoflotte bis zum Jahr 2050 (World Business Council on Sustainable Development 2014). ....	42
Abbildung 15: Li-Ionen Batterie Produktion von 2010 bis 2030 (Cheung 2012). ....	43
Abbildung 16: Zukünftiger Weltmarkt für Elektromobilität (Bosch 2012). ....	43
Abbildung 17: Absatz von Mobiltelefonen und Smartphones in Deutschland (in Millionen Geräten) (Statista 2014c). ....	44
Abbildung 18: Anzahl der Smartphonennutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2014 (in Millionen) (Statista 2014a). ....	45
Abbildung 19: Entwicklung der PC-Ausstattung in privaten deutschen Haushalten (Stadt Bremerhaven 2013). ....	45
Abbildung 20: Vergleich der weltweiten Gas-to-Liquid (GtL)-Produktion mit dem Dieserverbrauch des Straßenverkehrs in der EU27 (Heitzer 2006). ....	47
Abbildung 21: Prognostizierte Anzahl der weltweit eingesetzten Frachtflugzeuge in den Jahren 2013 und 2033 (Firmenangaben Boeing) (Statista 2014b). ....	47
Abbildung 22: Metallische Zusammensetzung einer typischen Flugzeugturbine in Kilogramm und US\$ in 2011 (Bedder und Baylis 2013). ....	48
Abbildung 23: Weltweiter Bedarf von Superlegierungen aufgeschlüsselt nach deren Endnutzung im Jahr 2010 (Bedder und Baylis 2013). ....	48
Abbildung 24: Weltweite Produktion kommerziell vertriebener Flugzeugturbinen von 2000 bis 2030 (Bedder und Baylis 2013). ....	49

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Cobalt-Charakteristika (Hunklinger 2009) (Porri 2006).....	19
Tabelle 2: Kritikalitätsmatrix nach Reller für Cobalt. ....	27
Tabelle 3: Übersicht über die Einordnung nach Relevanzstufen des Metalls Cobalt. ....	31
Tabelle 4: Neben Cobalt genutzte Elemente in denselben Anwendungen.....	33
Tabelle 5: Entwicklungspotenziale nach Wirtschaftszweigen/Branchen (Einschätzung durch die Fraunhofer-Projektgruppe IWKS). ....	50



Ein starker Preisanstieg über die letzten Jahrzehnte und lange Lieferzeiten sind neben der Situation in den konfliktbelasteten Regionen in Afrika die Hauptargumente, das Metall Cobalt als kritisches Element einzustufen (Bol und Bastein 2012). Cobalt ist relevant in drei von sechs strategischen Zukunfts-Energiotechnologien: Biokraftstoffen, CCS (Carbon Capture and Storage) und Kernenergie (Moss et al. 2011). Weiterhin ist es als essentielles Spurenelement durch die Ausbildung von Metall-Kohlenstoffbindungen im Metabolismus von Tieren und Menschen essentiell.

Dieses breite Anwendungsfeld, innerhalb dessen Cobalt seit Jahrzehnten genutzt wird und die vielen Funktionen, die es erfüllen kann, lenken den Blick hin auf die Versorgungslage, den derzeitigen Cobaltverbrauch sowie die potentielle Reichweite. Für zahlreiche Unternehmen aus sehr unterschiedlichen Branchen hat dieses Metall eine hohe Relevanz, sei es ökonomischer, technischer oder strategischer Art.

Ziel dieser Studie ist es, die Hintergründe der Relevanz von Cobalt für diese Unternehmen aufzudecken und die Unternehmen nach der Art der Relevanz zu klassifizieren. Dadurch wird ersichtlich, welche Branchen vor ähnlichen Herausforderungen hinsichtlich der Rohstoffversorgung stehen, selbst wenn ihre Interessen am Metall durch unterschiedlichste Nutzungspotentiale geprägt sind. Das „Reller’sche Konzept“ der Stoffgeschichten (Abbildung 1) wird damit aufgegriffen und in die Unternehmensebene hinein vertieft.

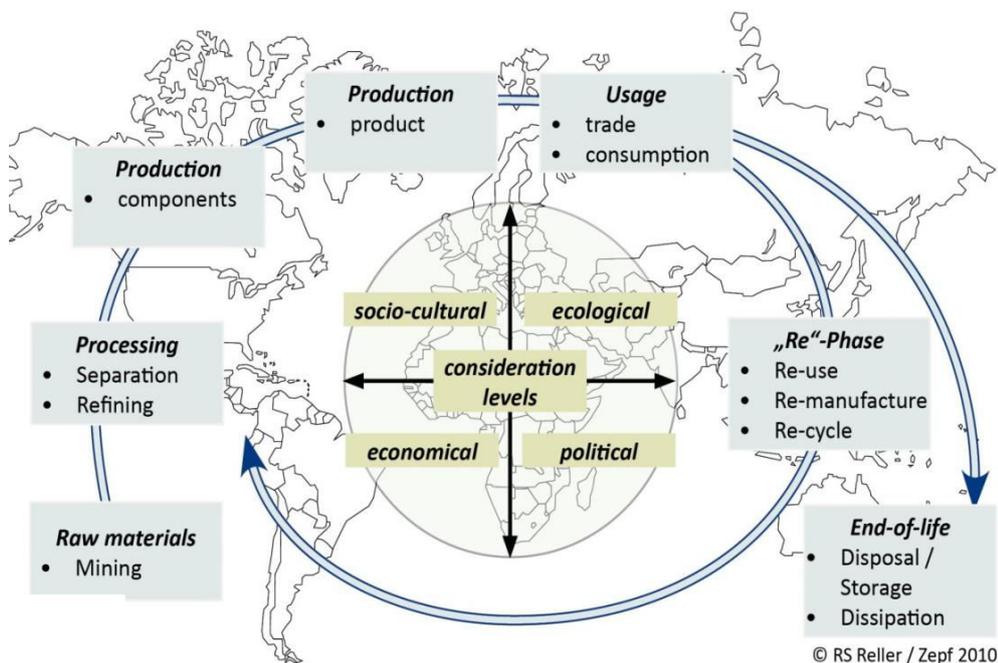


Abbildung 1: Stoffgeschichten nach © Reller/Zepf 2010.

## Verfügbarkeit

Ausschlaggebend für viele Innovationen auf der Basis bestimmter Rohstoffe sind nicht nur die technische Machbarkeit bzw. die besonderen Eigenschaften, sondern in der Realwirtschaft neben gesetzlichen Vorschriften in erster Linie deren Verfügbarkeit und Preis. Es ist daher nur möglich ein vollständiges Bild über die Motive der Verwendung eines speziellen Metalls in einer bestimmten Anwendung zu erhalten, wenn dessen Zugänglichkeit und Preis bekannt sind. Zur Verfügbarkeit zählen im Sinne der metallischen Elemente des Periodensystems deren geologische Häufigkeit sowie die Lokalität der Minen, die Unternehmenskonzentration der Minenbetreiber und die Mengen des Elementes, die insgesamt jährlich aus Primär- (Mine) und Sekundärproduktion (Recycling) gewonnen werden.

### 2.1 Minen, Konzerne und Standorte

Cobalt ist kein seltenes Metall und nimmt Platz 33 der häufigsten Metalle in der Erdkruste ein (CDI 2014a). Seine Häufigkeit liegt bei etwa 30 ppm und damit zwischen der von Stickstoff und Lithium.

Die größten Produzenten von Cobalt sind derzeit:

- Freeport Cobalt (Joint-Venture aus Gécamines, Freeport-McMoRan (FCX) und Lundin Mining Corporation inklusive der weltgrößten Cobalt-Raffinerie in Kokkola, Finnland (ehem. OMG)),
- Glencore XStrata, XStrata Plc bildete 2012 mit einem weiteren großen Minenbetreiber Glencore International Plc den neuen Konzern Glencore XStrata,
- Sherritt International Corp. (Moa Nickel S.A.),
- Vale S.A. und
- Norilsk Nickel Mining (InfoMine 2014).

China ist mit 35.000 t (2011) der weltgrößte Produzent von raffiniertem Cobalt (USGS MYB 2013), dabei wird in China kaum Cobalt abgebaut. Die Erze und Konzentrate stammen vielmehr aus anderen Nationen, allen voran aus der Demokratischen Republik Kongo (DRC). Rund 34.100 t Erze und Konzentrate hat China im Jahr 2011 importiert. China raffiniert zudem Material aus Australien (z. B. Nickelrohstein und -sulfide von BHP Billiton), Finnland, Spanien und Sambia.

Der Kongo (Kinshasa) baute 2013 die größten Mengen von Cobalt aus Minen ab. Allerdings sinkt der Anteil des Kongos an der Gesamtproduktion in den vergangenen Jahren. Australien, Brasilien und China gewinnen zunehmend an Gewicht (CDI 2013). Minenproduktion und Raffinerieproduktion weisen demnach unterschiedliche Schwerpunktländer auf (Kapitel 2.2 Länderkonzentration).

Abbildung 2 zeigt die größten Cobaltproduzenten und deren Minen. Als Quelle für diese Zusammenstellung dienten Daten der USGS (USGS MYB 2013) sowie die Internetauftritte der Konzerne und Minenbetreiber. Hier wird bereits eine Agglomeration von Minen im Kongo-Becken und in weiteren südlichen Teilen Afrikas deutlich.

Eine vollständige Minentabelle sowie eine Raffinerietabelle für das Metall Cobalt ist dem Unternehmenskompodium zu entnehmen.

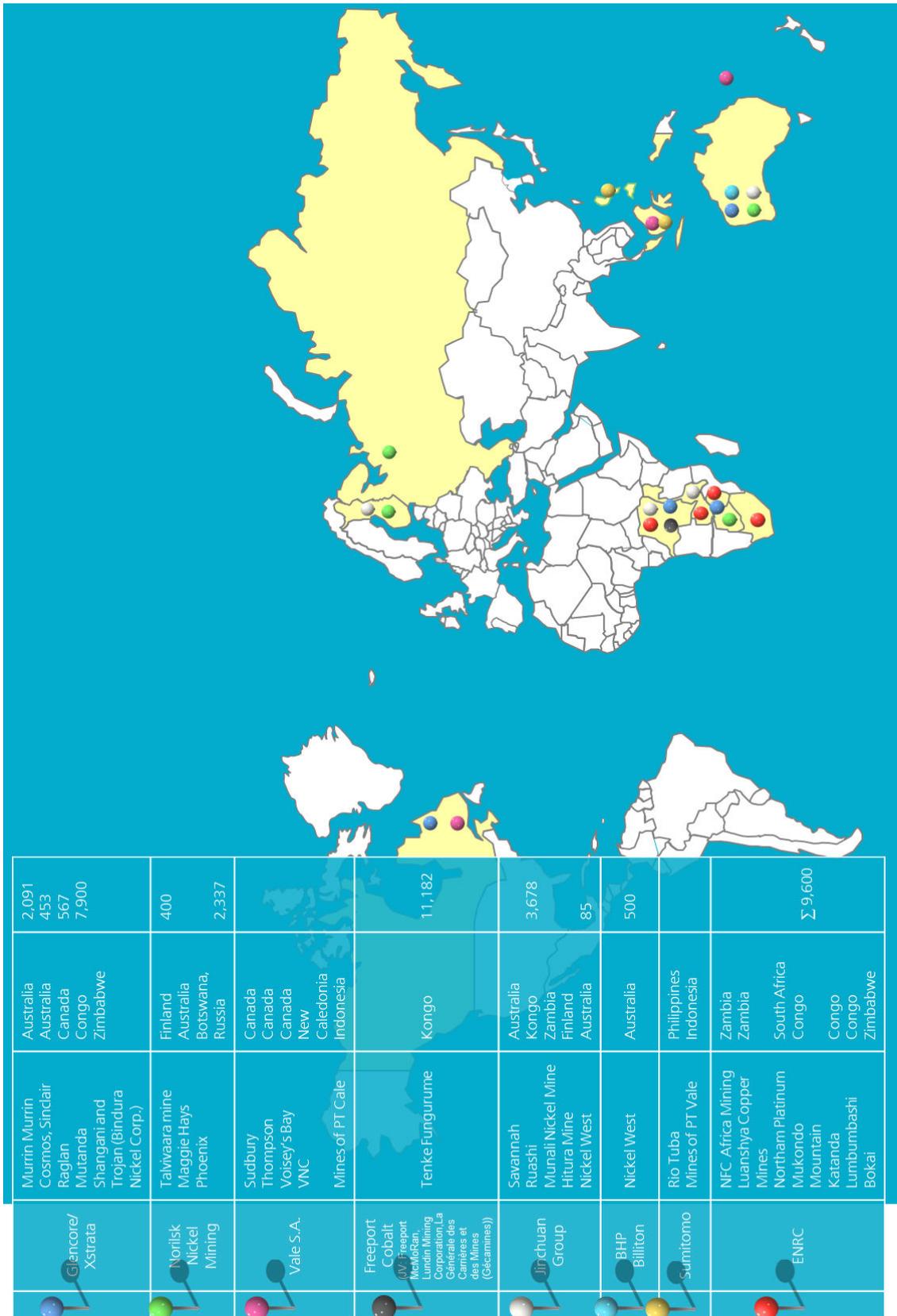
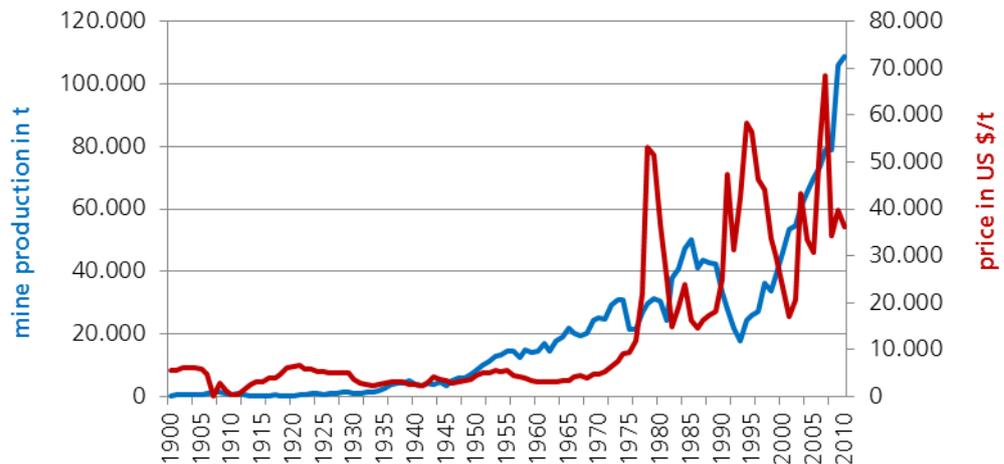


Abbildung 2: Minenstandorte Cobalt nach Ländern und Betreiber (USGS MYB 2013).

Abbildung 3 zeigt den rasanten Produktions- und Preisanstieg von Cobalt innerhalb der letzten Jahrzehnte. Der Gesamttrend ist bei einem Blick auf das letzte Jahrzehnt alleine (Abbildung 4) schwer zu erkennen. Wenn auch der Preis nicht radikal steigt, so ist die verstärkte Ausbeutung der vorhandenen Ressourcen dennoch kritisch und wird bei gleichbleibender Vernachlässigung der Verbesserung von Recyclinginfrastrukturen zu weiteren Konflikten führen.

**Abbildung 3: Globale  
Minenproduktion und  
Preisentwicklung von Cobalt  
1900 bis 2011 (USGS 2014).**



**Abbildung 4: Monatliche  
Preisentwicklung der letzten  
acht Jahre von Cobalt (Free  
market, min. 99,8 %) (BGR  
2014).**

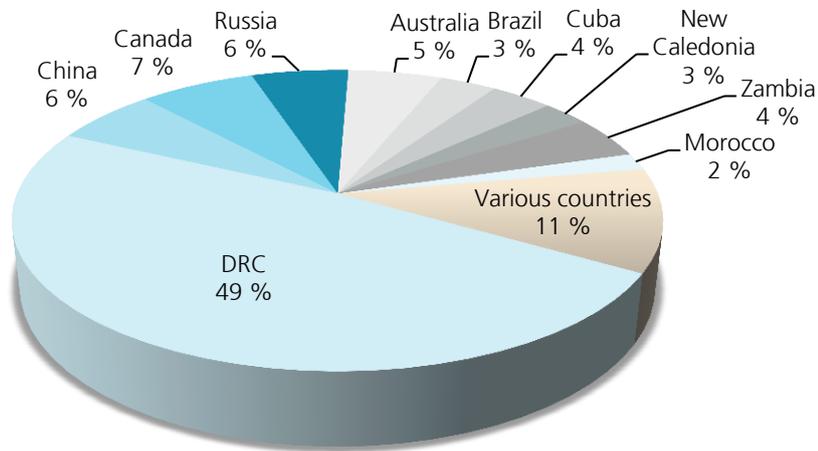


## 2.2 Länderkonzentration

Der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) beschreibt die Länderkonzentration. Fördert ein Land alleine 100 % des Rohstoffes, liegt der HHI bei seinem Maximalwert 10.000, es besteht eine quadratische Abhängigkeit zwischen Förderquote und HHI. Der HHI von Cobalt lag 2013 nach eigenen Berechnungen basierend auf USGS Daten bei 2572. Das bedeutet, er ist ausgehend von 3.212 im Jahr 2011 gesunken (USGS MCS 2014). Im Jahr 2011 kamen 55 % der Gesamtminenförderung (USGS MCS 2013) aus der Demokratischen Republik Kongo (DRC), gefolgt von knapp 50 % in 2012 und 49 % im Jahr 2013. Die HHI-Werte sind damit im moderaten Bereich. Durch die schwierige sozio-politische Situation im Kongo, ist der Anteil sinkend. Allerdings liegen die bekannten Reserven zu großen Teilen in Zentralafrika. Auf die DRC entfallen hier

ebenfalls ca. 49 %. Die statische Reichweite von Cobalt liegt bei aktuell bekannten Reserven und einem Verbrauch von fast 120.000 t im Jahr bei ca. 60 Jahren. Das ist im Vergleich zu vielen anderen Metallen ein recht geringer Wert und er unterstreicht die Wichtigkeit eines intensivierten Recyclings bzw. einer besseren Substitution und höheren Ressourceneffizienz.

-----  
 Verfügbarkeit  
 -----



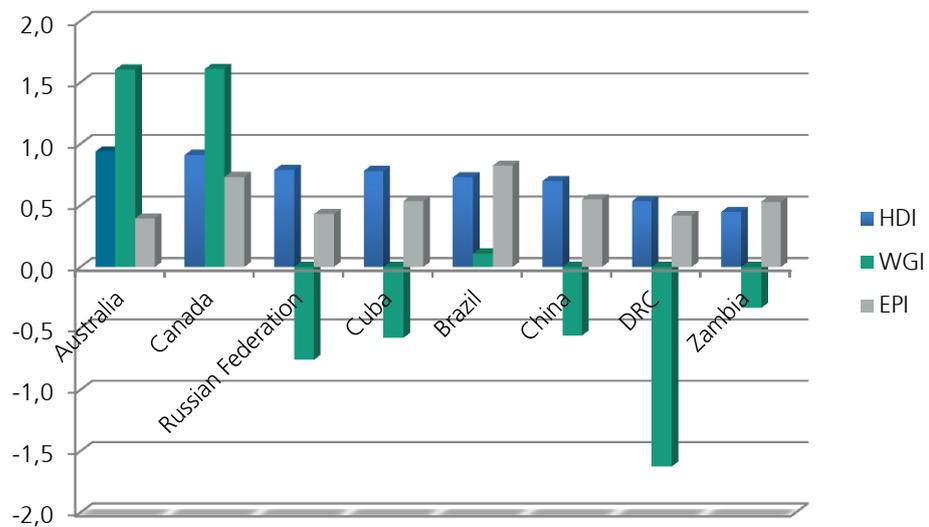
**Abbildung 5: Länderanteile der Weltproduktion von Cobalt (USGS MCS 2014).**

Abbildung 5 stellt die Cobaltproduktion nach Ländern dar. Unter „various countries“ zählen unter anderem Südafrika, Finnland, die Philippinen, Indonesien und Zimbabwe. Wie prekär die Situation in den größten Abbauländern ist, wird beispielsweise durch den WGI (Worldwide Government Indicator) ausgedrückt. Für diesen Indikator werden einzelne Kriterien wie die Mitbestimmung der Bürger, die politische Stabilität und Gewaltfreiheit, die Effektivität der Regierung und die Korruption im Land herangezogen. Er bewertet somit die Stabilität von Staaten und nimmt Werte zwischen -2,5 (geringe Stabilität) und +2,5 (hohe Stabilität) an (Kaufmann et al. 2013). Er ist zusammen mit den Indizes HDI (Human Development Index) und EPI in Abbildung 6 aufgetragen. Mit -1,6 weist die DRC einen extrem niedrigen Wert auf. Dieser ist bedingt durch weit verbreitete Korruption und einen fortwährenden War Lord Kampf, um Ressourcen sowie den Einsatz von Kinderarbeit.

Der Human Development Index ist ein Wohlstandsindikator, der die Lebenssituation innerhalb eines Landes anhand definierter Faktoren, wie Lebenserwartung, Bildung und Bruttonationaleinkommen bewertet. Er nimmt Werte zwischen 0 (geringe menschl. Entwicklung) und 1 (sehr hohe menschl. Entwicklung) an (UNDP 2011).

Der Environmental Performance Index (EPI) der Yale University bewertet die Umweltprobleme einzelner Staaten und deren Umgang damit. Er bewertet den Schutz der menschlichen Gesundheit vor Umweltschäden anhand verschiedener Parameter (Health impacts, Air Quality, Water and Sanitation) und den Schutz der Ökosysteme durch folgende Faktoren: Water Resources, Agriculture, Forests, Fisheries, Biodiversity and Habitat, Climate and Energy. Er nimmt Werte zwischen 100 (gut) und null (schlecht) an (Yale University 2014). Der EPI wurde zur besseren Darstellung hier auf Werte zwischen null und eins skaliert.

**Abbildung 6: Vergleich von World Governance Index (WGI) 2012, Human Development Index (HDI) 2012 und Environmental Performance Index (EPI) 2014 der Cobalt-Hauptförderländer. EPI auf Werte zwischen 0 und 1 skaliert (UNDP 2014) (Kaufmann et al. 2013) (Yale University 2014).**



### 2.3 Begleit-/Hauptmetalle

Wie erwähnt ist die Häufigkeit von Cobalt in der Erdkruste mit ca. 30 ppm relativ hoch (UKERC 2012). Durch geringe Konzentrationen in Erzlagerstätten wird es allerdings hauptsächlich als Koppelprodukt beim Abbau von Nickel- (57 %) und Kupfererzen (37 %) gewonnen (CDI 2013). Ein Abbau dieser Erze findet insbesondere in der DRC, Sambia, Neu Kaledonien, Russland, Australien, Zambia und Marokko statt. Außerdem wird Cobalt als Nebenprodukt bei der Förderung von Platingruppenmetallen (PGM) gewonnen, insbesondere in Kanada, Südafrika und Zimbabwe. Primäre Cobalterze machen nur etwa 6 % der Gesamtfördermenge aus. Solche werden zusätzlich in Marokko und Kanada abgebaut (CDI 2014a).

### 2.4 Gesetzgebungen für höhere vertikale Transparenz

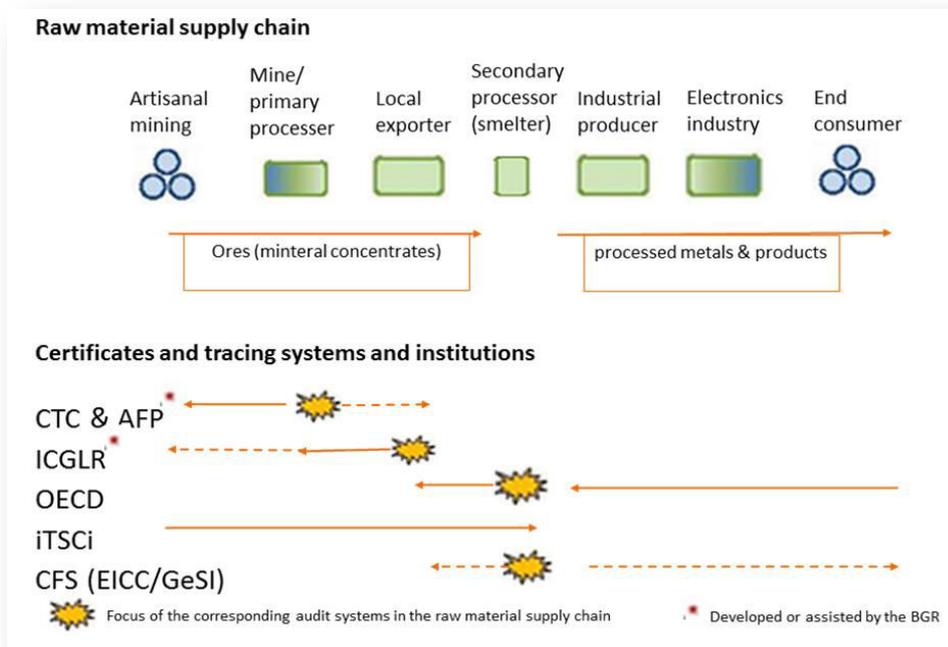
Rohstoffe wie Cobalt, Wolfram, Zinn und Tantal haben gemeinsam, dass sie in hohem Maße in Konfliktregionen wie der Demokratischen Republik Kongo (DRC) abgebaut werden. Hier ist jedoch zu beachten, dass die als Konfliktmetalle bezeichneten Rohstoffe Tantal, Wolfram, Gold oder Zinn vorwiegend in der Kivu Region abgebaut werden und die Cobaltminen in rund 1.000 Kilometer Entfernung in Grenznähe zu Sambia oder im Katanga-Kupfergürtel liegen (Reisman 2011).

Die internationale Gesetzgebung hat in verschiedenen Initiativen versucht, die Transparenz der Rohstoffherkunft zu erhöhen. Ziel ist es, Unternehmen zu ermöglichen, die benötigten Rohstoffe gezielt aus konfliktfreien Regionen zu beziehen und damit eine Entscheidungsmöglichkeit gegen die Unterstützung von Konfliktparteien zu haben. Ausgehend vom US-amerikanischen Dodd-Frank-Act aus dem Jahr 2010, der die Rohstoffe Wolfram, Zinn, Tantal und Gold einschließt, wurden verschiedene Zertifizierungsansätze entwickelt. Der Dodd-Frank-Act schreibt Unternehmen, die an der US-amerikanischen Börse notiert sind, vor, in ihren Jahresberichten nachzuweisen, dass ihr Rohstoffbezug nicht zur Finanzierung bewaffneter Gruppen in der DRC beiträgt. Die Produkthersteller, sind damit verpflichtet, ihre gesamte Lieferkette zu dokumentieren und ab Rohmaterial die Konfliktfreiheit zu gewährleisten. Abbildung 7 gibt einen Überblick über weitere Zertifizierungsansätze mit ihren Anknüpfungspunkten in der Wertschöpfungskette.

Der Zentralverband der Deutschen Elektronikindustrie antwortete im Jahr 2013 mit einem Positionspapier auf das Drängen der europäischen Gesetzgebung zu höherer

Transparenz (ZVEI 2013). Der Dodd-Frank-Act habe demzufolge einen viel zu hohen Bürokratie- und Kostenaufwand und letztendlich einen absoluten Boykott von Rohstoffen aus dem Kongo zur Konsequenz.

-----  
 Verfügbarkeit  
 -----



**Abbildung 7: Zertifizierungsansätze und ihre Bezugspunkte in der Wertschöpfungskette von Konfliktrohstoffen (DIHK 2012).**

Der ZVEI geht davon aus, dass solche Unternehmen aus dem Kongo, die Konflikte unterstützen, dies nicht offen legen würden und daher nur der vollständige Ausschluss des Bezugs von Rohstoffen aus der Region eine Konfliktfreiheit garantieren könnte. Dadurch verliert die dortige Zivilbevölkerung ihre Einnahmequelle. Eine durchgehende Zertifizierung würde die Lieferkette unnötig verteuern, ohne Wahrheiten zu schaffen und Wettbewerbsnachteile für europäische Unternehmen mit sich bringen. Die Produktbezogenheit des Dodd-Frank-Acts über die gesamte Lieferkette wird angekreidet. Allerdings unterstützt der ZVEI den Zertifizierungsansatz der OECD (Due-Diligence-Leitlinien) und die „Conflict-Free-Smelter“ (CFS) – Initiative von EICC und GeSI. Der Ansatz liegt hierbei jeweils in der Zertifizierung der Schmelzbetriebe, die die Metalle aus den Erzen gewinnen (siehe Abbildung 7). Die Schmelzbetriebe (Smelter) werden als Flaschenhals in der Lieferkette angesehen. Es handelt sich um wenige Unternehmen (nach Schätzungen der OECD ca. 200) und die auf die Lieferkettenchronologie bezogene letzte Möglichkeit, die chemisch/geologische Herkunft der Rohstoffe nachzuweisen. 29 solcher Schmelzbetriebe wurden bereits als CFS zertifiziert. Offengelegt werden dabei Minenbetriebe und Händler, die Seriosität der Zulieferer und der chemische/geologische Herkunftsnachweis. Mit solchen zertifizierten Schmelzbetrieben können die Herstellerbetriebe dann Zulieferverträge unter entsprechenden Verpflichtungen abschließen. Denn die Komplexität der Elektronikprodukte, die den Endverbraucher erreichen, erlaube keine Rückverfolgung der Herkunft der Metalle durch die Hersteller bis zur Mine.

Das Öko-Institut geht davon aus, dass der Anteil illegaler Exporte beispielsweise nach Asien durch den Dodd-Frank-Act zunimmt und sich fragwürdige neue Handelsstrukturen bilden. Das Öko Institut bezeichnet ihn als ein Handelsembargo gegen Erze aus dem Kongo, was unter Umständen den Zusammenbruch einiger Bergbaustrukturen zur Folge hat und somit auch Arbeitslosigkeit und Armut verursacht. Viel wichtiger wäre es die Abbau- und Handelsbedingungen, insbesondere im Kleinbergbau, zu verbessern und keine generellen Handelsembargos auszusprechen.

Eine lückenlose Zertifizierung der Handelswege würde auch in Konfliktregionen sicherstellen, dass Rohstoffe konfliktfrei sind (Manhart 2012).

Große Elektronikkonzerne wie beispielsweise Motorola Solutions, HP und Intel haben ein „Solutions for Hope“ Pilot Programm ins Leben gerufen, das den Erhalt von konfliktfreiem Erz aus dem Kongo ermöglichen soll. Mit dem Ziel die lokale Bevölkerung in friedlichen Minenvorhaben zu unterstützen und entgegen des vom Dodd-Frank-Act verlangten, vollständigen Banns gegen Erz aus dem Kongo, konfliktfreies Material weiterhin von dort zu gewinnen (HMT TMD 2014).

Auch am anderen Ende der Wertschöpfungskette für Cobalt spielt die Gesetzgebung eine Rolle bei der Intensivierung der vertikalen Zusammenarbeit von Unternehmen. Alle Batterien fallen unter die Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Verordnung der Europäischen Union. Einmal als WEEE gesammelt, werden sie vom übrigen Elektroschrott isoliert und dann weiter nach der Batterieverordnung behandelt (Vassart 2014). In Deutschland gibt es daher beispielsweise das Gemeinschaftliche Rücknahmesystem für Batterien (GRS). Unternehmen sind verpflichtet für die Wiederaufbereitung ihrer in den Umlauf gebrachten Systeme Sorge zu tragen. Die Batterierecycler müssen die recycelten Mengen und Recyclingeffizienz offen legen.

### 3

## Nutzen nach Funktion und Anwendung

.....  
Nutzen nach Funktion und  
Anwendung  
.....

### 3.1 Eigenschaften

Cobalt steht zwischen Eisen und Nickel im Periodensystem und hat daher ähnliche Eigenschaften wie diese beiden Metalle. Einige Eigenschaften zeichnen es jedoch besonders aus und machen es in vielen Anwendungen letztlich nur unter Einbußen substituierbar. Diese besonderen Eigenschaften von Cobalt zeigt Tabelle 1.

Characteristics	Value
Atomic number	27
Mass number	58.93 u
Density	8.85 g/cm <sup>3</sup>
Melting point	1493 °C
Boiling point	3100 °C
Linear thermal expansion coefficient in 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	20 -100 °C = 12.5 100 - 200°C = 13.6
Phase transition in solid state (hcp -> fcc)	~421 °C
Electrical resistance	6.24 μΩ cm
Curie temperature	1121 °C
Saturation magnetisation	1.45 T
Remanent magnetisation	0.49 T
Crustal abundance	30 ppm

**Tabelle 1: Cobalt-  
Charakteristika (Hunklinger  
2009) (CDI 2006b).**

Der Schmelzpunkt von Cobalt beträgt 1.493 °C und liegt damit – wie viele Eigenschaften – zwischen dem von Eisen und Nickel (KTM 2010). Die Verwandtschaft von Cobalt, Eisen und Nickel führt dazu, dass alle Metalle gut ineinander löslich sind und Phänomene wie Mischkristallhärtung technisch ausgenutzt werden können. Die technisch relevanten Oxidationsstufen von Cobalt sind +II und +III (Schilde 2009). Co(+II) ist am beständigsten in einfachen Cobaltverbindungen. Jedoch bildet das dreiwertige Kation interessante und ungewöhnliche, koordinative Bindungen aus.

Das Oxidations-Reduktionsverhalten von Cobalt und seine Fähigkeit, die verschiedenen Valenzen +II, +II und +III aufzuweisen und vergleichsweise leicht durch Elektronentransfer zwischen ihnen zu wechseln, sind einzigartig (CDI 2014b). Cobalt kann als Elektronenakzeptor Komplexe mit organischen Molekülen ausbilden. Cobaltverbindungen können sich in Lösungen in Radikale mit katalytischer Wirkung zersetzen. Feste Cobaltverbindungen können über Leerstellen im Kristallgitter ebenfalls eine katalytische Wirkung haben.

Eisen, Cobalt und Nickel sind die einzigen Metalle neben den Seltenen Erden, die in metallischer Form und als Legierungen Ferromagnetismus bei Raumtemperatur zeigen. Die Bedeutung des Ferromagnetismus liegt in der Verstärkung äußerer Magnetfelder um hohe Permeabilitätszahlen ( $\mu_r$  einige  $10^5$ ) (Kuypers 2012) und in der

Remanenzmagnetisierung. Ferromagnetische Stoffe können dadurch als Permanentmagnete eingesetzt werden. Cobalt hat die höchste Curie-Temperatur der Elementmagnete, behält also bis zu hohen Temperaturen seinen Ferromagnetismus bei (Hunklinger 2009) (Tabelle 1).

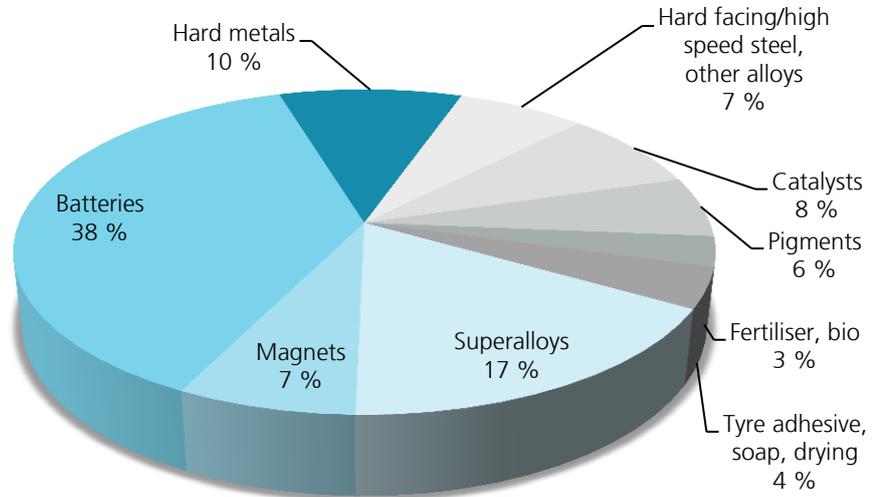
Cobalt bildet wie andere Übergangsmetalle viele farbige Verbindungen aus, zu denen insbesondere Metallmischoxide und Cobaltchlorid zählen. Ob eine Substanz farbig erscheint, liegt an den spezifischen Elektronenübergängen, die aufgrund der Zustandsverteilung im Festkörper möglich sind. Da jedes Element eine andere Elektronenstruktur aufweist, weist es eine einmalige Kombination von möglichen Elektronenübergängen auf. Dies bedeutet aber nicht, dass nicht für das menschliche Auge gleich erscheinende Farben auch mit anderen Substanzen erzeugt werden können (siehe Abschnitt Substitution).

Cobalt ist als einziges Metall in einem Vitamin (Vitamin B<sub>12</sub>) gebunden und für viele Tiere und Menschen essentiell (CDI 2014a).

### 3.2 Anwendungen

Die genannten Eigenschaften und die Funktionen von Cobalt führen zu verschiedenen Anwendungen in der heutigen Wirtschaft. Das mengenmäßige Anwendungsspektrum zeigt Abbildung 8. Die bedeutendste Anwendung von Cobalt ist demnach derzeit in verschiedenen Batteriesystemen zu sehen, allen voran den Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Superlegierungen und Hartmetalle sind prozentual bedeutender als die Anwendung in Magneten. Katalysatoren stellen mit 8 % ein kleineres Anwendungsfeld dar, allerdings haben diese Systeme eine recht hohe Lebensdauer von ca. 10 Jahren (Moss et al. 2011) und tragen somit zur Immobilisierung von Cobalt bei.

**Abbildung 8:**  
Hauptanwendungen von Cobalt weltweit (CDI 2013).



### 3.3 Funktionen

.....  
Nutzen nach Funktion und  
Anwendung  
.....

#### *Batterien:*

Cobalt findet sich nicht nur in Lithium-Ionen Batterien (60 %) sondern auch in Nickel-Metall-Hydrid (NiMH) Batterien (2,5 % - 15 %, meist aber um die 3 %) und Nickel-Cadmium (NiCd) Batterien (1 % - 5 %, meist ca. 1 %) (EPOW 2011) (Energizer 2007) (CDI 2014d).

#### - *Li-Ionen-Batterien:*

$\text{Li}_x\text{CoO}_2$  ist das beliebteste Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Kraytsberg und Ein-Eli 2012). Dieses Material zeigt eine gute elektrische Leitfähigkeit und  $\text{Li}^+$ -Ionen-Beweglichkeit, auf der das Funktionsprinzip eines Lithium-Akkus beruht. Das Redoxpaar  $\text{Co}^{4+}/\text{Co}^{3+}$  ist für die hohe mögliche Betriebsspannung von 4 V verantwortlich. Das Material kann bis zu einer Ladungsdichte von 140 mAh/g aufgeladen werden und ohne Materialzerstörung, d. h. reversibel, können die Hälfte der  $\text{Li}^+$ -Ionen wieder entzogen werden ( $x=0,5$ ) (Kraytsberg und Ein-Eli 2012). Lediglich die Kosten und Kritikalität von Cobalt lassen die Forschung nach Substituten für dieses erprobte Kathodenmaterial suchen. Neben  $\text{LiCoO}_2$  dienen auch Lithium-Mangan-Cobalt-Oxid und Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid als Kathodenmaterialien. Im Vergleich mit bekannten Kathodenmaterialien, die kein Cobalt enthalten, weisen diese stets die höchsten Energiedichten auf und sind daher besonders in Anwendungen, in denen hohe Leistungsdichten gefragt sind, schwer zu ersetzen (Buchmann 2014).

#### - *NiMH-Batterien:*

Cobalt ist Bestandteil der Legierung für das Elektrodenmaterial, die auch Nickel, Lanthan und weitere Metalle enthält (CDI 2014d). Die besondere Eigenschaft dieser Legierung ist das Vermögen Wasserstoff in recht großen Mengen reversibel einzulagern. Als Grundlage für das Elektrodenmaterial werden Nickel-Hydroxid, mit Cobalt beschichtetes Nickel-Hydroxid und Nickel-Oxyhydroxid eingesetzt (Tanaka Chemical Corporation 2013).

#### - *NiCd-Batterien:*

Die Kathode von NiCd-Batterien besteht entweder aus einem schaumartigen Nickelmaterial, das mit kugelförmigen Nickel-Hydroxid Partikeln gefüllt ist oder aus einem gesinterten Nickelsubstrat, dass mit Nickel-Hydroxid imprägniert wurde (CDI 2006a). Cobalt wird als Oxid oder Hydroxid als Additiv hinzugefügt, für die Erhöhung der Leitfähigkeit, mechanische Stabilisierung und die Erhöhung der Zersetzungsspannung (CDI 2006a).

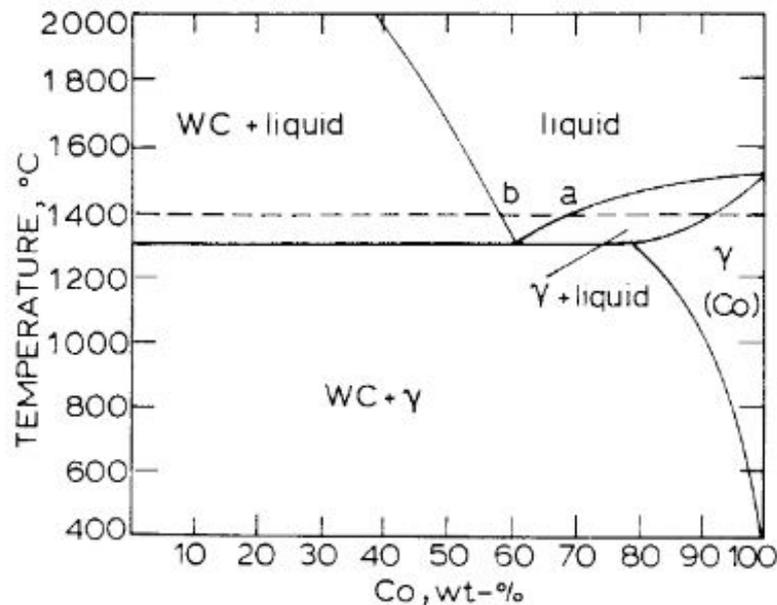
#### *Superlegierungen:*

Der Cobaltgehalt in Superlegierungen schwankt zwischen 10 % und über 60 % (Bedder und Baylis 2013), meist liegt er aber bei 10 - 15 % (KTM 2010). Legierungen mit sehr hohen Cobaltgehalten werden als cobaltbasiert bezeichnet (Bedder und Baylis 2013). Die Funktion von Cobalt ist zum einen die Mischkristallhärtung (solid solution strengthening) und zum anderen die Verringerung der Löslichkeit von Titan und Aluminium in der Matrix. Dies führt dazu, dass diese beiden Metalle Ausscheidungen bilden (KTM 2010). Somit führt der Zusatz von Cobalt zu zwei Festigkeitsmechanismen, zur Mischkristallhärtung und zur Ausscheidungshärtung, beide bewirken ein erschwertes Wandern von Versetzungen durch den Kristall und damit eine erschwerte Verformbarkeit. cobaltbasierte Superlegierungen zeigen einen höheren Widerstand gegen Sulfidierung als Nickel- oder eisenbasierte Systeme, was insbesondere für den Einsatz in Gasturbinen elementar ist (KTM 2010). Auch die Festigkeit bei hohen Temperaturen ist größer als die der anderen beiden Systeme.

#### Hartmetalle:

Cobalt eignet sich in besonderem Maße als Bindemittel von Wolframcarbid (WC). In metallischer Form hat es nicht nur eine sehr gute Zähigkeit und eignet sich deshalb als Matrixmaterial für die spröden Wolframkarbidpartikel, sondern bildet auch besonders hohe Adhäsionskräfte zur Wolframcarbidoberfläche aus und mit diesem ein so genanntes Pseudo-Eutektikum (Abbildung 9) (Merkel 2008). Das Eutektikum sorgt i. A. dafür, dass eine Legierung bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes der Einzelelemente schmelzbar ist und dadurch mit vergleichsweise geringem Energieaufwand verarbeitet werden kann. Im Falle der Hartmetalle auf WC-Cobalt-Basis wird allerdings nicht von Legieren, sondern von Flüssigphasensintern gesprochen, wenn der Herstellungsprozess beschrieben wird. Da die Carbide als Feststoff zum größten Teil erhalten bleiben und die cobaltreiche Phase allein flüssig wird und eine Matrix bildet.

Abbildung 9: Phasendiagramm des Werkstoffverbundes Wolframcarbid-Cobalt. Knapp oberhalb von 60 Gew.-% Co liegt das Eutektikum, das das Flüssigphasensintern bei mäßigen Temperaturen möglich macht (Zhang 1999).



#### Katalysatoren:

Bei der Fischer-Tropsch-Katalyse enthält ein Kubikmeter Katalysator 776 kg Cobalt und 16 kg Ruthenium, die auf einen Aluminiumoxidträger aufgebracht werden (Moss et al. 2011). Dabei wird ein Gemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff mittels heterogener Katalyse in verschiedene Kohlenwasserstoffe (Alkane, Alkene, Alkohole, etc.) umgewandelt.

Ein  $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ -Katalysator wird bei der Hydroformylierung von Alken mit  $\text{CO}_2$  und Wasserstoff zum Aldehyd verwendet (Schilde 2009).

Cobalt-Thoriumoxid-Kieselgur-Katalysatoren werden bei der Synthese von Kohlenwasserstoffen verwendet (Young 2014).

Cobalt wird in Form von  $\text{Co}_3\text{O}_4$  als Katalysator für die Oxidation von Ammoniak zu Salpetersäure verwendet und ist hier die günstigere, wenn auch weniger selektive Alternative zu Platinkatalysatoren (Smojver 1997).

#### Magnete:

Cobalt verursacht einen höheren Widerstand gegen Entmagnetisierung in magnetischen Systemen (KTM 2010). Daher findet es in eisenbasierten und Aluminium-Nickel-(AlNi)-basierten Magneten ebenso Anwendung wie in Samarium-Cobalt-

Magneten. Letztere haben sehr ähnliche Kennwerte wie Neodym-Eisen-Bor-(NdFeB)-Magnete und sind aktuell die Zweitbesten auf dem Markt (Moss et al. 2011). Was sie aber gesondert auszeichnet ist die Hochtemperaturbeständigkeit aufgrund der hohen Curie-Temperatur von Cobalt. In bestimmten Nischenanwendungen sind sie daher erste Wahl. Die erreichbare magnetische Feldstärke in Bezug auf das Magnetvolumen/die Masse ist allerdings nur halb so groß wie die von NdFeB, weshalb sie für Elektromotoren und Transformatoren uninteressant sind. Gleiches gilt für AlNiCo und ferritische Magnete (Moss et al. 2011).

#### *Hardfacing/Stellite:*

Die Stellite bestehen aus Cobalt-Chrom-Legierungen, denen Wolfram und Molybdän zugefügt werden, um die Festigkeit zu erhöhen. Die Cobalt-Chrom-Legierungen zeigen eine hohe Korrosionsbeständigkeit, die Cobalt ohne Chrom jedoch weniger zeigt. In dieser Zusammensetzung erreichen die Stellite hohe Festigkeiten auch bei erhöhten Temperaturen und werden seit ca. 80 Jahren in Schneidwerkzeugen eingesetzt (KTM 2010). Die heutigen Legierungen enthalten daneben Kohlenstoff, um eine Härtung herbeizuführen.

Äußerste Härte und Verschleißwiderstand ist bei der Beschichtung von Deckbändern gefragt, die Turbinenschaufeln fixieren. Diese werden daher mit Stellites beschichtet, indem eine Schicht dieser Legierungen aufgeschweißt wird. Alle Berührungspunkte der Schaufeln untereinander sind mit diesem Material versehen, sodass der Verschleiß minimiert wird (MTU 2014).

#### *Kupferlegierungen:*

In Kupferlegierungen wird Cobalt zusammen mit Beryllium zur Ausscheidungshärtung eingesetzt (Ibi 2014).

„CuCoBe kommt zum Einsatz, wenn die üblichen Kupferlegierungen nicht mehr ausreichende Festigkeitseigenschaften aufweisen; so zum Beispiel bei hochbeanspruchten Teilen für die Widerstandsschweißindustrie mit hoher Lebensdauer“ (Forgu 2014).

#### *Farben:*

Nicht nur die Farbigkeit des Cobaltoxids selbst machen es als Pigment interessant, sondern auch die gute Verarbeitbarkeit. Es zeigt eine hervorragende Löslichkeit und Stabilität (CDI 2014c). Die Farbigkeit resultiert aus den element- bzw. verbindungsspezifischen Elektronenübergängen aufgrund der Anregung durch sichtbares Licht.

#### *Düngemittel, Tierfutterzusatz:*

Cobalt wird in der Landwirtschaft für Rinder- und Schafzucht als Düngerzugabe, Wasserzusatz und in Lecksteinen eingesetzt. Vitamin B<sub>12</sub> ist das einzige Vitamin, das mit 4,3 Gew.-% Co ein Schwermetall enthält (Young 2014). Cobalt wirkt nicht direkt als Pflanzennährstoff. Es wird stattdessen Düngemitteln zugesetzt, um eine Anreicherung in Nutzpflanzen zu erzielen. Diese dienen wiederum als Futtermittel und sichern die Cobaltversorgung von Nutztieren (Stemme 2002). Die Beimischung erfolgt in Form von Cobalt-Carbonat (Solan 2014).

#### *Reifenkleber, Seifen, Trockenmittel:*

Organische Cobaltverbindungen, Linoleate, Resinate, Oleate, Stearate, Tallate und Naphtenate, mit 4 - 12 Gew.-% Cobalt wirken als Trockenmittel (Young 2014). Solche Verbindungen von Metallen mit organischen Säuren werden Metallseifen genannt. Sie sind wasserunlöslich und nicht flüchtig. In Lacken und Farben ersetzen cobalthaltige Trockenmittel heutzutage ehemals eingesetzte Bleiverbindungen, wobei es in geringeren Konzentrationen benötigt wird (Auro 2008).

Eine andere Art von Trockenmittel ist das Silikagel, das häufig in Chemie-, Pharma-, aber auch in der Lebensmittelindustrie (insbesondere im asiatischen Raum) und in Wissenschaft und Forschung eingesetzt wird. In diesem hatte bis in jüngerer Vergangenheit Cobalt im so genannten Blaugel die Funktion der Indikation der Wassersättigung, nicht der Wasseraufnahme an sich. Hier wird es in Form von Cobalt-Chlorid eingesetzt: Cobalt(II)-chlorid ist stark hygroskopisch und zeigt einen charakteristischen Farbwechsel von blau nach violett, bei der Sättigung mit Wasser. Das violette Cobalt(II)-chlorid ist ein Hexahydrat ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (Schilde 2009).

### 3.4 Substitution

Aufgrund der ähnlichen Eigenschaften zu Cobalt, die das Nachbarlement Nickel aufweist, kann dieses für bestimmte Anforderungen als Substitut von Cobalt in Legierungen dienen. Eine Substitution in Schneid- und Verschleißresistenzwerkstoffen, in Turbinen, Nickel-Eisen-Magneten, Erdöl-Katalysatoren und Batterien ist meist unter Performanzverlust möglich (EPOW 2011). Inwiefern Cobalt in einzelnen Anwendungen und durch welche Metalle oder Materialien ersetzt werden kann, beschreibt der folgende Überblick im Detail.

#### *Batterien:*

Der Bedarf an aufladbaren Akkumulatoren wird anhalten und wächst durch die Anwendung in Elektro- und Hybridfahrzeugen. Allerdings wird nicht zwangsweise der Cobaltbedarf mitwachsen, da sich die Technologien beständig verändern. Industriemarktprognosen sagen einen Marktanteil von 70 % in den kommenden Jahren für NiMH-Batterien bei Hybridfahrzeugen voraus und Cobalt soll als zu teures Metall in den Li-Ionen-Batterien durch Nickel, Mangan, Aluminium oder Phosphor ersetzt werden (EPOW 2011).

Die Substitution oder Verringerung des Cobaltgehalts in NiMH-Batterien ist noch nicht vollständig gelungen, scheint aber in greifbarer Nähe (CDI 2006a). Ebenso verhält es sich mit Li-Ionen-Batterien, in denen  $\text{LiNiO}_2$  und  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  als Kathodenmaterialien eingesetzt werden können und mittlerweile das Eigenschaftsprofil des cobalthaltigen Materials fast aufgeholt haben (CDI 2006a). Der Grad der Substitution wird hauptsächlich durch den Preis von Cobalt bestimmt.

#### *Superlegierungen:*

Es existieren Substitutionsmaterialien mit ähnlichen Eigenschaften (Halme et al. 2012). So gibt es viele nickelbasierte Systeme mit ausgezeichneten Eigenschaften, in denen Cobalt nicht essentiell ist. Des Weiteren gibt es technische Keramiken, die anstelle von Superlegierungen in Hochtemperaturanwendungen oder wenn große Härte gefragt ist, eingesetzt werden können, wobei die Duktilität und Zähigkeit metallischer Materialien nicht erreicht werden können (EPOW 2011).

#### *Hartmetalle:*

Auf der einen Seite scheinen mögliche Substitute für Hartmetalle, die insbesondere für Werkzeuge eingesetzt werden, momentan nicht zufriedenstellend zu sein (Halme et al. 2012).

Auf der anderen Seite werden vermehrt Substitute gesucht, da der Hartmetallstaub giftig ist und Cobalt durch die REACH-Verordnung als sehr giftig für die menschliche Gesundheit eingestuft wurde (EUC 2014b). Im Rahmen der European Innovation Partnership (EIP) ist ein internationales Konsortium aus Industrie und Wissenschaft damit beauftragt, Substitute zu finden.

#### *Katalysatoren:*

Substitutionsmaterialien mit ähnlichen Eigenschaften existieren für bestimmte Anwendungen (Halme et al. 2012). So können beispielsweise Kalium- und Natriumbasierte Katalysatoren eingesetzt werden. In vielen Anwendungen ist Cobalt aber nicht substituierbar und eine Substitution auch nicht zu erwarten, da im Gegenteil Cobalt selbst als Substitut für die teureren Platingruppenmetalle dient (Sun 2012). Da Katalysatoren in relativ geringen Mengen benötigt werden und wiederverwendet werden können, spielt hier der Preis eine geringere Rolle. Außerdem ist die Toxizität nicht von Bedeutung, da keine Stäube entstehen. Der Druck, hier Substitute zu finden ist im Vergleich zu anderen Anwendungen gering.

#### *Magnete:*

Substitutionsmaterialien mit ähnlichen und besseren magnetischen Eigenschaften existieren (Halme et al. 2012). NdFeB-Magnete sind derzeit die stärksten bekannten Permanentmagnete und werden nur in einigen Spezialanwendungen durch weichere Samarium-Cobalt-Magnete ersetzt. Da NdFeB-Magnete allerdings bisher oft das kritische Metall Dysprosium aus der Gruppe der schweren Seltenen Erden enthalten, sind evtl. SmCo-Magnete als Substitut für sie zu sehen. Beide kommen nicht ohne Seltene Erden aus und sollten somit längerfristig durch Materialsysteme mit weniger kritischen Metallen ersetzt werden. Die aktuelle Situation begründet keine übermäßige Bewertung der strategischen Relevanz von Cobalt in Magneten.

#### *Hardfacing Legierungen/Schnellarbeitsstähle:*

In Legierungen mit hohen Härten können Barium und Strontium Cobalt substituieren (EPOW 2011). Dies ist jedoch nicht ohne Verluste bei der Korrosionsbeständigkeit möglich. In Bezug auf eine hohe Korrosionsbeständigkeit eignen sich wiederum die Keramiken besser, wie bereits bei den Superlegierungen beschrieben.

#### *Kupferlegierungen:*

Cobalt dient der Substitution des giftigen Berylliums. In CuCo<sub>2</sub>Be-Legierungen kann Cobalt jedoch auch durch Nickel ersetzt werden. Kupfer-Nickel-Cobalt-Beryllium ist in seinen Eigenschaften mit Kupfer-Cobalt-Beryllium identisch. Wird Cobalt vollkommen durch Nickel ersetzt, erhöht sich die elektrische und thermische Leitfähigkeit, jedoch bei geringeren Festigkeits- und Härtwerten (DKI 2012).

#### *Farben:*

Substitution durch Cer, Eisen, Blei, Vanadium oder Manganverbindungen ist in Pigmenten denkbar, um ähnliche Farbigkeit zu erreichen (EPOW 2011). Sie erreichen aber nicht die gute Löslichkeit und Stabilität von Cobalt. Das Cobalt Development Institut gibt daher die Aussage, es gäbe keinen richtigen Ersatz für Cobalt in der Anwendung als Pigment (CDI 2014c).

#### *Düngemittel, Tierfutterzusatz:*

Da Cobalt für Lebewesen in Form von Vitamin B<sub>12</sub> essentiell ist, wird es hier niemals ein Substitut geben.

#### *Reifenkleber, Seifen, Trockenmittel:*

Bioverfügbare Cobaltverbindungen, wie Stäube von Blaugel (häufig eingesetztes Trockenmittel, das aus Kieselgel und Cobaltchlorid besteht) wurden im Jahr 2000 als wahrscheinlich krebserregend und in den Jahren 2008 und 2011 als besonders besorgniserregend und fortpflanzungsschädigend eingestuft. Es ist daher mit Bemühungen zu rechnen, es als Trockenmittel zu substituieren, beispielsweise durch Orangegel. Eine Substitution von Cobalt unter Erhalt der guten Eigenschaften aktuell eingesetzter Trockenmittel ist derzeit laut Industrie nicht möglich (Auro 2008). Trockenmittel mit deutlich längeren Trockenzeiten können auf Basis von Eisen, Cer oder Mangan hergestellt werden. Für Farben und Lacke scheinen diese nicht von

-----  
Nutzen nach Funktion und  
Anwendung  
-----

Interesse zu sein, für andere Anwendungen finden sich allerdings beispielsweise im Trockenmittelsortiment von Merck Millipore keine Cobalt-Trockenmittel mehr. Angeboten werden als Ersatz Trockenmittel auf Magnesium- Kalzium- oder Kieselgelbasis mit Aluminium-Eisen-Sulfat- oder organischen Indikatoren (Orangegel) (Albert 2004). Es handelt sich um Substitute die aus so genannten „Elements of Hope“ also in der Versorgungslage unkritischen und noch dazu ungiftigen Stoffen bestehen.

## 4

# Kritikalität

Kritikalität

Die Kritikalität von Cobalt wird mithilfe der Entscheidungsmatrix nach Reller auf Basis von Experteneinschätzungen und den hier aufgeführten Informationen bewertet, (Tabelle 2) zu sehen. Hinzugefügt werden die Kriterien „Immobilisierung“ und „Dissipation“. Jedes Kriterium wird nach dem angegebenen Bewertungsschlüssel auf einer Skala von eins bis vier hinsichtlich der hervorgerufenen Kritikalität des Elementes eingestuft. Der Durchschnitt aus allen Werten ergibt die Gesamtkritikalität und ermöglicht eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Elementen.

Geological Availability	3
Geopolitical Parameter	4
Economic Development	3
Application Potential	4
Ecological Parameter	2
Recycling and Substitution	3
Immobilization	2
Dissipation	3
<b>Average</b>	<b>3.0</b>

**Tabelle 2: Kritikalitätsmatrix nach Reller für Cobalt. Bewertungsschlüssel: 1 unkritisch, 2 eher unkritisch, 3 eher kritisch, 4 kritisch.**

Nachfolgend wird die stoffspezifische Bewertung der Kriterien aus Tabelle 2 näher erläutert.

### *Geologische Verfügbarkeit:*

Cobaltreserven sind in großem Maße vorhanden. Angaben der USGS liefern eine Summe von ca. 7,5 Mio. t. Allerdings befinden sich fast 50 % dieser Reserven der DRC. Der HHI für Cobalt beträgt wie erwähnt 2.571. Analog zur örtlichen Verfügbarkeit der Reserven der beträgt die Gesamtminenförderung der DRC 49 %. Die statische Reichweite, bei den aktuell verfügbaren Reserven, beträgt 61 Jahre, was beispielsweise im Vergleich zu Tantal gering ist, im Vergleich zu Scandium mäßig. Aufgrund der Tatsache, dass die Länderkonzentration als moderat einzustufen ist, im Vergleich bspw. zu den Seltenen Erden und aufgrund der Reichweite, ist die geologische Verfügbarkeit als eher kritisch einzustufen.

### *Geopolitischer Faktor:*

Durch die hohe Länderkonzentration (49 % der Minenförderung) in einem Bürgerkriegsland, ist die Bewertung „kritisch“ für den geopolitischen Faktor hinsichtlich der Kritikalität von Cobalt vorzunehmen.

### *Wirtschaftliche Entwicklung:*

Cobalt ist ein strategisches Technologiemetall, die Nachfrage ist groß und steigt stetig, die Reserven sind absehbar. Das bedeutet, eine wesentliche Steigerung der Produktion ist nach dem aktuellen Stand der Technik nicht möglich ohne die Reichweite nachteilig zu beeinflussen. Der geopolitische Faktor sorgt zudem für eine unsichere Versorgungslage. Weiterhin erschwerend kommt hinzu, dass Cobalt fast nur durch Koppelproduktion von Nickel (57 %) und Kupfer (37 %) (CDI 2013) gewonnen wird

und die Versorgung damit immer von den Märkten dieser beiden Hauptmetalle abhängt.

Laut Deutscher Rohstoffagentur liegt der HHI der Firmenkonzentration im Bergbau bei 672 Punkten, bei der Raffinadeproduktion bei 436 Punkten (Buchholz et al. 2012). Diese ist demnach unkritisch. Die derzeitige wirtschaftliche Entwicklung wird daher insgesamt als „eher kritisch“ bewertet.

#### *Anwendungspotential:*

Die Verbreitung von Li-Ionen-Akkus, die derzeit am effektivsten mit Cobalt arbeiten, wird durch die Anwendung in Kommunikationstechnologien und Elektromobilität weiter steigen. Auch Nebenanwendungen sind Zukunftsmärkte. Treibstoffentschwefelung, besonders leistungsfähige Stähle, Magnete (Nd-Fe-B auch nicht unbegrenzt verfügbar), Nahrungsmittelproduktion und ganz besonders auch die Superlegierungen, da der Luftfahrtsektor stark wächst. Aufgrund seiner Vielfältigkeit und einem Wachstum bei fast allen Anwendungen wird die Kritikalität bezogen auf das Anwendungspotential als „hoch“ angesehen.

#### *Ökologischer Parameter:*

Verschiedene Umweltparameter des Projektes ProBas des Umweltbundesamtes für die Erzeugung von Cobalt (UBA 2014), erlauben die Einstufung der Kritikalität von Cobalt in Bezug auf seine Ökologie. Der kumulierte Energieaufwand (KEA) für die Gewinnung von Cobalt-Metall beträgt 103.009 MJ/t. Im Vergleich zu Metallen, deren Gewinnung als sehr energieintensiv eingestuft wird, ist dieser Wert eher niedrig. Aluminium weist mit 140.700 MJ/t einen fast eineinhalbfachen Wert auf. Der Materialaufwand (Kumulierter Rohstoffaufwand – KRA) ist für Cobalt mit 56,9 t/t ausgesprochen klein. Als unkritisch können die Auswirkungen des Bergbaus trotzdem nicht eingestuft werden, da auch bei Cobalt Flächenabtrag und Schadstoffausstoß negative Auswirkungen auf die Umwelt haben. Daher erhält es die Bewertung „eher unkritisch“.

#### *Recycling und Substituierbarkeit:*

Recyclingmöglichkeiten bei Hauptanwendung sind vorhanden, aber nur teilweise umgesetzt (Umicore, Accurec). Die Sammlung ist möglich, dennoch sind die logistischen Herausforderungen das größte Hindernis. Substituierbar ist Cobalt bei Magnetanwendung und als Legierungselement, sowie in Farben. Der Eigenschaftsverlust ist nicht zu groß. Allerdings ist eine gute Substituierbarkeit in der Hauptanwendung Li-Akkus ohne Leistungsverlust noch nicht vorhanden. Insgesamt ergibt sich derzeit eine eher kritische Bewertung, wenn auch eine Besserung für die Zukunft vorstellbar ist.

#### *Immobilisierung:*

Unter dem Aspekt der Immobilisierung wird betrachtet, wie lang Cobalt in seinen Hauptanwendungen gebunden ist. Durch die Hauptanwendung in Batterien, die größtenteils für relativ kurzlebige Elektronikprodukte eingesetzt werden, ist es eher unkritisch. Die Anwendungen im Chemie- und Futtermittelbereich sind sogar extrem kurzlebig. Als Legierungsbestandteil erhält Cobalt die höchste Langlebigkeit. Es handelt sich hier aber meist um Einsätze im Bereich von mehreren Jahren, nicht Jahrzehnten, da beispielsweise Triebwerke für Flugzeuge, die das Haupteinsatzgebiet von Superlegierungen ausmachen, regelmäßig gewartet und ausgetauscht werden. Auch in Katalysatoren ist das Metall ca. 10 Jahre gebunden. Da Superlegierungen und weitere Legierungen sowie Hartmetalle insgesamt etwa 30 % der Cobaltanwendungen ausmachen, ergibt sich auch bezüglich der Immobilisierung keine unkritische Bewertung.

*Dissipation:*

Nach dem Stand der Technik müsste die Dissipation von Cobalt aufgrund seiner Hauptanwendung in Batterien nicht besonders hoch sein, da es gute Recyclingmöglichkeiten gibt. Allerdings funktionieren die Rücknahmesysteme nicht vollständig und sind zudem ausschließlich auf hochentwickelte Länder begrenzt. In Kombination mit einigen sehr dissipativen Anwendungen von Cobalt (Pigmente, Futtermittelzusatz, Chemikalien) ergibt sich dadurch ein eher kritischer Wert für dieses Kriterium.

-----  
Kritikalität  
-----

Cobalt kann somit als eher kritisch eingestuft werden. Vor allem aufgrund des hohen geopolitischen Risikos durch den Abbau in der Demokratischen Republik Kongo sowie Restriktionen gegenüber solchen Konfliktregionen und Konfliktmineralen. Hinzu kommt ein kritisches Anwendungspotential, welches vor allem durch Batteriesysteme, vorwiegend Lithium-Ionen-Akkus, begründet ist, deren Bedarf auch zukünftig steigen wird. Während beispielsweise der Cobaltbedarf für Batterien im Jahr 1995 für 3 % der Cobaltnachfrage verantwortlich war, waren es 2003 11 %, 2006 rund 22 % und 2013 schon rund 38 % (Erdmann et al. 2011; Buchert 2009). Auch weitere Studien haben Cobalt als kritisch eingestuft. So wurde es sowohl in der Kritikalitätsanalyse der EU Ad-hoc Working Group des Jahres 2010 als auch im Jahr 2014 zur Liste der kritischen Rohstoffe gezählt (EUC 2010, 2014a)

## Unternehmensclustering

In diesem Kapitel werden Unternehmen geclustert, die Komponenten und Halbzeuge aus Metallpulvern und Vorprodukten herstellen. Für diese Unternehmen ist die Anwendung des Metalls relevant. Eine Stufe vor den Verarbeitern in der Wertschöpfungskette stehen, solche Unternehmen die beispielsweise Metallpulver. Auch diese haben ein Interesse an den Entwicklungen im Bereich der Anwendungen, da sie den Absatz der Metallpulver und ihr Kundenprofil bestimmen. Solche Unternehmen sind im Falle Cobalts Treibacher, H. C. Starck, Alfa Aesar, Shepherd, etc.

### 5.1 Clustering nach Funktionen

Wie in Kapitel 3.3 dargestellt, erfüllt Cobalt in unterschiedlichen Anwendungen verschiedene Funktionen, die von den verarbeitenden Unternehmen genutzt werden. Je nach Funktion ist ein produktspezifisches Know-How, was die Anwendbarkeit insbesondere aber auch die Herstellung betrifft, von Nöten. In einem einfachen Ansatz werden zunächst cobaltverarbeitende Unternehmen und Cobaltprodukt-Hersteller nach der jeweiligen Funktion, die Cobalt erfüllt, geclustert. Diese und alle weiteren Unternehmenslisten erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern geben lediglich einen kurzen Überblick über wesentliche Akteure.

Die Clustering nach Funktion liefert die entsprechende Tabelle im Unternehmenskompendium.

### 5.2 Clustering nach Relevanz (strategisch, technisch, ökonomisch)

**Definition ökonomische Relevanz:**

*Das Metall hat für das Unternehmen eine hohe ökonomische Relevanz, wenn es heute und kurzfristig in großen Mengen durch das Unternehmen umgesetzt wird. Dies begründet sich durch den Gehalt des Metalls in den umgesetzten Produkten bzw. der Menge der umgesetzten Produkte.*

**Definition technische Relevanz:**

*Das Metall hat für das Unternehmen eine hohe technische Relevanz, wenn es in einer Wachstumsanwendung mittelfristig eine Schlüsselrolle spielt.*

**Definition strategische Relevanz:**

*Das Metall hat für das Unternehmen eine hohe strategische Relevanz, wenn es nicht-substituierbar ist und in Wachstums- und Zukunftstechnologien eingesetzt wird. Es ist somit für das Unternehmen langfristig von strategischer Bedeutung.*

Ausgehend von diesen Definitionen der unterschiedlichen Relevanz von Cobalt für cobaltverarbeitende Unternehmen wird eine Bewertung vorgenommen, die in Tabelle 3 dargestellt ist.

Für die Bewertung der ökonomischen Relevanz werden die oben genannten Anwendungen von Cobalt noch weiter unterteilt. Das liegt daran, dass verschiedene Batteriesysteme die Cobalt enthalten das Metall jeweils zu sehr unterschiedlichen Gewichtsanteilen aufweisen. Eine vollständige Betrachtung aller Katalysatorarten war aufgrund der Datenlage nicht möglich. Bei den Superlegierungen und HSS/Hardfacing gibt es Überschneidungen durch die Tatsache, dass Stellite teils den cobaltbasierten Superlegierungen und teils den Hardfacing-Legierungen zugeordnet werden.

**Application**  
wt.-% Co

*Economic  
Relevance*

*Technical  
Relevance*

*Strategic  
Relevance*

.....  
Unternehmensclustering  
.....

**Batteries**

*LiCoO<sub>2</sub> 60.0*

*LiNiMnCoO 10.0 - 20.0*

*LiNiCoAlO 9.0*

*NiMH, NiCd ~1.0 - 3.0*

**Superalloys**

*Co-based 40.0 - 60.0*

*Ni-based 10.0 - 20.0*

*Fe/Ni-based 0.5*

**Hard Metals**

*Hard metals 3.0 - 25.0*

*Cutting tools 3.0 - 12.0*

**Catalysts**

*Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MoO<sub>3</sub> < 1.0*

*Fischer-Tropsch 19.0*

**Magnets**

*SmCo 60.0 - 77.0*

*AlNiCo 5.0 - 35.0*

*FeCrCo 5.0 - 12.0*

**HSS/Hardfacing**

*Stellites 40.0 - 60.0*

*HSS 0.0 - 11.0*

*Beryllium copper  
0.3 - 1.0*

**Tabelle 3: Übersicht über die Einordnung nach Relevanzstufen des Metalls Cobalt.**

**Rot: hohe Relevanz,  
Gelb: mittlere Relevanz,  
Grün: niedrige Relevanz.**

**Application**  
wt.-% Co

*Economic  
Relevance*

*Technical  
Relevance*

*Strategic  
Relevance*

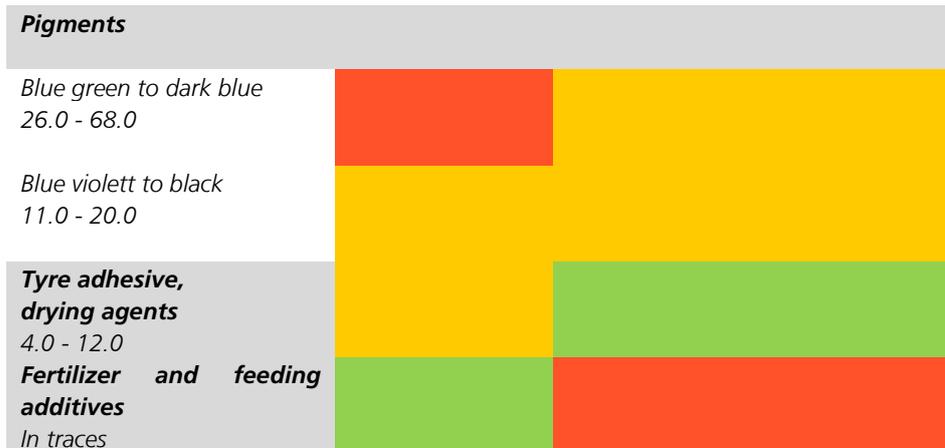
**Pigments**

*Blue green to dark blue*  
26.0 - 68.0

*Blue violett to black*  
11.0 - 20.0

**Tyre adhesive,  
drying agents**  
4.0 - 12.0

**Fertilizer and feeding  
additives**  
In traces



### 5.2.1 Hohe ökonomische Relevanz

Ab einem Gewichtsanteil von ca. 20 % im vertriebenen Produkt hat Cobalt eine hohe wirtschaftliche Relevanz. Bei unter 1 % eine geringe. Im Falle der Batterien ergibt sich nur für Lithium-Ionen-Batterien mit dem Kathodenmaterial LiCoO<sub>2</sub> nach obiger Definition eine hohe ökonomische Relevanz. Weitere cobaltenthaltende Kathodenmaterialien weisen unter 20 % Cobalt auf, die Batteriesysteme NiMH und NiCd nur bis zu 3 % bzw. 1 %.

Bei den Magneten stechen die Samarium-Cobalt-Legierungen (SmCo) mit einem sehr hohen Cobalt-Gewichtsanteil von 60 % bis 77 % hervor. Auch Aluminium-Nickel-Cobalt-Magnete (AlNiCo) können bis zu 35 % Cobalt enthalten, wurden hier aber mit mäßiger ökonomischer Relevanz bewertet, da die Anteile bis auf 5 Gew.-% heruntergehen können und die meisten Magnete dieser Gattung eher geringere Cobaltanteile aufweisen. Hinzu kommt, dass AlNiCo-Hersteller meist auch Hersteller von SmCo sind.

Unternehmen, für die Cobalt eine hohe ökonomische Relevanz hat, werden in der entsprechenden Tabelle im Unternehmenskompodium aufgelistet.

### 5.2.2 Hohe technische Relevanz

Wird Cobalt in einer Technik mit starken Wachstumsprognosen eingesetzt, hat es eine hohe technische Relevanz, sind die Wachstumsprognosen eher neutral oder negativ, so ergeben sich entsprechend mittlere und geringe technische Relevanzen.

Unternehmen, für die Cobalt eine hohe technische Relevanz hat, werden in der entsprechenden Tabelle im Unternehmenskompodium aufgelistet.

### 5.2.3 Hohe strategische Relevanz

Treten hohe Wachstumsprognosen in Verbindung mit einer nicht möglichen oder nicht gewollten Substituierbarkeit auf, hat Cobalt für das Unternehmen eine hohe strategische Relevanz, bei geringen Wachstumsprognosen und/oder geringen

Schwierigkeiten bei der Substitution bzw. politisch gewollter Substitution ist die strategische Relevanz nicht als besonders hoch einzustufen. Unternehmen, für die Cobalt eine hohe strategische Relevanz hat, werden in der entsprechenden Tabelle im Unternehmenskompendium aufgelistet.

-----  
 Unternehmensclusterung  
 -----

### 5.3 Clusterung nach Parallel-Verarbeitung

Tabelle 4 gibt einen Überblick über Metalle, die neben Cobalt in den verschiedenen Branchen für die Herstellung der Produkte verwendet werden. Die Komplexität der Verflechtung unterschiedlichster Metalle aufgrund ihrer Funktionen und Anwendungen wird deutlich.

<b>Application</b>	<b>Metallic elements contained besides Co</b>
Batteries	Mn, Li, W, Ni, La, Ce
Superalloys	Fe, Al, Cr, Ni, W, Ta, <b>Mo</b> , Cu, Zn, Sn, Ti, Si, Mn
Hard Metals	W, Ti, Ta, Nb, Fe, Cr, Ni, <b>Mo</b>
Catalysts	Mn, Cu, Li, Al, V, Zn, Zr, Bi, Sb, <b>Mo</b> , PGM
Magnets	Fe, Nd, Sm, Al, Ni, Cu
Hardfacing/HSS/ Beryllium Copper Alloys	Fe, Al, Cr, Ni, W, Ta, <b>Mo</b> , Cu, Zn, Sn, Ti, Si, Mn
Pigments	Zr, V, Cr, Fe, Si, Sn, Pr, Cd, Se, Mg, Sb, Zn, Ni, Mn
Tyre Adhesives/Metal Soaps/ Drying Agents	Na, Ti, Si, C, Mg, K, Mn, Al, Ca, Fe
Fertilizer-/Feeding Additive	Se, Cu, Mg, Na

**Tabelle 4: Neben Cobalt genutzte Elemente in denselben Anwendungen.**

Eine Unternehmensclusterung am Beispiel von Cobalt und Molybdän gibt Kapitel 6 des Kompendiums. Diese zeigt die Verschwisterung dieser beiden Metalle innerhalb der hier aufgeführten Unternehmen und im Rahmen der zugänglichen Informationen.

## Vorhandene Re-Phasen

Die Recyclingraten von Cobalt liegen laut EU/UNEP bei über 50 % und damit im Vergleich zu vielen kritischen Metallen recht hoch (UNEP 2011). Dabei handelt es sich um End-of-Life Produkte, aus denen der Cobaltanteil unter Erhaltung der Funktion wiederverwendet werden kann. Weiter gesteigerte Recyclingraten werden hier dennoch als gute Möglichkeit gesehen, die Abhängigkeit von Cobalt aus Konfliktregionen zu verringern (EPOW 2011). Insgesamt wird von Recyclingraten von mindestens 68 % ausgegangen, Recyclingcobalt macht 32 % des auf den Markt gebrachten Cobalts aus. Letztere Rate ist im Vergleich zu anderen, insbesondere den Massenmetallen, noch relativ niedrig. Es wird jedoch von einem Anstieg ausgegangen, wobei die EU stärker auf Recyclingmaterial setzt als die USA (EPOW 2011) (EUC 2010). Schon heute wird Cobalt aus den Kathodenmaterialien von Batterien zurückgewonnen, Das Recycling wird von der Cobaltindustrie durchgeführt. Bis 2016 will die EU hier eine Quote von 40 % erreichen. Der Primärcobaltbedarf wird Schätzungen zufolge durch diese Maßnahmen in Kombination mit Substitutionsbemühungen sinken, wovon sich eine wachsende Unabhängigkeit von Importen erhofft wird. Aus Anwendungen in Pigmenten, Farben, Trockenmitteln, Gläsern ist ein Recycling dagegen schwer vorstellbar, da diese hoch dissipativ sind.

### 6.1 Art der Re-Phasen

Im Folgenden wird ein Überblick über die Art der vorhandenen Re-Phasen geordnet nach den Anwendungen von Cobalt gegeben.

#### *Batterien:*

Die Herausforderungen für ein effizientes End-of-Life-Recycling der Batterien mit dem höchsten Cobaltgehalt, der Lithium-Ionen Batterien, bestehen in der historisch kurzen Nutzungsphase, der Anwendungsvielfalt, den stark abweichenden Aufbauten, der technischen Langlebigkeit und nicht zuletzt der Explosionsgefahr und Gefahr der Selbstentzündung bei Erfassung, Lagerung, Transport durch das hochreaktive Metall Lithium (Thomé-Kozmiensky 2012a). In Deutschland ist das Gemeinsame Rücknahmesystem für Batterien (GRS) dabei eine Sammlung zu etablieren. Eine neue, gelbe Sammelbox ist in der Pilotphase (GRS 2013). Im Jahr 2012 lag der Anteil an Li-Ionen-Batterien, die in den Umlauf gebracht wurden, bei den wieder aufladbaren Batterien bei 62 %, bei den Batterien insgesamt bei 19 %. 14.511 t wurden 2012 insgesamt gesammelt, womit die Sammelquote 43,6 % der in Umlauf gebrachten Batterien entspricht. Auf Seiten der Recyclingtechnologie gibt es viele Ansätze und es werden beständig verbesserte Technologien entwickelt. So sind in Deutschland beispielsweise an der RWTH Aachen das Institut IME (unter Prof. Friedrich) (Thomé-Kozmiensky 2012b), an der Technischen Universität Cottbus (Thomé-Kozmiensky 2012a), an der TU Clausthal in Zusammenarbeit mit Daimler und Umicore (Thomé-Kozmiensky 2012c) und an der TU Braunschweig (Thomé-Kozmiensky 2012d) Arbeitsgruppen mit dem Thema betraut. Ziele der Vorhaben sind jeweils die Isolierung und Zurückgewinnung der Metallfraktionen Aluminium, Kupfer, Eisen, Cobalt, Nickel, Mangan und Lithium. Dazu werden verschiedene pyro- und hydrometallurgische Verfahren getestet.

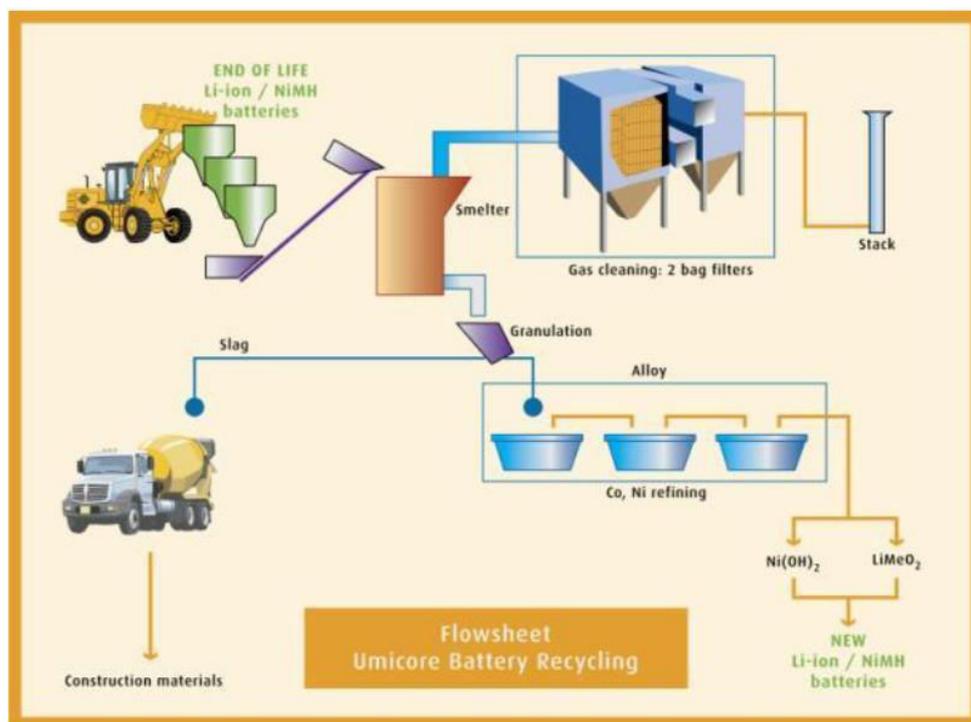
Aktuell wirtschaftlich umgesetzt ist in Europa in erster Linie der Val'Eas Prozess von Umicore (Gaines et al. 2011). Das Konzept ist in Abbildung 10 dargestellt. Umicore betreibt Pilotanlagen in Hofors, Schweden (Kapazität 4.000 t/a) (Thomé-Kozmiensky 2012c) und seit 2011 in Hoboken, Belgien (Kapazität 7.000 t/a). Erzeugt werden Cobalt-Nickel-Kupfer-Legierungen mit der Option auf Rückgewinnung von Lithium und

anderen Metallen aus Schlacken und Flugstäuben. Zurzeit wird die Schlacke in der Zementindustrie verwendet oder entsorgt.

Die Kerntechnologie liefert der so genannte Smelter (Schachtofen). Ohne Vorbehandlung wird das gesammelte Material in diesen Smelter gegeben. Die organischen Bestandteile werden verbrannt und beheizen damit auch den Smelter. Der Kohlenstoff aus den organischen Bestandteilen kann teilweise als Reduktionsmittel für Metallverbindungen dienen. Cobalt und Nickel werden nach dem Prozess in Umicores Raffinerie in Olen, Belgien geschickt, wo  $\text{CoCl}_2$  hergestellt wird. Dieses wird weiter nach Südkorea versandt, wo  $\text{LiCoO}_2$  für Batterien hergestellt wird, das Lithium muss zugekauft werden.

Beim Prozess entstehende Abgase werden bei hohen Temperaturen behandelt, um Giftstoffe wie Furane und Dioxine zu zersetzen. Umicore geht von einem 93 %-igen Recycling für Li-Ionen-Batterien aus, da Metalle außer Lithium (69 %), Kohlenstoff (10 %) und Kunststoffe (15 %) aufbereitet bzw. als Reduktionsmittel oder Brennstoff eingesetzt werden.

-----  
Vorhandene Re-Phasen  
-----



**Abbildung 10: Schematische Darstellung des Umicore-Recyclingprozesses für NiMH und Li-Ion-Batterien (Caffarey 2010) (Gaines et al. 2011).**

Auch einige kleinere Unternehmen in Deutschland haben sich (neben der belgischen Umicore) auf Batterierecycling spezialisiert, beispielsweise Accurec-Recycling und Adamec-Recycling. Wobei Adamec-Recycling vor der Insolvenz zu stehen scheint. Beim Aachener Abfallkolloquium 2012 haben IME und Accurec ein neues Verfahren zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien vorgestellt, das Lithium vollständig in die Flugasche übergehen lässt und so eine Rückgewinnung von Lithium erleichtern soll. Hohe Sammelquoten für die übrigen Batteriesysteme ermöglichen auch hier in Ländern wie Deutschland, Österreich und der Schweiz eine Rückgewinnung des Cobaltanteils.

#### *Superlegierungen:*

Auf den Gebieten der Superlegierungen und Hartmetalle wird Cobalt in noch größerem Umfang zurückgenommen und häufig in Form von Legierungen bzw. fertigen Materialverbunden erneut eingesetzt (EPOW 2011) (EUC 2010). Superlegierungen sind recycelbar und werden in großen Mengen durch verschiedene Unternehmen zurückgenommen, wobei eine Recyclingrate von 100 % noch nicht erreicht ist (Thomé-Kozmiensky 2012e).

*Hartmetalle:*

Cobalt oder Fe/Ni/Cr/Co-Legierungen stellen den Binder bzw. die Matrix im System dar, die die äußerst harten Wolframkarbide und weitere Karbide umgibt. Sie macht 3 - 30 Gew.-% des Materials aus. WC-Cobalt ist ein gut verstandenes und recycelbares System (Schnitter 2014), Hydro- und Pulvermetallurgie können wie bei der Gewinnung aus Erzen angewendet werden. Cobalt wird bei H. C. Starck elementar zurückgewonnen und macht bei Weichschrott 1 – 15 %, bei Stückschrott 1 – 20 %, bei Ammoniumparawolframat (Katalysator) < 5 ppm aus. Die globalen Recyclingraten liegen bei etwa 20 % (Altuncu et al. 2013). In Deutschland geht H. C. Starck allerdings von 50 – 70 %, bei Wendeschneidplatten sogar von 90 % aus (Thomé-Kozmiensky 2012e). Auch die Firma Cronimet in Karlsruhe ist mit der Aufarbeitung von Hartmetallen, Superlegierungen und insbesondere auch Schnellarbeitsstählen betraut (Cronimet 2014).

*Katalysatoren:*

Katalysatoren werden bei den chemischen Reaktionen, für die sie eingesetzt werden, nicht verbraucht. Daher sind sie ohne weiteres nach ihrer Lebensdauer von ca. 10 Jahren recycelbar und werden auch laut Cobalt Development Institute grundsätzlich recycelt, wobei mit kleinen, unvermeidbaren Metallverlusten zu rechnen ist (CDI 2014b).

*Magnete:*

Die magnetischen Eigenschaften dieser Materialien selbst machen Sie für ein Recycling schwer handelbar und führen zu aktuell sehr niedrigen Recyclingraten.

*Farben, Düngemittel, Reifenkleber, Seifen, Trockenmittel:*

Alle diese Anwendungen führen dazu, dass Cobalt letztendlich in die Umwelt (Boden, Atmosphäre, Abwässer) freigesetzt wird. Es gibt aktuell keine Möglichkeiten der Rückgewinnung. Auch zukünftig sind Re-Phasen zum großen Teil schwer denkbar. Ausnahme könnte die Aufbereitung spezieller Abwässer sein, falls die Cobaltpreise stark steigen.

## 6.2 Kritische Hinterfragung des elementaren Rückgewinns

Die Betrachtungen zu den Recyclingtechnologien in Kapitel 5.1 zeigen auf, dass Cobalt aus den Anwendungen Batterien, Superlegierungen und Hartmetallen (zusammen etwa 65 % des globalen Cobaltmarktes) zurückgewonnen werden kann und zu gewissen Teilen auch bereits elementar bzw. in leicht wiederverwendbaren Verbindungen (Legierungen,  $\text{CoCl}_2$ ) wieder zurückgewonnen wird. Die Frage nach einem elementaren Rückgewinn bzw. nach einer nachhaltigen Nutzung sollte also vermehrt in den verbleibenden Anwendungen wie Magneten und Trockenmitteln gestellt werden.

Die nachfolgenden Ausführungen stellen eine Bewertung der zuvor ausführlich dargestellten Markt-, Unternehmens- und Verfügbarkeitssituation dar. Die getroffenen Aussagen beziehen sich auf den Wissensstand zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie. Zudem basiert die aufgeführte Interpretation, Trendableitung sowie die abschließende Kriterienbewertung auf Basis des Fachwissens der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS, die im Gesamtzusammenhang der genannten Fakten steht. Branchen- und Unternehmensspezifisch betrachtet, können diese variieren.

## 7.1 Interpretation

Weltweit bedeutende Industriestandorte sind meist in hohem Maß von Rohstoffimporten abhängig. Aus diesem Grund sollten Industriebetriebe die Marktsituation – der Hochtechnologierohstoffe – aktiv beobachten und potenzielle Entwicklungen ableiten, um zielorientiert auf entstehende Probleme reagieren zu können.

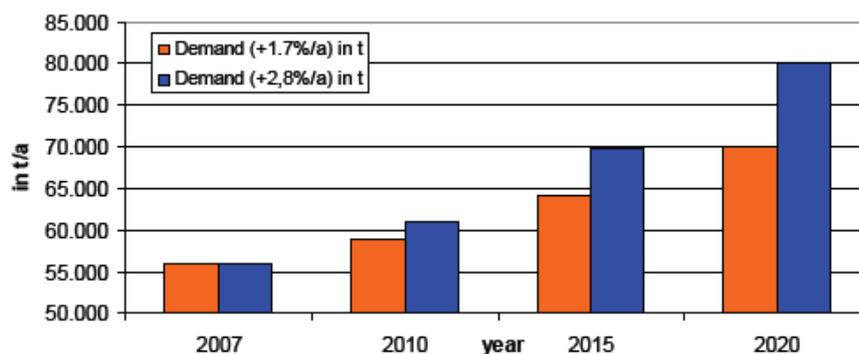
Cobalt hat eine elementare Bedeutung für die zukünftige Energieversorgungsbranche (Biotreibstoffe, CCS und Kernenergie). Aufgrund des steigenden Energieverbrauchs ist damit zu rechnen, dass diese Branche deutlich wachsen wird. Demnach ist ebenso klar, dass Zulieferer und Dienstleister, die in diesem Sektor agieren, profitieren werden. Die vorhandene Verknappung/Kritikalität bedingt demnach bei steigendem Bedarf ein deutliches Potenzial für Innovationen im Bereich der Primär- und deutlich ausgeprägter im Sektor der Sekundärrohstoffversorgung sowie Materialeffizienzsteigerung.

Handlungsoptionen und Entwicklungsvorhaben ergeben sich daher vornehmlich für Unternehmen, Institute und Einrichtungen, die sich an der Steigerung der Ressourceneffizienz (optimiertes Recycling, Nutzung nicht-primärer Rohstoffquellen, Substitution kritischer Rohstoffe etc.) widmen.

Aufgrund der eher hohen Kritikalität ist zu erwarten, dass eine Entschärfung des Marktes bzw. eine gesicherte Rohstoffversorgung – vornehmlich für rohstoffarme Industrienationen – auch über die optimierte Nutzung sekundärer Rohstofflager nachhaltig zu sichern ist. Die primäre Förderung von Cobalt wird sich in den kommenden Jahren bis Jahrzehnten auf die genannten Nationen sowie Unternehmen (siehe Unternehmenskompendium) konzentrieren.

Realistisch ist, dass weitere Monopolisierungsmaßnahmen stattfinden werden.

Das Cobalt Development Institute (CDI) sagt eine Wachstumsrate von rund 2,5 % pro Jahr für den Cobaltmarkt voraus. Dies liegt zwischen den zwei Szenarien des Öko Instituts die ein Wachstum von 1,7 % (geringes Wachstum) und 2,8 % (hohes Wachstum) bis 2025 voraussagen (Abbildung 11) (Gunn 2014).

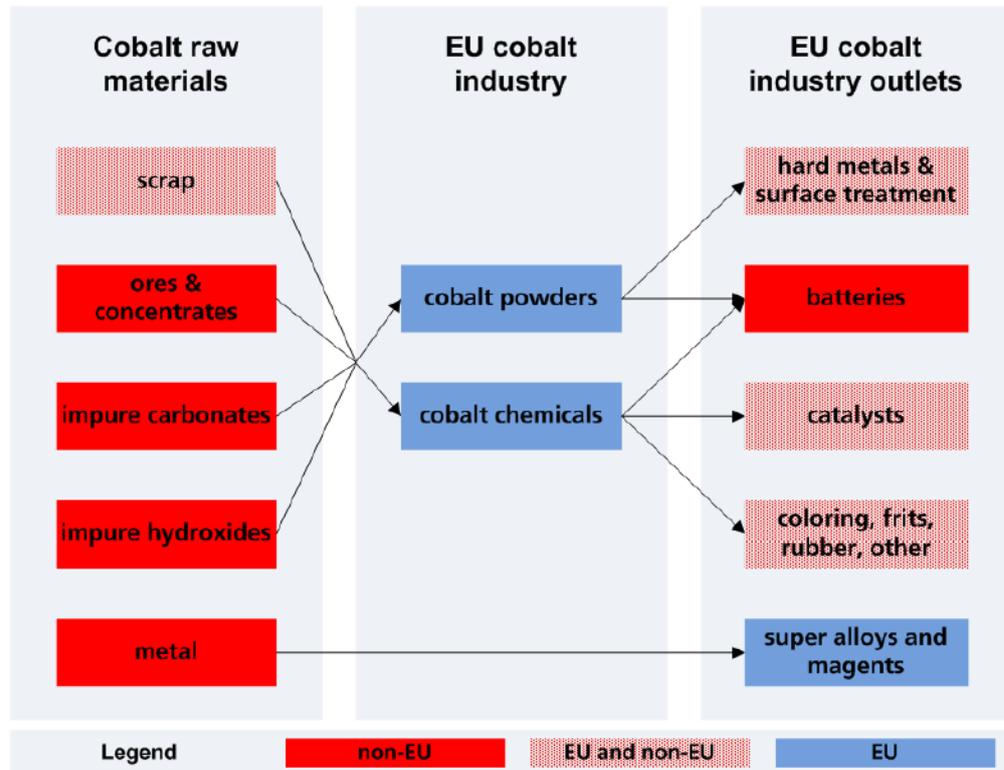


**Abbildung 11:**  
Cobaltnachfrageszenarien bis  
2020 (Buchert 2009).

Ungefähr zwei Drittel der Produkte die Cobalt enthalten und in Europa produziert werden, werden außerhalb der EU verkauft.

Deutschland ist zu 100 % auf Importe des Erzes und der Konzentrate von Cobalt angewiesen. Rund 20 % der weltweiten Cobaltproduktion werden von der EU importiert (Tercero 2012). Abbildung 12 zeigt die Struktur des europäischen Cobaltmarktes, dessen Ausgangsrohstoffe und deren Absatzprodukte.

**Abbildung 12: Struktur des europäischen Cobaltmarktes (Tercero 2012).**



Chancen für neue Märkte sind vorhanden, deren Erschließungspotenziale aus qualitativer, quantitativer und technisch möglicher Sicht sind jedoch nur teilweise ausgeschöpft. Fortschrittliche Unternehmen, Wissenschaft und Politik werden sich auch zukünftig mit der Versorgungsproblematik beschäftigen und neue Wege entwickeln. Die resultierende Vorreiterstellung bietet Möglichkeiten der wachsenden Abhängigkeit gezielt entgegen zu wirken. Notwendige Investitionen der Forschung und Entwicklung werden sich daher langfristig amortisieren.

Ein Beispiel hierfür zeigt sich bei der Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse. „Französische Forscher haben ein neues Material entwickelt, das als Katalysator für die Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse eingesetzt werden kann. Dieses Material auf cobaltbasis könnte den heutigen Platinkatalysator ersetzen und damit die Elektrolysekosten drastisch senken“ (Wissenschaftsportal Französische Botschaft in Deutschland 2012).

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für den Einstieg in den Cobaltmarkt oder weiteren Ausbau von Geschäftsfeldern bietet das effiziente Recycling von Batteriesystemen. Aktuell finden zwar vereinzelt Pilotprojekte statt, diese sind jedoch weitestgehend von wissenschaftlichem und politischem Interesse. Ein frühzeitiger Einstieg interessierter und bereits spezialisierter Unternehmen ist ratsam. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass bereits gute Erfassungssysteme und dies sogar für unterschiedliche Produktgruppen existieren. Gleichzeitig streben politische Motivationen auf unterschiedlichen Ebenen (von der Europäischen Union bis hin zur lokalen Kommune) eine ganzheitliche und gleichzeitig sortenreine Sammlung an.

Demnach existieren bereits logistische Strukturen, die dem Aufbereiter zu Gute kämen. Eine geschlossene Kreislaufwirtschaft (vom Endverbraucher zur Rücknahmestelle und letztlich zum Recycler) ist in diesem Bereich jedoch keinesfalls erreicht. Ein Einstieg erscheint leicht, da sowohl Kommunen als auch der übergeordneten Regierung daran gelegen ist, dies zu fördern und demnach populistisch positiv zu verbreiten.

Politische und gesellschaftliche Entwicklungen zur künftigen Gestaltung unserer Gesellschaft zeigen, dass die E-Mobilität und die nachhaltige energetische Versorgung federführende Stellung einnehmen.

Gleichzeitig bzw. vor den bekannten Hintergründen ist damit zu rechnen, dass hier weitere Investitionen getätigt werden, die die Potenziale der Rückgewinnung von Cobalt fördern und somit zum Technologie-Knowhow beitragen. Diese Tatsache bietet Unternehmen ein deutliches Entwicklungs-, Expansions- und Alleinstellungspotenzial. Da es sich hierbei vorerst um Pilotanlagen handeln wird, (Anlagen und Technologien zu entwickeln sind), ist die direkte Zusammenarbeit zwischen Theorie und Praxis unumgänglich. Demnach sind in diesem Bereich Kooperationen mit wissenschaftlichen Einrichtungen mehr als notwendig sowie letztendlich zielführend und wirtschaftlich interessant.

Die Umstrukturierung der Mobilität (E-Motiv) bietet einen weiteren Vorteil zur positiven Investition. Notwendige Magnete, der „neuen E-Mobilität und alte Katalysatoren-Systeme“ stellen ebenso einen Markt dar. Katalysatoren werden ebenso in vielen Bereichen der chemischen Industrie verwendet, um Reaktionen auszulösen und zu beschleunigen. Wichtige Bestandteile von Katalysatoren sind neben Cobalt, NE-Metalle und Edelmetalle.

Dabei haben diese Katalysatoren eine begrenzte Lebensdauer und müssen regelmäßig ersetzt werden. In verbrauchtem Zustand sind sie durch Stoffe (z.B. Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle etc.) verunreinigt, sodass die direkte Verwendung in metallurgischen Prozessen nicht erfolgen kann.

Hierbei gilt, dass der Markt vorhandener Katalysatoren abschätzbar ist und Potenziale bietet. Eine wünschenswerte Aufbereitung findet nicht statt. Vielmehr investieren auch hier Politik und Wissenschaft in Kombination mit wirtschaftlichen Einrichtungen in die Entwicklung neuer Recyclingstrukturen sowie -technologien.

Der vorhandene Markt für Magnete ist derzeit stark im Wachstum. Gleichzeitig gewinnen diese immer mehr Bedeutung in einer Vielzahl neuer Anwendungen. Es ist zu erwarten, dass dieser Technologiesektor und somit die wirtschaftliche Bedeutung deutlich wächst. Vorhandene Strukturen zur Herstellung der benötigten Technologie existieren teilweise, werden den Bedarf auf lange Sicht jedoch nicht decken können. Die Expansion von Unternehmen ist daher wünschenswert und wirtschaftlich erforderlich.

Im Bereich der Produktionsabfälle sind Superlegierungen und Hartmetalle ebenso interessant. Auch für diese existieren etablierte Erfassungssysteme, die gleichzeitig eine hohe Materialreinheit gewährleisten. Die gezielte Aufbereitung dieser in Hinblick auf kritische Elemente – wie Cobalt – existiert dabei nicht.

Schwierig gestaltete sich jedoch in diesem Zusammenhang die Erfassung von zusätzlichen Materialströmen. Diese sind verdeckt, vermischt mit unerwünschten Stoffen und liegen auch dort vor, wo sie nicht zu vermuten sind.

Beispielsweise existiert vor allem in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) keine sortenreine Trennung von hochwertigen (cobalthaltigen) Produktionsabfällen.

Die entsprechende Nutzung dieser ist nicht denkbar bzw. wirtschaftlich nur tragbar, wenn politische Anreize geschaffen werden oder die Marktsituation sich deutlich

verschärft. Mit einer derartigen Verschärfung ist jedoch in den kommenden Jahren nicht zu rechnen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die primäre Gewinnung von Cobalt in derzeit industriestarken Nationen, aufgrund der geringen natürlichen Vorkommen, keine Rolle spielen wird. Vielmehr ist entscheidend, frühzeitig die Situationen der Knappheit zu erkennen sowie das Marktgeschehen aktiv zu begleiten, um zeitnah agieren zu können.

Aus dieser Sicht ist das Entwicklungspotenzial für die sekundäre Bereitstellung von Cobalt mehr als hoch anzusetzen und zugleich auf wenige Bereiche begrenzt. Dieses wird zukünftig, neben Marktentwicklungen, auch durch politische Bestrebungen begünstigt. Zur Realisierung definierter Ziele im Rahmen des umweltpolitischen Maßnahmenkatalogs ist eine unternehmensorientierte Ausrichtung erforderlich. Auch hier gilt es, sich frühzeitig zu positionieren bzw. vorhandene Einwände einzubringen.

Zusammenfassend ergeben sich nachfolgende Entwicklungen:

- Die Investition zur Erschließung sekundärer Cobaltquellen und der Aufbau innovativer Technologien – im Zusammenspiel mit Wissenschaft und Wirtschaft – ist nachhaltig sinnvoll.
- Da aus aktueller Sicht die Rohstoffsicherung durch politische Maßnahmen nachhaltig gefördert wird (in der Europäischen Union bspw. durch „Horizon 2020“), sind komplexe Entwicklungsverfahren (Solventextraktion, Ionenaustausch, etc.) für die Extraktion von Cobalt aus diversen Materialien weiter zu entwickeln und gleichzeitig förderungsfähig.

Neben innovativen/technologischen Ideen, finden sich in folgenden Faktoren, Anreizpunkte für Investitionen von Unternehmen, um weiterhin marktfähig zu sein:

#### **Inhalt an Wertmetallen und deren Preise**

*„Einheitliche Stoffströme sind vorhanden. Das resultierende Erfassungspotenzial ist vergleichsweise hoch. Zudem existieren Technologien, deren Recyclingpotenzial zukünftig zu erfassen ist. Insgesamt ist die zukünftige Versorgung mit primärem Cobalt als „eher kritisch“ einzustufen.“*

#### **Zusammensetzung und Rückgewinnungsrate**

*„Die Elementkonzentration und -zusammensetzung variiert stark. Entsprechend ist die Rückgewinnungsquote von elementarem Cobalt derzeit gering. Da jedoch zukünftige Hauptanwendungen – massenmäßig bezogen – anfallen werden, besteht Handlungsbedarf. Gleichzeitig bieten Kleinanwendungen (bspw. Batterien für Kleingeräte) mit vorhandenem Sammelsystem ein großes Potenzial zur Rückgewinnung von Cobalt. Dies wird aktuell nur sporadisch betrieben.“*

#### **Anwendungssegment, Lebenszyklus, Logistik**

*„Cobalt besitzt ein breites Anwendungsgebiet. Lebenszyklusanalysen der entsprechenden Produktkategorien existieren, für das Element Cobalt jedoch nur bedingt. Sammelstrukturen liegen im Bereich der Erfassung von Batterien vor. Für Zukunftstechnologien sind diese zu generieren.“*

#### **Erschließung primärer Ressourcen**

*„Die in Europa vorliegenden primären Lagerstätten sind auch in einem absehbaren Zeitraum nicht wirtschaftlich erschließbar. Grund hierfür ist die geringe Cobaltkonzentration. Die nachhaltig gesicherte sowie wirtschaftlich verträgliche Zugänglichkeit zu Cobalt resultiert demnach aus internen Lagerstätten, die in urbanen Minen zu sehen sind. Eine effiziente Nutzung*

findet nicht statt. Gleichzeitig besteht deutliches Entwicklungspotenzial im Rahmen der großtechnischen Umsetzung. Politische Förderprogramme werden dies unterstützen.“

## 7.2 Trends

Nachfolgende Trends sind im Bereich des Cobaltmarktes zu erwarten. Hierbei liegt der Fokus auf den aktuell wesentlichen Hauptanwendungen.

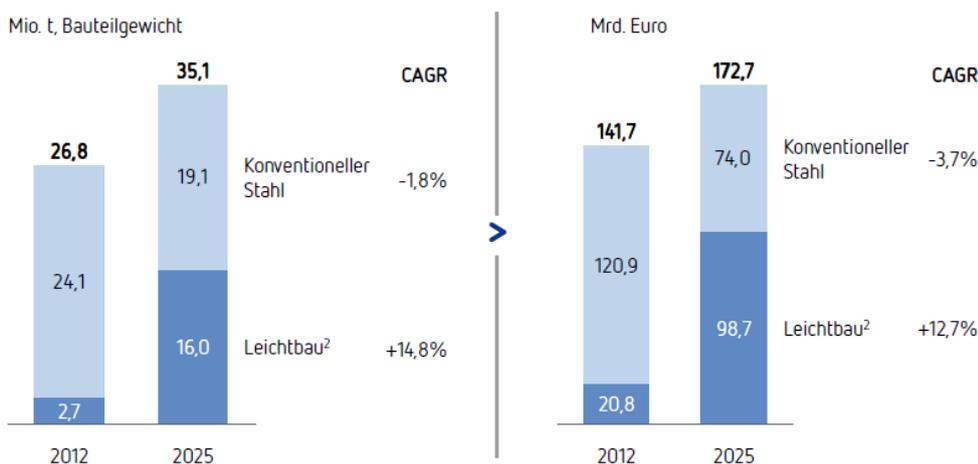
### 7.2.1 Automobilsektor

Im Automobilbereich kommt Cobalt in Form von Stahlleichtbauelementen, Energieversorgungssystemen und zur Bereitstellung zukünftiger Kraftstoffe zum Einsatz. Insgesamt ist zu erwarten, dass alle Bereiche in absehbarer Zeit einem deutlichen Zuwachs unterliegen. Der Einsatz bzw. die Notwendigkeit von Cobalt wird sich entsprechend erhöhen.

### 7.2.2 Stahlleichtbau

Der Stahlleichtbau kommt vorwiegend im Automobilbereich zum Einsatz. Hierbei enthalten unterschiedliche Komponenten Cobalt (z.B. TRIP-Stahl). Cobalt selbst stellt jedoch nur eine untergeordnete Rolle dar. An dieser Entwicklung wird sich auch zukünftig nichts ändern, vielmehr werden Automobile aufgrund von Verbrauchseinsparungen stetig leichter (Abbildung 13). Gleichzeitig nimmt die weltweite Autoflotte exponentiell zu (Abbildung 14).

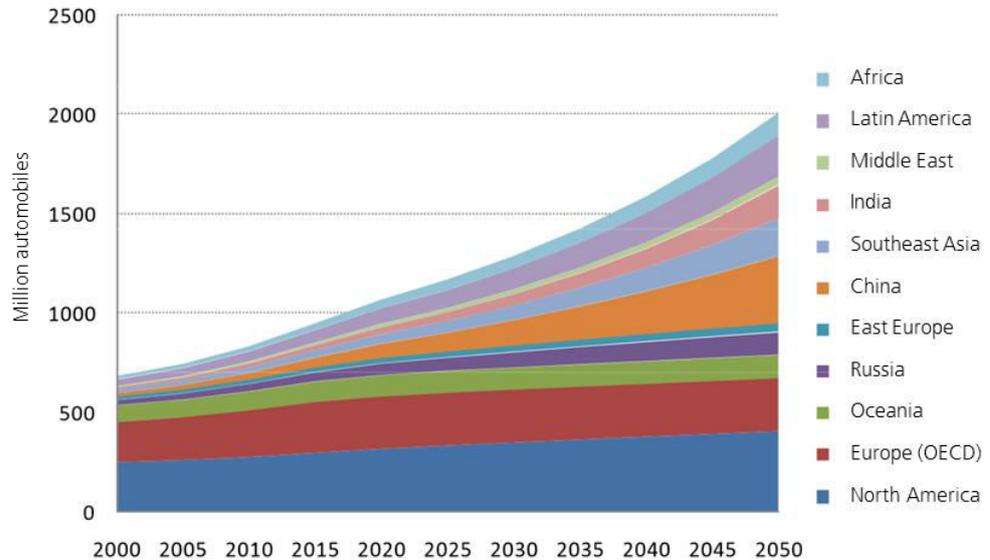
Konventioneller Stahlbau nimmt im Karosseriebau leicht ab. Der Markt für Karosserieleichtbau steigt im Gegenzug stark an (ca. 15 % pro Jahr). Aus wirtschaftlicher Sicht verfünffacht sich der Umsatz sogar.



**Abbildung 13:**  
**Marktentwicklung des Karosserieleichtbaus**  
<sup>2</sup> = Hochfeste Stähle (HSS), Aluminium, Magnesium, Kunststoff, CFK (Berylls Strategy Advisors 2013).

Die weltweite Autoflotte wird sich gleichzeitig bis zum Jahr 2025 nahezu verdoppeln. Bis zum Jahr 2050 wird mit einem Bestand von 2 Milliarden, also ca. dreimal so viel Automobile wie heute, gerechnet.

**Abbildung 14: Entwicklung der weltweiten Autoflotte bis zum Jahr 2050 (World Business Council on Sustainable Development 2014).**



Aufgrund dieser deutlichen Wachstumsraten in Qualität und Quantität ist zu erwarten, dass die Nachfrage nach Cobalt zukünftig wachsen wird. Zudem ist eine Substitution bedingt durch gravierende Leistungseinbußen in diesem Fall nicht möglich.

Unter der Annahme, dass Cobalt bis zu 1 % des jeweiligen Leichtbauteils annimmt, ein modernes Auto besteht zu 20 % aus diesen Materialien bei einem Gesamtgewicht von 2.500 kg, ergibt sich demnach ein Cobaltinventar von 5 kg pro PKW. Bei einer zukünftigen Flotte von 2 Milliarden Personenkraftwagen ergibt sich ein rollendes Cobaltdepot von 10.000 t.

Hierbei unberücksichtigt ist die deutliche Entwicklung zur Mobilitätssteigerung durch elektrisch angetriebene Fahrzeuge.

Auch der Leichtbau im Bereich der Infrastrukturentwicklung – immer mehr Menschen müssen auf begrenzter Fläche leben und arbeiten – und die damit einhergehende Urbanisierung sind Treiber des Einsatzes von Stahlleichtbauelementen und damit für den zukünftig steigenden Bedarf an Cobalt.

### 7.2.3 Batteriesysteme

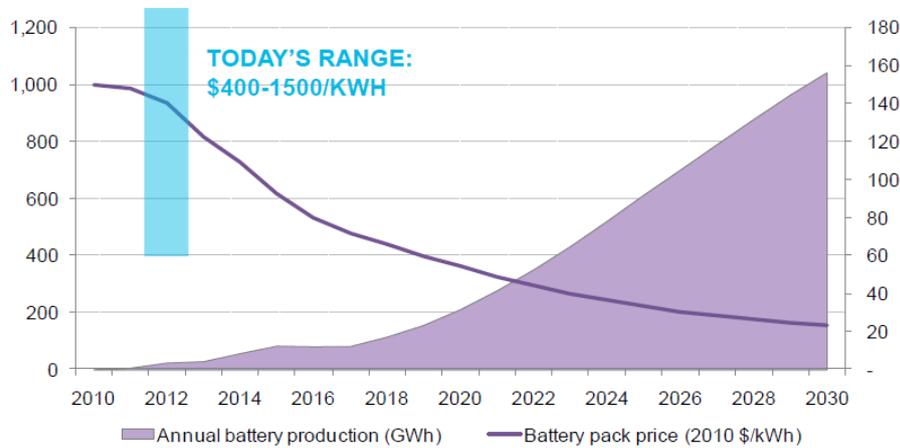
Der Cobaltbedarf für Batterien war im Jahr 1995 für 3 % der Cobaltnachfrage verantwortlich, 2003 waren es 11 %, 2006 rund 22 % und 2013 schon rund 38 % (Erdmann et al. 2011; Buchert 2009).

Der Cobaltverbrauch für Lithium-Ionen-Batterien hat weltweit zwischen 1995 und 2000 von 700 t/a auf 5.000 t/a zugenommen und erreicht derzeit etwa 12.000 t/a. Dies entspricht etwa 25 % des weltweiten Cobaltverbrauchs (Angerer et al. 2009).

Abbildung 15 zeigt, dass die jährliche Batterieproduktion in GWh von 2010 bis 2030 weiterhin sehr stark wachsen wird, die Kosten pro kWh jedoch stark sinken werden. Verbunden mit einer höheren Produktion wird sich der Cobaltbedarf daher je nach Technologie erhöhen. Das aktuell häufigste genutzte Kathodenmaterial ist Lithium-Cobalt-Oxid (LCO), welches ca. 60 % Cobalt enthält. Daneben gibt es Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid oder Lithium-Nickel-Cobalt-Mangan-Oxid.

Der Bedarf an aufladbaren Akkumulatoren wird auch zukünftig anhalten und durch die Anwendung in Elektro- und Hybridfahrzeugen wachsen. Allerdings muss aufgrund verschiedener Kathodenmaterialien und verändernder Technologien der Cobaltbedarf nicht zwangsweise steigen. Industriemarktprognosen sagen in den kommenden Jahren einen Marktanteil von 70 % für NiMH-Batterien bei Hybridfahrzeugen voraus und Cobalt soll, als zu teures Metall, in den Li-Ionen-Batterien durch Nickel, Mangan, Aluminium oder Phosphor ersetzt werden (EPOW 2011).

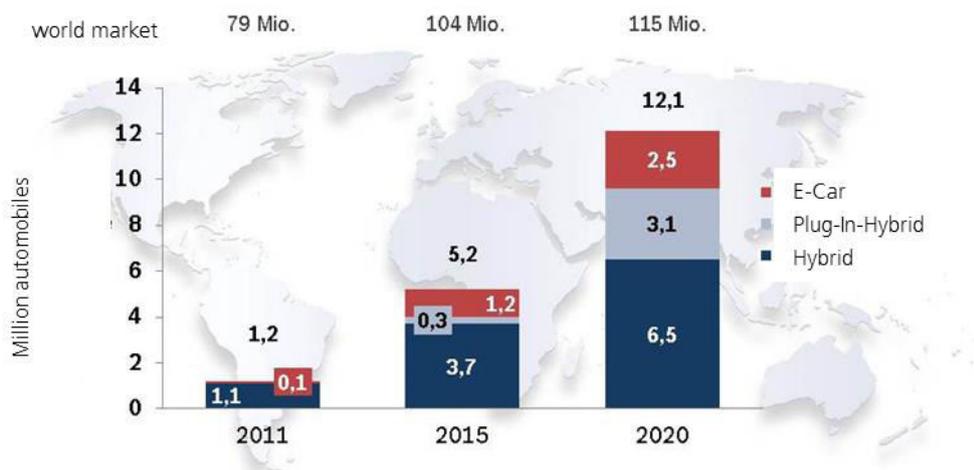
Jedoch ist die Substitution oder Verringerung des Cobaltgehaltes beispielsweise in NiMH-Batterien noch nicht vollständig gelungen (CDI 2006a). Ebenso verhält es sich mit Li-Ionen-Batterien, in denen LiNiO<sub>2</sub> und LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> als Kathodenmaterialien eingesetzt werden könnte und mittlerweile das Eigenschaftsprofil des cobalthaltigen Materials erreicht hat (CDI 2006a). Der Grad der Substitution und der Einsatz von Cobalt werden hauptsächlich durch den Cobaltpreis bestimmt.



**Abbildung 15: Li-Ionen Batterieproduktion von 2010 bis 2030 (Cheung 2012).**

Unter Berücksichtigung des Trends der Entwicklung der E-Mobilität (Abbildung 16), die ca. um den Faktor 10 ansteigen wird, gehen Schätzungen von einem Cobaltbedarf im Jahr 2030 von 40.800 t aus, falls das gesamte eingesetzte Kathodenmaterial Cobalt wäre. Nach einer vollständigen Cobaltnutzung in Kathodenmaterial wird der Wachstumsmarkt dieses Technologiebereichs um das 3,4-fache ansteigen (Angerer et al. 2009).

Neben dem PKW-Sektor interessieren sich auch die Hersteller von Kleinkraftträdern für diesen Markt. Hierbei spielen die noch heute vorhandenen vergleichsweise geringen Reichweiten aufgrund der City- und Freizeitanwendung eine untergeordnete Rolle. Trotzdem sind auf diesem Sektor deutliche Entwicklungen zur E-Mobilität und somit zum verstärkten Einsatz von Cobalt zu erwarten. Die Wachstumsraten der vergangenen Jahre zeigen in diesem Zusammenhang für Deutschland einen jährlichen Anstieg um den Faktor 1,3.

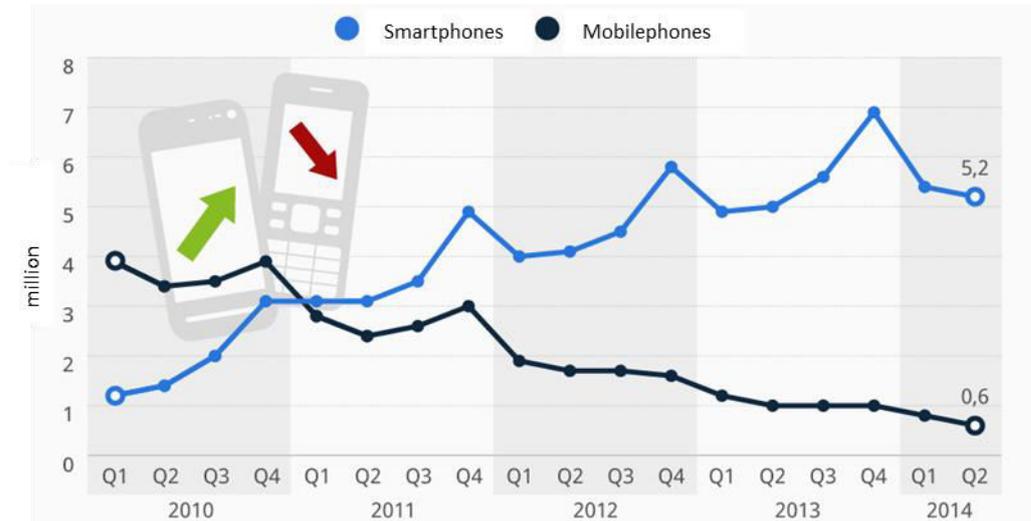


**Abbildung 16: Zukünftiger Weltmarkt für Elektromobilität (Bosch 2012).**

## Elektrik und Elektronik

Einen stetigen Wachstumsmarkt und gleichzeitigen am Ver- bzw. Gebraucher orientierten Wandel stellt die Elektro- und Elektronikbranche dar. Einen Eindruck hiervon vermittelt Abbildung 17 am Beispiel der mobilen Vernetzung.

**Abbildung 17: Absatz von Mobiltelefonen und Smartphones in Deutschland (in Millionen Geräten) (Statista 2014c).**



Erkennbar ist, dass der Endverbraucher deutliche Priorität auf höhere Funktionalität (hier in Form des Smartphones) legt. Dies setzt voraus, dass die Leistungsfähigkeit entsprechender Produkte weiter steigen wird.

In Bezug auf Cobalt ist hierbei und in nachfolgenden Technologieentwicklungen die Leistungsfähigkeit des „Akkus“ in den Vordergrund zu rücken.

Aus aktueller Sicht erscheint Cobalt hier als unverzichtbar. Gleichzeitig existieren nahezu keine Systeme zur gezielten Rückgewinnung dieses Rohstoffs.

Vielmehr werden zurzeit hochwertige/rohstoffreiche Elektrokleingeräte „in Gänze“ entsorgt. Dies bedeutet letztlich, dass nach einer vorhergehenden Zerkleinerung und anschließenden Behandlung, wesentliche Ressourcen – wie Cobalt – in Verbrennungsschlacken Enden. Diese wiederum werden diffus im Rahmen des Straßenbaus bzw. als Ersatzbaustoff verteilt.

An ausgewählten Beispielen wird nachfolgend das Cobaltpotenzial der wachsenden Elektrik- und Elektronikbranche gezeigt. In allen Fällen konzentriert sich hierbei das Potenzial auf das Hauptanwendungsgebiet von Cobalt. Dieses liegt in der Li-Ionen Akku-Technologie (Umbrella 2011), da:

- 25 % der Weltcobaltproduktion für Li-Ionen Akkus eingesetzt werden und
- der durchschnittliche Cobaltgehalt eines Akkus ca. 13,8 Gew.-% der Akkumasse beträgt.

Dies bedeutet, dass ein

- Handy ca. 3,8 g,
- Smartphone ca. 6,3 g,
- Notebook/Tablet ca. 65,0 g,

Cobalt beinhaltet (Manhart 2012).

### Handymarkt

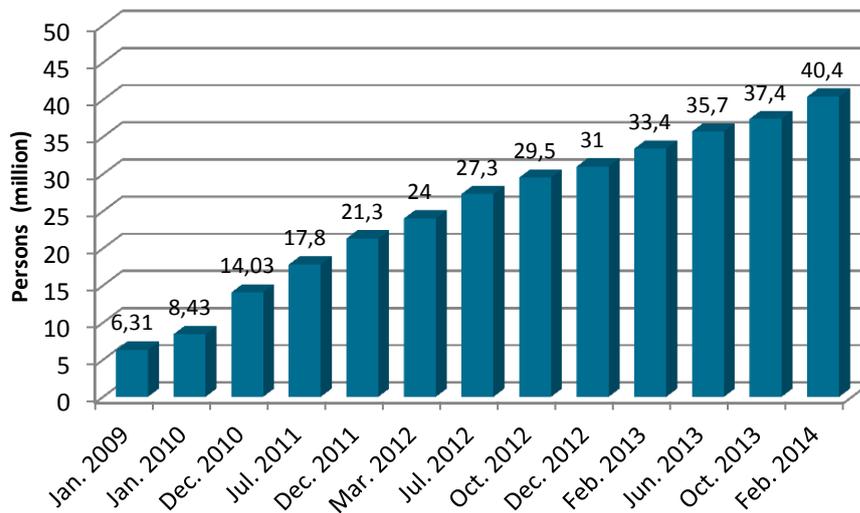
Wie gezeigt (Abbildung 17), unterliegt der Markt für Handys, einem deutlich rücklaufenden Trend.

Der Handymarkt bietet, durch im Umlauf befindliche Geräte, große Potenziale.

Je nach Untersuchung ist davon auszugehen, dass in deutschen Schubladen 106 bis 120 Millionen alte Handys lagern (Die Welt 2014; heise online 2013). In Bezug auf elementares Cobalt entspricht dies folglich 403 - 456 t bzw. ca. einem Fünftel des deutschen Jahresbedarfs.

### Smartphonemarkt

Für Deutschland und andere Industrienationen gilt, dass statistisch nahezu jeder zweite Bürger ein Smartphone besitzt (Abbildung 18).

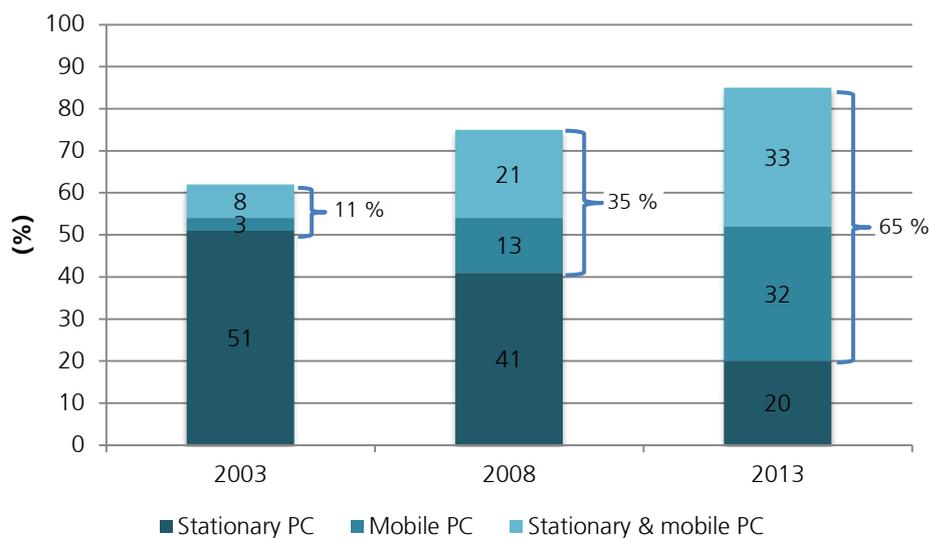


**Abbildung 18: Anzahl der Smartphonenuer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2014 (in Millionen) (Statista 2014a).**

Dies entspricht unter Annahme des genannten Cobaltgehalts einem Cobaltpotenzial von rund 255 Tonnen.

### Notebook- und Tabletmarkt

„Kein anderes mobiles Endgerät hat sich schneller verbreitet als der Tablet-PC. Allein in den USA wurden in weniger als zwei Jahren nach Markteinführung des iPads über 40 Millionen Tablets verkauft“ (van Eimeren 2013).



**Abbildung 19: Entwicklung der PC-Ausstattung in privaten deutschen Haushalten (Stadt Bremerhaven 2013).**

Wie Abbildung 19 und Erhebungen des Statistisches Bundesamtes (2014) zeigen, steigt die Ausstattung der Haushalte mit elektronischen Geräten – Consumer Electronics – deutlich. Dieser Trend ist auch in den kommenden Jahren zu erwarten.

Nach Bitkom (2014) nutzt jeder Vierte einen Tablet-Computer. Dies bedeutet auf Deutschland bezogen, dass hierin ca. 1.300 t Cobalt lagern.

#### 7.2.4 Synthetische Kraftstoffe

Die Produktion von synthetischen Kraftstoffen benötigt unterschiedliche Verfahren und entsprechend komplexe Anlagen. Hierunter zählt unter anderem das Fischer-Tropsch-Aggregat<sup>1</sup>. Katalytisch aktives Material ist Cobalt. Der Cobaltanteil am gesamten Katalysatorgewicht ist in diesem Zusammenhang mit durchschnittlich 20 % vergleichsweise hoch.

Namhafte Unternehmen dieser Branche beziffern das jährliche Wachstum des globalen Kraftstoffbedarfs mit 1,3 %. Vor dem Hintergrund der umweltschonenden Herstellung und Fortbewegung mittels „flüssigem Kraftstoff“ ist zu erwarten, dass bzgl. der Anlagentechnik weitere Bestrebungen betrieben werden. Der Ersatz von Cobalt ist nach aktuellem Stand nicht möglich, vielmehr wird vorwiegend an Effizienzsteigerungen und Minimalisierungsmaßnahmen geforscht.

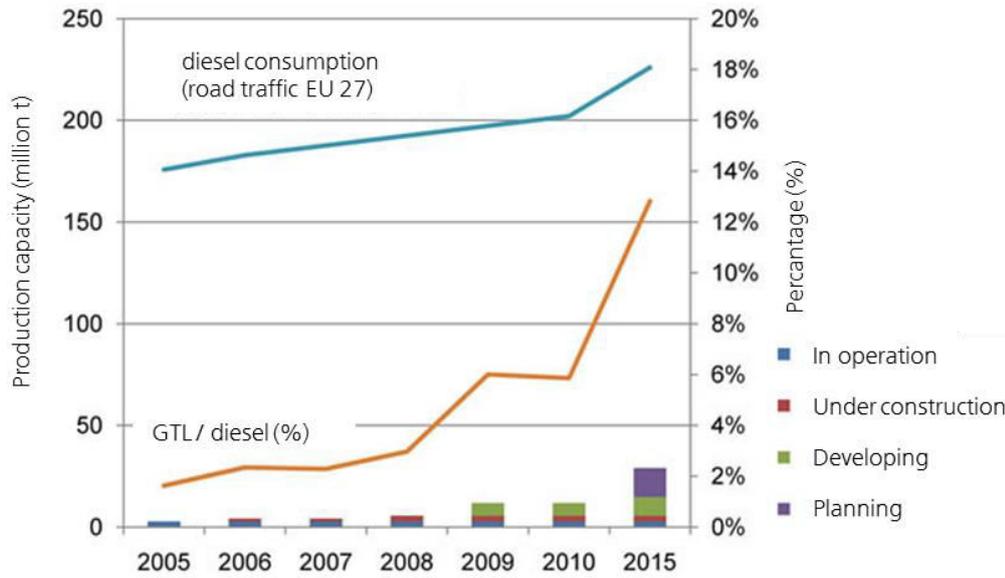
Da sich der Mobilitätssektor mehr und mehr von flüssigen Kraftstoffen wegbewegt, ist diesem Entwicklungssektor ein geringes Entwicklungspotenzial zuzurechnen. Cobalt wird hier nicht limitierend wirken. Aktivitäten werden sich in den kommenden Jahren auf die Steigerung der Ressourcen- bzw. Cobalteffizienz konzentrieren. Da zuvor genannte Entwicklungen deutlich im Fokus der Öffentlichkeit, Politik und Forschung stehen, sind keine Zukunftsaussichten dieser Technologieentwicklung zu sehen. Synthetische Kraftstoffe stellen somit nur eine Übergangs-/Nischenlösung dar, die es zeitlich begrenzt optimal zu nutzen gilt.

„Trotz langfristiger Verfügbarkeit von Rohöl ist die Erforschung und Entwicklung von Alternativen ein Gebot der Vernunft. Schnellschüsse und insbesondere das Verdrängen der ökonomischen Realität ist nicht zielführend. Die langfristige Verfügbarkeit fossiler Energieträger schafft ausreichend Zeit, nachhaltige Alternativen zu entwickeln. Ein Paradigmenwechsel scheint „...“ möglich zu werden. Insbesondere synthetische Kraftstoffe des innovativen Biomass-to-Liquid-Prozesses (BtL-Prozesses) werden von der Mineralöl- und Automobilindustrie gleichermaßen unterstützt. Der Wechsel vom Landwirt zum „Energiepflanzenwirt“ könnte dann zur Realität werden“ (Picard 2006).

Die heute verfügbare Technologie zur Herstellung dieser Kraftstoffe ist in den meisten Fällen auf den Einsatz cobaltbasierter Katalysatoren angewiesen. Demnach bietet sich neben dem Absatzmarkt für entsprechende Produkte auch ein Zukunftsmarkt für innovative Entwicklungen. Letzteres gilt vor allem vor dem Hintergrund, dass eine wirtschaftliche Verbesserung des aufwendigen Produktionsprozess dieser Kraftstoffe anzustreben ist. Nachfolgende Abbildung 20 zeigt potenzielle Entwicklungen beispielhaft. Mittelfristig werden synthetische Kraftstoffe eine Übergangslösung darstellen. Langfristig wird sich der Trend im Bereich der Mobilität jedoch stärker auf Hochleistungsbatteriesysteme konzentrieren.

---

<sup>1</sup> Die Fischer-Tropsch-Synthese ist ein großtechnisches Verfahren zur Kohleverflüssigung durch heterogenkatalytische Umwandlung von Synthesegas.



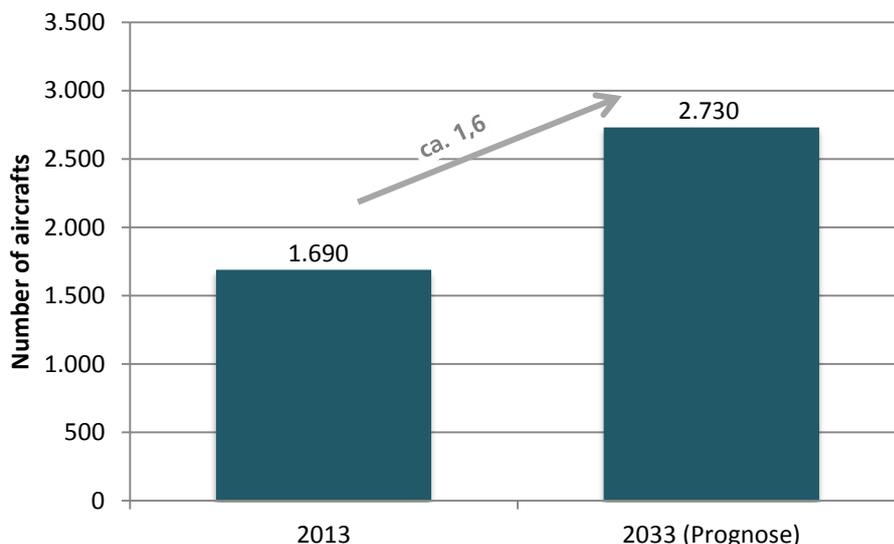
**Abbildung 20: Vergleich der weltweiten Gas-to-Liquid (GtL)-Produktion mit dem Dieselverbrauch des Straßenverkehrs in der EU27 (Heitzer 2006).**

### 7.2.5 Superlegierungen

Auf Cobalt basierende Superlegierungen werden zukünftig weiterhin gefragt sein. Hierzu trägt in erster Linie die Entwicklung des Transport-, Energie- sowie Luft- und Raumfahrtsektors bei. Zunehmende Herausforderungen an hocheffiziente und temperaturstabile Legierungen sind hierbei entscheidend. In diesem Zusammenhang existieren zahlreiche Patente, die diese Eigenschaften gewähren und gleichzeitig auf Cobalt zurückgreifen.

Für zukünftige Entwicklungen (vornehmlich Turbinentechnologie) ist nicht zu erwarten, dass sich dieser Trend ändern wird. Vielmehr ist naheliegend, dass diese Hochleistungsprodukte breitere Anwendung finden. Eine konkrete Abschätzung – ähnlich des Automobilsektors – ist derzeit nicht möglich.

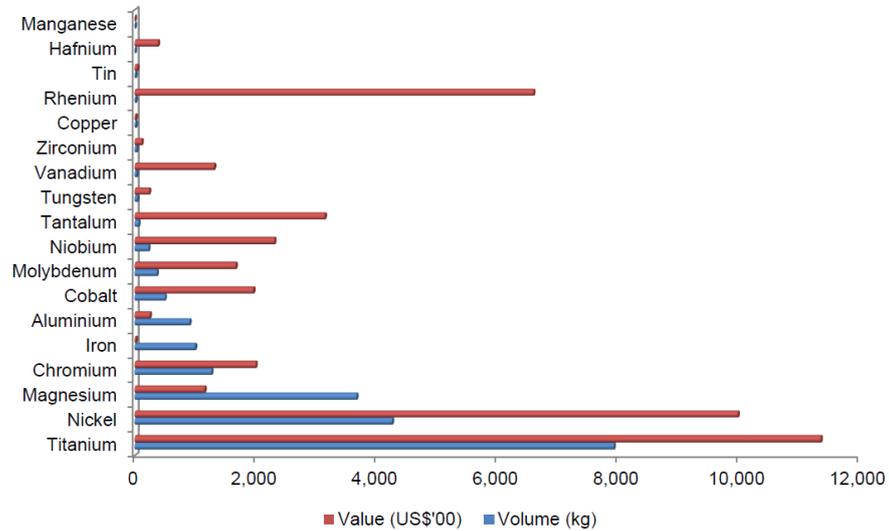
Dennoch ist festzuhalten, dass die Erfolgsgeschichte der Turbinentechnik weiter voran schreiten wird. Einen Eindruck des potenziellen Wachstums vermittelt die Entwicklung der weltweit eingesetzten Frachtflugzeuge in den Jahren 2013 und 2033 (Abbildung 21). Allein hier ist in den kommenden 20 Jahren ein Anstieg um den Faktor 1,6 prognostiziert.



**Abbildung 21: Prognostizierte Anzahl der weltweit eingesetzten Frachtflugzeuge in den Jahren 2013 und 2033 (Firmenangaben Boeing) (Statista 2014b).**

Die metallische Zusammensetzung einer typischen Flugzeugturbine in Kilogramm und monetär bewertet zeigt Abbildung 22. Es ist zu erkennen, dass eine der Hauptkomponenten Titan, gefolgt von Nickel, Magnesium, Chrom und Eisen ist. Dahinter folgen Aluminium und Cobalt. Der Wertanteil des Cobalts ist vergleichsweise hoch – abgesehen von Rhenium, Tantal und Niob.

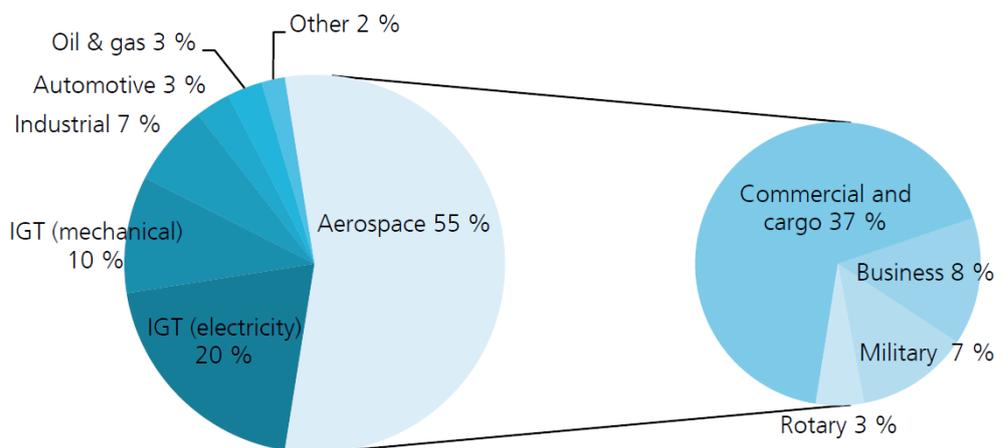
**Abbildung 22: Metallische Zusammensetzung einer typischen Flugzeugturbine in Kilogramm und US\$ in 2011 (Bedder und Baylis 2013).**



Bei den Superlegierungen gibt es bezüglich des Recyclings die Schwierigkeit einer langen Lebensdauer. Die Hauptanwendung sind hier Flugzeugturbinen, deren Lebensdauer aktuell bei ca. 25 Jahren liegt (Duwe 2014).

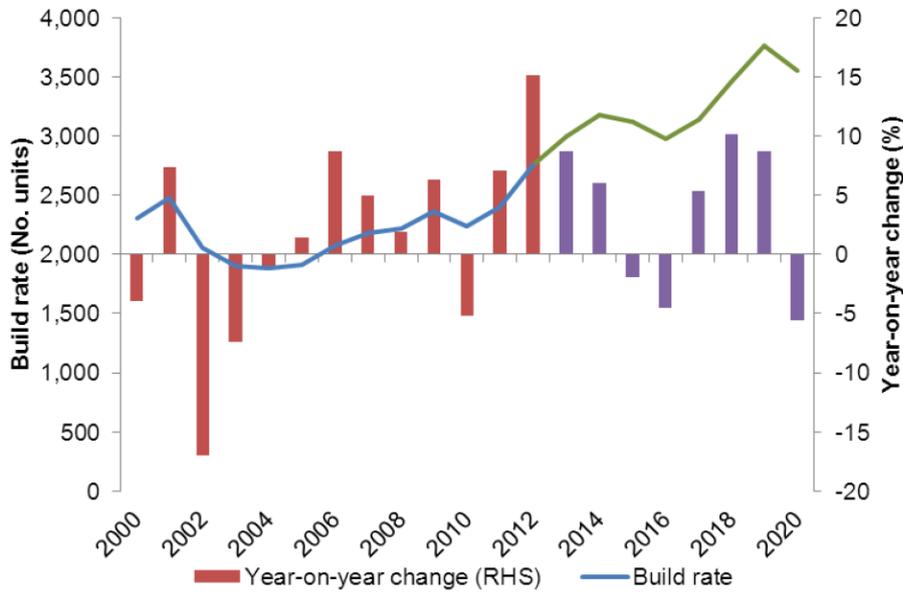
Der Flugzeugturbinenmarkt ist mit 55 % der größte Markt für Superlegierungen (Abbildung 23). Schätzungen zufolge wird er von heute ca. 2.900 Markteinheiten pro Jahr auf 3.750 Markteinheiten pro Jahr in 2019 steigen (Abbildung 24) (Bedder und Baylis 2013). Der zweitgrößte Marktanteil liegt bei Superlegierungen für Gasturbinen in Kraftwerken. Die Produktionsmenge von Turbinen dieser Art soll bis 2020 annähernd konstant bleiben.

**Abbildung 23: Weltweiter Bedarf von Superlegierungen aufgeschlüsselt nach deren Endnutzung im Jahr 2010 (Bedder und Baylis 2013).**



Die wichtigste Anwendung für Superlegierungen sind Flugzeugtriebwerke und Turbinen, da hier Hochtemperaturstabilität nötig ist und hohe Werkstoffverlässlichkeiten (Passagiersicherheit) gefordert sind. Eine Recyclinginfrastruktur von Flugzeugen ist noch nicht vollständig etabliert, so die Aussage von Christian Duwe von der TU Clausthal: „Flugzeuge haben eine Lebensdauer von 25 Jahren (dahin geht der Trend derzeit) und 40 Jahren (so war es

noch vor 5 Jahren). Ursprünglich war das Hauptmaterial von Flugzeugen noch Aluminium und seine Legierungen. Dementsprechend wird bei Flugzeugen (ohne Fahrwerk, Avionik, Triebwerk) hauptsächlich das Aluminium recycelt.“ (Duwe 2014). Dennoch werden Turbinen und Elektronik bereits zurückgewonnen. Es gibt noch keinen gesetzlichen Standard für den Rückbau und die Verwertung der Sekundärrohstoffe (Duwe 2013).



**Abbildung 24: Weltweite Produktion kommerziell vertriebener Flugzeugturbinen von 2000 bis 2030 (Bedder und Baylis 2013).**

## 7.3 Kriterienbewertung

Die Kriterienbewertung (Tabelle 5) ordnet differenziert nach Wirtschaftszweigen/Branchen dem zukünftigen Cobaltmarkt eine potenzielle Anwendungsentwicklung und einen entsprechenden Einfluss zu. Hierbei wird unterschieden zwischen:

- ++ Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht.
- + Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft.
- 0 Entwicklungspotenziale vorhanden.
- Keine Entwicklungspotenziale vorhanden.

Gleichzeitig wird Wert darauf gelegt, dass neben Entwicklungspotenzialen aktiv betroffener Wirtschaftsunternehmen auch die Gesamtbreite vorhandener Branchen erfasst und erläutert wird. Diese stellen sekundäre „Nutzer“ dar, sodass vorhandene Wechselwirkungen näher differenziert werden können.

**Tabelle 5: Entwicklungspotenziale nach Wirtschaftszweigen/Branchen (Einschätzung durch die Fraunhofer-Projektgruppe IWKS).**

<b>Industrial sectors</b>	<b>Assessment (IWKS)</b>
Automotive industry	+
Building industry	-
Mining and raw materials	++
Chemistry and Pharmacy	+
Electrical and electronics industry	++
Energy supply	++
Disposal and recycling	++
Nutrition	-
Precision mechanics and optics industry	-
Research and Development	++
Liberal professions	0
Healthcare industry	-
Real estate and housing	0
Information technology and telecommunication	++
Leather industry	-
Aerospace	++
Maritime economy	-
Machinery and plant engineering	+

**Industrial sectors****Assessment (IWKS)**

Analyse der Ergebnisse | Co

---

Paper and printing industry	-
Railroad vehicle construction	-
Footwear industry	-
Steel and metal	<b>++</b>
Textile and clothing industry	-
Traffic, transport, renting of movable assets	+
Water management	+
Two-wheeler industry	+

---

### 7.3.1 Kommentare zur potenziellen Entwicklung

#### **Automobilindustrie (Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft)**

„Die E-Mobilität wächst weiter. Entsprechend müssen effiziente Systeme der Strom-/Energieversorgung geschaffen werden. Die Automobilindustrie sollte daran interessiert sein, diese gemeinschaftlich mit wissenschaftlichen Einrichtungen im Pilotmaßstab zu entwickeln und zur Serienreife führen.“

#### **Bauwirtschaft (Kein Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Die Bauwirtschaft ist auf die Versorgung mit unterschiedlichen Stählen angewiesen. Dennoch ist deren Interesse in der Entwicklung und Substitution von cobaltbasierten Stählen derzeit nicht vorhanden. Entsprechende Preisentwicklungen werden an den Endanwender/Kunden weitergegeben.“

#### **Bergbau und Rohstoffe (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

„Hinsichtlich der Exploration bestehen aufgrund der Verknappung und des gleichzeitig vielseitigen Anwendungsgebiets deutliche Potenziale, die Unternehmen bereitwillig investieren werden. Die Investitionen sind auf internationaler Ebene bzw. durch internationale Unternehmen (vorhandene Globale Player) zu erwarten. Gleichzeitig ist zu erwarten, dass Investitionen in die Nutzung des Beiprodukts Cobalt getätigt werden und Gewinnungsraten gesteigert werden.“

#### **Chemie und Pharmazie (Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft)**

„Cobalt ist nicht nur Bestandteil von Enzymen im menschlichen Körper, sondern auch wichtiger Katalysator für die Chemieindustrie. Katalyse ist die Wissenschaft von der Beschleunigung chemischer Reaktionen. Es ist zu erwarten, dass dieses Anwendungsgebiet weiter wachsen wird. Zudem liegen hierin die Grundprinzipien weiterer Anwendungen. Da es sich hierbei um die Entwicklung neuer bzw. auch die Optimierung vorhandener Systeme handelt, werden Kooperationen zwischen Forschung, Industrie und Wirtschaft erfolgen.“

#### **Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

„Für diesen Wirtschaftszweig spielt Cobalt eine wesentliche Rolle. Es ist zu erwarten, dass hier (auch aufgrund anderer Hightech-Metalle) Investitionspotenziale existieren und getätigt werden. Die Rückgewinnung von Cobalt, aus den produzierten Baugruppen, wird eine wesentliche Rolle spielen.“

#### **Energieversorgung (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

„Im Zeitalter der Energiewende und der gleichzeitigen Gewährleistung von Versorgungssicherheiten sind stetig neue Wege zur Überwindung von Problemen notwendig. In Zukunftstechnologien der Energieversorgung und -speicherung wird ein großes Investitionsfeld gesehen, dass sich neben der Entwicklung von Technologien auch mit der benötigten Rohstoffversorgung beschäftigen wird. Cobalt spielt hier eine wesentliche Rolle. Das Investitionspotenzial oder vielmehr die Investitionsmaßnahmen sind hoch. Aufgrund von Marktvorteilen sind vorwiegend unternehmensinterne Entwicklungen und resultierende Patentierungen zu vermuten“

#### **Entsorgung und Recycling (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

„Potenziale sind vorhanden. Strukturen zur Sammlung existieren. Nischen betreiben derzeit das effiziente und wirtschaftliche Recycling aus entsprechenden Materialkomplexen. Insgesamt liegen derzeit hohe Potenziale an ungenutzten anthropogenen Stoffen vor. Entsorgungs- und Recyclingunternehmen erkennen dies. Die gezielte Rückgewinnung von Cobalt wird angestrebt“

**Ernährung (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„In Nahrungsmitteln ist Cobalt überwiegend in tierischen Lebensmitteln wie Fleisch, Fisch, Innereien, Eiern, Milch und Milchprodukten enthalten. Die Entwicklungen dieses Wirtschaftszweigs werden sich zukünftig auf die Bereitstellung dieser Lebensmittelgruppe konzentrieren. Die Versorgung mit Cobalt ist jedoch keine zentrale Fragestellung. Vielmehr findet eine Anpassung an den Konsumwandel statt.“

**Feinmechanik und Optik (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Die Feinmechanik- und Optikindustrie ist von der Verfügbarkeit von Cobalt allenfalls indirekt betroffen. Diese Industriebranchen sind ausschließlich auf die Bereitstellung entsprechender Materialien angewiesen und dadurch ausschließlich indirekt betroffen. Ein konkretes Interesse existiert vor diesem Hintergrund nicht.“

**Forschung und Entwicklung (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

Aufgrund des dringenden Bedarfs an Cobalt werden betroffene Industriezweige deutlich daran interessiert sein, ihr Know-How weiter auszubauen. Die Kooperation mit Forschung und Entwicklung bietet in diesem Zusammenhang eine Möglichkeit neue Ideen/Innovationen zu entwickeln.

Da Cobalt ebenfalls aus (welt-) politischer Sicht von Interesse ist, werden Bestrebungen auf diesem Gebiet in den meisten Fällen aus der Konstellation Politik, Wirtschaft und Forschung bestehen.“

**Freie Berufe (Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Freiberufler stellen eine große Vielzahl an unterschiedlichen Interessensbereichen dar. Es ist daher denkbar, dass bei zunehmender Verknappung von Cobalt Investitionen getätigt werden.“

**Gesundheitswirtschaft (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Cobalt ist essentiell für die Versorgung des Menschen. Bestrebungen sind jedoch nicht zu erwarten, da die Versorgung momentan gesichert ist.“

**Grundstücks- und Wohnungswesen (Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Gebäude bieten Potenziale für die sekundäre Rückgewinnung von Cobalt, die derzeit ungenutzt verloren gehen. Da hier aber auch massenbezogen weitere Ressourceninteressen bestehen, sind keine gezielten Anstrengungen zur Rückgewinnung vorhanden.“

**Informationstechnik und Telekommunikation (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

„Aufgrund der Eigenschaften von Cobalt ist es wesentliches Element in unterschiedlichen Bauteilen der Informations- und Telekommunikationsbranche (Bsp. Handy). Vor dem Hintergrund der zunehmenden „Vernetzung“ und der gleichzeitigen „Miniaturisierung“ bei funktionalem Mehrgewinn, wird Cobalt essentiell bleiben. Alternativen existieren nicht, sodass Entwicklungen neben der Substitution auch Effizienzsteigerungen betreffen werden.“

**Lederwarenindustrie (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Lederwaren beinhalten allenfalls in geringen Konzentrationen cobalthaltige Materialien. Zudem sind alternative Materialien vorhanden und die Notwendigkeit der stofflichen Eigenschaften von Cobalt nicht gegeben. Interesse zur Forschung und Entwicklung besteht daher nicht.“

**Luft- und Raumfahrt (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

„Leichtbau und Turbinentechnologie sowie die dazu notwendigen Superlegierungen werden zukünftig eine wichtige Rolle der Entwicklung spielen. Wie aufgezeigt, handelt es sich hierbei um einen bedeutenden Wachstumsmarkt, der auf entsprechende

cobaltbeinhaltende Materialien angewiesen ist. Aufgrund der Notwendigkeit von Material- und Leistungssteigerungen sind deutliche Bestrebungen zur Optimierung zu erwarten. Ein deutliches Interesse aus Sicht des jeweiligen Unternehmens ist daher gegeben. Die Tatsache, dass resultierende Optimierungspotenziale einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber Konkurrenten darstellen, lässt darauf schließen, dass ausschließlich firmeninterne Entwicklungen stattfinden.“

#### **Maritime Wirtschaft (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Die maritime Wirtschaft ist nicht auf Cobalt angewiesen. Gleichzeitig sind keine Bestrebungen der maritimen E-Mobilität zu sehen. In naher Zukunft sind demnach keine Bestrebungen zu erwarten, die Cobalt in den Fokus rücken.“

#### **Maschinen- und Anlagenbau (Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft)**

„Als Zulieferzweig für unterschiedliche Unternehmensbereiche und nachgeschaltete Branchen ist der Maschinen- und Anlagenbau von Entwicklungen auf dem Cobaltmarkt betroffen. Entsprechend ist zu erwarten, dass unter definierten Bedingungen Interesse zur Entwicklung neuer/effizienter Lösungen, Fertigungstechniken sowie Substitutionsmöglichkeiten besteht. Aufgrund der Tatsache, dass hiervon in den meisten Fällen kleine- und mittelständische Unternehmen betroffen sind, ist ein kombiniertes Entwicklungsinteresse aus Forschung, Industrie, Wirtschaft und Politik realistisch.“

#### **Papier- und Druckindustrie (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Cobalt und dessen Verwendung findet hier allenfalls Anwendung in Form von Farbpigmenten (Cobaltblau). Da bereits heute zahlreiche Alternativen bestehen, sind keine Interessen zur Entwicklung zu erwarten.“

#### **Schienenfahrzeugbau (Kein Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Anders als im Bereich des Luftverkehrs, kann im Schienenfahrzeugbau auf diverse Materialien zurückgegriffen werden. Leichtbau und der Einsatz entsprechender Materialien spielt eine untergeordnete Rolle. Auch Antriebssysteme werden in Zukunft nicht auf Superlegierungen und somit Cobalt angewiesen sein.“

#### **Schuhindustrie (Kein Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„Der Einsatz von cobalthaltigen Materialien ist gering bzw. keinesfalls notwendig. Es existieren zahlreiche Alternativen, die ggf. Einsatz finden können, sodass bei Bedarf ausgewichen werden kann. Cobalt und entsprechende Cobaltverbindungen sind demnach für die zukünftige Entwicklung keinesfalls limitierend.“

#### **Stahl und Metall (Potenzial für Investitionen aus industrieller Sicht)**

„Die Stahl- und Metallbranche muss auf Anliegen ihrer Abnehmer eingehen. Gleichzeitig sind diese von der Zulieferung von Primär- und Sekundärrohstoffen abhängig. Um dies zu gewährleisten und aufgrund der kritischen Einschätzung Cobalts sind deutliche Entwicklungen zu sehen. Es ist sogar zu erwarten, dass Unternehmen, die sich dieser Fragestellung nicht widmen, langfristig keinen Bestand haben werden. Da dieser Wirtschaftszweig im Mittelpunkt der Produktionskette steht, sind Entwicklungen in viele Richtungen (Rohstoffbereitstellung, Produktvermarktung/-gestaltung, Substitution, Verfahrenstechnologie etc.) vorhanden.“

#### **Textil und Bekleidung (Keine Entwicklungspotenziale vorhanden)**

„In Textilien findet Cobalt ausschließlich Anwendung in Reißverschlüssen, Ösen, Knöpfen etc., die von Zuliefernden Unternehmen bereitgestellt werden. Zwar existieren Allergien, jedoch wird kein Bedarf der Substitution gesehen. Zudem ist das vorhandene und zukünftige Marktpotenzial sehr gering.“

**Verkehr, Transport und Vermietung beweglicher Güter (Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft)**

„Cobalt stellt ein Transportgut dar, das international gehandelt wird. Demnach ist zu erwarten, dass Umbrüche des Marktes automatisch Einfluss auf den Transportsektor haben. Im Interesse der Unternehmen ist dieser Markt zu beobachten. Dies wird interdisziplinär erfolgen. Stoffstrommanagementanalysen sind hierbei entscheidend.“

**Wasserwirtschaft (Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft)**

„Die Wasserwirtschaft bietet ein breites Entwicklungspotenzial zur Nutzung bzw. Rückgewinnung sekundärer Rohstoffe. Neben der Gewinnung von essentielltem Phosphor aus Abwässern, ist es ebenso denkbar, dass zukünftig und unter weiterer Ressourcenverknappung auch andere Rohstoffe eine Rolle spielen werden. Hinzu kommt, dass hierdurch die diffuse Verteilung von Ressourcen eingeschränkt werden kann. Momentan ist die Notwendigkeit von Entwicklungen nicht gegeben. Daher sind ausschließlich gemeinsame Bestrebungen (Forschung, Industrie, Wirtschaft und Politik) denkbar.“

**Zweiradindustrie (Kombiniertes Potenzial für Entwicklungen aus Forschung, Industrie und Wirtschaft)**

„Cobaltlegierungen und Stähle mit Cobaltanteilen finden zwar Alternativen, jedoch sind hier keine Anstrengungen zur Versorgung zu sehen. Vielmehr werden Investitionen in den Leichtbau mittels Carbon von Interesse sein. Cobalt ist in diesem Zusammenhang nicht limitierend und daher nicht von Interesse. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die Alterspyramide vor allem in Industrienationen wächst. Dies bedeutet, dass momentan ein starker Anstieg an elektronisch betriebenen/unterstützten Zwei-/Dreirädern existiert.“

**7.3.2 Entwicklungspotenziale**

Nachfolgende Wirtschaftszweige/Branchen werden maßgeblich von den Entwicklungen der weltweiten Versorgung mit Cobalt betroffen sein. Gleichzeitig können diese durch strategisches Vorgehen frühzeitig reagieren.

**Bergbau und Rohstoffe**

Bei wachsendem Bedarf ist die primäre Versorgung zu sichern und weiter auszubauen.

**Elektrotechnik- und Elektronikindustrie**

Als Hightech-Metall ist Cobalt diesem Bereich nicht wegzudenken.

**Energieversorgung**

Cobalt wird eine Schlüsselrolle für die Speicherung von Energie und somit für die Fortbewegungsmittel von morgen spielen.

**Entsorgung und Recycling**

Der steigende Einsatz fordert gleichzeitig intelligente Systeme der Rückgewinnung, die aktuell nur bedingt vorliegen.

**Forschung und Entwicklung**

Die Knappheit und Kritikalität bei gleichzeitig hohen Leistungseigenschaften wird auch in Zukunft dazu führen, dass Forschung/Entwicklung nach optimierten und alternativen Lösungen suchen.

Informationstechnik und Telekommunikation bilden den deutlichsten Wachstumsmarkt unserer heutigen Gesellschaft. Miniaturisierung bei gleichzeitiger Leistungssteigerung wird auch in den kommenden Jahren auf Cobalt angewiesen sein.

### **Luft- und Raumfahrt**

Weltweite Mobilität und der globale Umschlag von Gütern ist allgegenwärtig und wird weiter wachsen. Hierfür benötigte (Antriebs-)Technologien setzen Cobalt voraus.

### **Stahl und Metall**

Als Zulieferer für unterschiedliche Technologiebereiche, die hohe Ansprüche an die Materialeigenschaften stellen, wird auch zukünftig eine gesicherte Versorgung mit Cobalt notwendig sein. Substitute mit vergleichenden Eigenschaften existieren zurzeit nicht.

Cobalt wird zukünftig eine wesentliche Rolle im Bereich der Superlegierungen, des Leichtbaus und der Energieversorgung/E-Mobilität, in Form von Batteriesystemen spielen.

Demnach werden in erster Linie betroffene Branchen (Luftfahrt und Automobilhersteller) daran interessiert sein, Entwicklungen zu verfolgen und gleichzeitig versuchen diese aktiv zu gestalten. Demnach sind deutliche Investitionen zu erwarten. Diese Bestrebungen werden dabei auch die Verfügbarkeit und den Einsatz von Cobalt betreffen. Cobalt ist – aufgrund der chemisch-/physikalischen Eigenschaften – essentiell für Hightech-Technologien sowie – Ausgangsmaterialien und derzeit nicht nutzeffizient substituierbar bzw. nur durch ähnlich kritische Rohstoffe substituierbar.

Die kombinierte Weiterentwicklung für Substitutionsmöglichkeiten, den effizienten Einsatz sowie die Verfügbarkeit von Cobalt werden in Zukunft durch Kooperationen von Politik, Wissenschaft und Wirtschaft realisiert.

Abzusehen ist in diesem Zusammenhang, dass politische Förderprogramme dies zukünftig direkt oder indirekt unterstützen.

### **Hinweis**

Zusätzlich ist ein Bewertungsmaßstab der aktuellen Akteure auf Basis der Hauptanwendungen dem Unternehmenskompendium zu entnehmen.

Umicore Cobalt and Special Materials ist eine der Firmen, die in fast jedem Anwendungsgebiet von Cobalt vertreten ist. Weiterhin zeigt die Unternehmensclustering auf, dass viele kleine und mittelständische Unternehmen derzeit in den verschiedenen Relevanzstufen auf das Industriemetall angewiesen sind. Die Herausforderung der Substitution des Kathodenmaterials für Li-Ionen-Batterien, die essentiellen Funktionen im menschlichen Metabolismus und die vielfältigen weiteren Anwendungen gebieten Aufmerksamkeit bei der Wahl des Rohstoffs Cobalt. Die kurze statische Reichweite von nur 61 Jahren sollte für Unternehmen, für die Cobalt eine hohe strategische Relevanz hat, Grund genug sein, die Versorgungslage genauer zu untersuchen und Möglichkeiten der vertikalen Integration oder Kooperation zu identifizieren. Im Falle des Cobalts ist dies aber auch unerlässlich für Unternehmen mit ökonomischer und technischer Relevanz, da der Hauptversorger, die Demokratische Republik Kongo, ein hochgradig unsicherer Staat mit extremen soziopolitischen Herausforderungen ist. In Expertenkreisen ist von der Wahl zwischen staatlicher und rebellischer Kriminalität die Rede. Kriminalität stehe in jedem Fall hinter den Mineralen. Ein vollständiger Boykott ist im Falle von Cobalt allerdings unvorstellbar, da die Reserven in anderen Teilen der Welt vergleichsweise unbedeutend sind.

Die tiefgreifende Auseinandersetzung mit der Rohstoffsituation wirft auch im Fall von Cobalt weiterhin offene Fragen auf. Die Datenlage zur Minensituation ist gekennzeichnet durch Unvollständigkeit, da nur ca. 42.000 t Cobalt einem Produzenten oder Förderer zugeordnet werden können während laut CDI mindestens 77.000 t jährlich raffiniert werden. Die Gesamtminenproduktion aller Länder liegt laut USGS bei 117.100 t (USGS MCS 2014). Hier klafft eine eklatante Lücke und noch sind Maßnahmen wie das Country-by-Country-Reporting, das länderübergreifende Unternehmensaktivitäten vor dem Staat offenlegen soll, für die Datenlage hinsichtlich der Tonnagen an Rohstoffen nicht in Sicht. Weiterhin muss für die Entstehung eines vollständigeren Bildes genau untersucht werden, welche Tonnagen an Material benötigt werden, um welche Funktion zu erzielen. Hierbei sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass die unterschiedlichen Funktionen nur durch bestimmte Reinheitsgrade des Vorproduktes erfüllt werden können. Solche Stoffstromanalysen wurden an der Projektgruppe IWKS des Fraunhofer-Instituts ISC bereits für andere Industriemetalle in Projekten für Unternehmen erstellt. Sie zeigen mitunter versteckte Nutzungspotenziale und Anknüpfungspunkte für die beteiligten Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette auf.



## 9

### Literaturverzeichnis

Albert, Karsten (2004): Pharmazeutische Zeitung online: Statt Blau- besser Orangegele. Govi-Verlag Pharmazeutischer Verlag GmbH. Eschborn. Online verfügbar unter [http://www.pharmazeutische-zeitung.de/index.php?id=pharm4\\_06\\_2004](http://www.pharmazeutische-zeitung.de/index.php?id=pharm4_06_2004), zuletzt geprüft am 30.04.2014.

Altuncu, Ekrem; Ustel, Fatih; Turk, Ahmet; Ozturk, Savas; Erdogan, Garip (2013): Cutting-tool recycling process with the zinc-melt method for obtaining thermal-spray feedstock powder (WC-Co)-MELT METHOD FOR OBTAINING THERMAL-SPRAY FEEDSTOCK POWDER (WC-Co). Online verfügbar unter <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit131/altuncu.pdf>, zuletzt geprüft am 24.02.2014.

Angerer, Gerhard; Erdmann, Lorenz; Marscheider-Weidemann, Frank; Scharp, Michael; Lüllmann, Arne; Handke, Volker; Marwede, Max (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Stuttgart.

Auro (2008): Cobalt als Trockner. Online verfügbar unter [http://www.auro.de/de/ueber-AURO/sanfte-chemie/fachbeitraege/FB\\_kobalt\\_als\\_trockner.pdf](http://www.auro.de/de/ueber-AURO/sanfte-chemie/fachbeitraege/FB_kobalt_als_trockner.pdf), zuletzt geprüft am 23.04.2014.

Bedder, Jack; Baylis, Robert (2013): Into the melting pot: the superalloy market and its impact on minor metals, zuletzt geprüft am 20.03.2014.

Berylls Strategy Advisors (2013): In Newsroom - Das Informationsportal für Unternehmer. Trend zu Low- und Zero-Emission-Autos bringt neues Geschäft für Karosserieleichtbau. Online verfügbar unter <http://newsroom.sparkasse.at/trend-low-und-zero-emission-autos-bringt-neues-geschaeft-fuer-karosseriehersteller/>, zuletzt geprüft am 03.10.2014.

BGR (2014): BGR - Produkte - Rohstoffpreismonitor. Online verfügbar unter [http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/SharedDocs/GT\\_Produnkte/Mineral\\_Rohstoffe/CPL\\_alle-genTab\\_DE.html](http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/SharedDocs/GT_Produnkte/Mineral_Rohstoffe/CPL_alle-genTab_DE.html), zuletzt geprüft am 26.03.2014.

Bol, Derk; Bastain, Ton (2012): Critical materials and The Netherlands – a view from the industrial- technological sector, zuletzt geprüft am 14.03.2014.

Bosch (2012): Wirtschaft - Dynamik auf stabiler Basis: Starkes Kerngeschäft ermöglicht Bosch den Weg zu neuen Wachstumsfeldern. Online verfügbar unter [http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=5554&tk\\_id=107](http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=5554&tk_id=107), zuletzt geprüft am 02.10.2014.

Buchert, Matthias (2009): Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential. Hg. v. UNEP.

Buchholz, Peter; Huy, Dieter; Sievers, Henrike (2012): DERA-Rohstoffliste 2012. Angebotskonzentration bei Metallen und Industriemineralen - Potenzielle Preis- und Lieferisiken. Hg. v. DERA (DERA Rohstoffinformationen, 10), zuletzt geprüft am 01.07.2014.

Buchmann, Isidor (2014): Types of Lithium-ion Batteries – Battery University. Hg. v. Isidor Buchmann. Online verfügbar unter [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion), zuletzt geprüft am 09.05.2014.

Caffarey, M. (2010): Unpublished data (Umicore).

CDI (2006a): Cobalt Facts Cobalt in Electronics. Unter Mitarbeit von Isabelle Porri. Hg. v. Cobalt Development Institute. Online verfügbar unter [http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/COBALT\\_FACTS-Electronics.pdf](http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/COBALT_FACTS-Electronics.pdf), zuletzt geprüft am 22.04.2014.

CDI (2006b): Cobalt Facts Properties & Main Uses.doc. Unter Mitarbeit von Isabelle Porri. Hg. v. Cobalt Development Institute. Online verfügbar unter [http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/COBALT\\_FACTS-Properties\\_and\\_Main\\_Uses.pdf](http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/COBALT_FACTS-Properties_and_Main_Uses.pdf), zuletzt geprüft am 13.05.2014.

CDI (2013): Cobalt Facts 2012 Cobalt Supply & Demand 2012, zuletzt geprüft am 12.03.2014.

CDI (2014a): About Cobalt. Hg. v. Cobalt Development Institute. Online verfügbar unter <http://www.thecdi.com/about-cobalt>, zuletzt geprüft am 16.04.2014.

CDI (2014b): Catalysts. Hg. v. Cobalt Development Institute. Online verfügbar unter <http://www.thecdi.com/general.php?r=12ENJWIVAD>, zuletzt geprüft am 24.03.2014.

CDI (2014c): Cobalt in Pigments /Ceramics /Enamels. Hg. v. Cobalt Development Institute. Online verfügbar unter <http://www.thecdi.com/general.php?r=1JE7TEPT>, zuletzt geprüft am 09.05.2014.

CDI (2014d): Rechargeable Batteries : Cobalt Development Institute. Hg. v. Cobalt Development Institute. Online verfügbar unter <http://www.thecdi.com/general.php?r=LHENJWIEAG>, zuletzt geprüft am 17.04.2014.

Cheung, Albert (2012): Battery Innovation: Incremental or disruptive? Hg. v. Bloomberg. New York, zuletzt geprüft am 09.10.2014.

Cronimet (2014): Super- & Speziallegierungen. Online verfügbar unter <http://www.cronimet.de/de/produkte-services/portfolio/super-amp-speziallegierungen/>, zuletzt geprüft am 12.05.2014.

Die Welt (2014): 106 Millionen ungenutzte Handys in deutschen Haushalten. Online verfügbar unter <http://www.welt.de/newsticker/news1/article124127133/106-Millionen-ungenutzte-Handys-in-deutschen-Haushalten.html>, zuletzt geprüft am 02.10.2014.

DIHK, Ostwestfalen (2012): DIHK, Ostwestfalen. Online verfügbar unter [www.ostwestfalen.ihk.de/innovation-umwelt/ihk-jahresthema-2012-energie-rohstoffe/dera-charts/](http://www.ostwestfalen.ihk.de/innovation-umwelt/ihk-jahresthema-2012-energie-rohstoffe/dera-charts/), zuletzt geprüft am 23.09.2013.

DKI (2012): Niedriglegierte Kupferwerkstoffe Eigenschaften · Verarbeitung · Verwendung. PERFORMANCE MATTERS, zuletzt geprüft am 09.10.2014.

Duwe, Christian (2014): Unterhaltung mit Christian Duwe über Flugzeugrecycling. Leuven, 26.05.2014. Direktes Gespräch an IWKS Groth.

Energizer (2007): Energizer Product Safety Data Sheet. Online verfügbar unter [http://content.oppictures.com/master\\_images/master\\_pdf\\_files/evenh15bp4\\_msds.pdf](http://content.oppictures.com/master_images/master_pdf_files/evenh15bp4_msds.pdf), zuletzt geprüft am 17.04.2014.

EPOW (2011): Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England. Summary Report, zuletzt geprüft am 14.03.2014.

Erdmann, Lorenz; Behrendt, Siegfried; Feil, Moira (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte. Hg. v. KfW Bankengruppe. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung; Adelphi. Berlin.

EUC (2010): Critical raw materials for the EU. Hg. v. European Commission - Enterprise and Industry, European Commission Enterprise Policies, zuletzt geprüft am 20.09.2013.

EUC (2014a): REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU NON-CRITICAL RAW MATERIALS PROFILES. Unter Mitarbeit von Adrian Chapman, zuletzt geprüft am 27.06.2014.

EUC (2014b): Sustainable substitution in extreme conditions - EIP on Raw Materials - European Commission. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/eip/raw-materials/en/content/sustainable-substitution-extreme-conditions>, zuletzt geprüft am 08.05.2014.

Forgu (2014): Forgu Metall- und Verbundguss aus niedriglegierten hochleitfähigen Kupfer- und Messing-Werkstoffen. Hg. v. Forgu GmbH. Online verfügbar unter <http://www.forgu.de/html/cucobe.html>, zuletzt geprüft am 09.05.2014.

Gaines, Linda; Sullivan, Joh; Burnham, Andrew; Bellharouak, Ilias (2011): Life-Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling, zuletzt geprüft am 06.02.2014.

GRS (2013): GRS Batteriebrief Juni 2013. Aktuelles, Hintergründe, Positionen, zuletzt geprüft am 06.02.2014.

Gunn, Gus (2014): Critical Metals Handbook: WILEY-BLACKWELL.

Halme; Kimmo; Piirainen, Kalle A.; Vekinis, Georgios; Sievers, Ernst-Udo; Viljamaa, Kimmo (2012): Substitutionability of Critical Raw Materials. Studie für European Parliament's Committee on Industry, Research and Energy (ITRE). Hg. v. European Parliament. Directorate General for internal Policies, Policy Department A: Economic and Scientific Policy.

heise online (2013): Studie: 120 Millionen ungenutzte Handys in deutschen Haushalten. Online verfügbar unter <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Studie-120-Millionen-ungenutzte-Handys-in-deutschen-Haushalten-1928517.html>, zuletzt geprüft am 02.10.2014.

Heitzer, Armin (2006): Alternative Treibstoffe. VöV-Fachtagung. Online verfügbar unter <https://www.yumpu.com/de/document/view/1256318/alternative-treibstoffe>, zuletzt geprüft am 03.11.2014.

HMT TMD (2014): Austausch mit Heraeus Materials Technology GmbH & Co. KG, Target Materials Division zu Tantal targets, 29.04.2014. E-Mail an IWKS Hentschel.

Hunklinger, Siegfried (2009): Festkörperphysik. S. 514. 2. Aufl. München: Oldenbourg Verlag.

InfoMine (2014): Cobalt Mining - CommodityMine. Hg. v. InfoMine Inc. Vancouver. Online verfügbar unter <http://www.infomine.com/commodities/cobalt.asp>, zuletzt geprüft am 27.02.2014.

Kaufmann, Daniel; Kraay, Aart; Mastruzzi, Massimo (2013): WGI 2013 - The Worldwide Governance Indicators (WGI). Online verfügbar unter <http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx#home>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

Kraytsberg, Alexander; Ein-Eli, Yair (2012): Higher, Stronger, Better... A Review of 5 Volt Cathode Materials for Advanced Lithium-Ion Batteries. In: *Adv. Energy Mater.* 2 (8), S. 922–939, zuletzt geprüft am 16.04.2014.

KTM (2010): Cobalt and Cobalt Alloys. KEY to METALS Articles. Hg. v. Key to Metals AG, Zürich, Schweiz. Online verfügbar unter <http://keytometals.com/Article54.htm>, zuletzt geprüft am 30.04.2014.

Kuypers, Friedhelm (2012): Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Band 2. Elektrizität, Optik und Wellen. Weinheim: Wiley.

lbi (2014): Le bronze industriel : Alloys. Hg. v. Le bronze industriel. Online verfügbar unter <http://www.lebronzeindustriel.com/alliages/alliages.php?lng=en>, zuletzt geprüft am 09.05.2014.

Manhart, Andreas (2012): Ressourcenfieber - Seltene Erden & kritische Metalle. Vortrag in der Reihe „Wissenschaft für jedermann“ Deutsches Museum, 08. Februar. Online verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/1496/2012-065-de.pdf>, zuletzt geprüft am 02.10.2014.

Merkel, Manfred (2008): Taschenbuch der Werkstoffe. Unter Mitarbeit von Karl-Heinz Thomas. 7. Aufl. München: Carl Hanser Verlag.

Moss, R. L.; Tzimas, E.; Kara, H.; Willis, P.; Kooroshy, J. (2011): Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Hg. v. European Commission, Institute of Energy and Transport, Oakdene Hollins Ltd, The Hague Centre for Strategic Studies, zuletzt geprüft am 14.03.2014.

MTU (2014): Hardfacing - MTU Aero Engines. Online verfügbar unter <http://www.mtu.de/de/globals/glossary/H/hardfacing/>, zuletzt geprüft am 14.05.2014.

Picard, Klaus (2006): Biokraftstoffe aus Sicht der Mineralölindustrie. Schwerpunktthema: Biogene Kraftstoffe – Kraftstoffe der Zukunft? Online verfügbar unter [https://www.tatup-journal.de/tatup061\\_pica06a.php](https://www.tatup-journal.de/tatup061_pica06a.php), zuletzt geprüft am 02.10.2014.

Reisman, Lisa (2011): Why Cobalt Is Not a Conflict Mineral. MetalMiner. Online verfügbar unter <http://agmetalmminer.com/2011/06/06/why-cobalt-is-not-a-conflict-mineral/>, zuletzt aktualisiert am 04.12.2014, zuletzt geprüft am 04.12.2014.

Schilde, Uwe (2009): Experimentalvorlesung zur Allgemeinen und Anorganischen Chemie. Kapitel 31 - 8. Nebengruppe. Universität Potsdam. Institut für Chemie.

Schnitter (2014): Telefoninterview zu Artikel von H.C. Starck in "Recycling und Rohstoffe" Band 5, 2012. Alzenau, 21.02.2014 an IWKS Hentschel.

Smojver, Radmil (1997): Ammonia oxidation catalyst. Veröffentlichungsnr: US5690900.

Solan (2014): Solan 369 Öko Allround. Hg. v. XorteX eBusiness GmbH. SOLAN Kraftfutterwerk Schmalwieser GesmbH & Co KG. Online verfügbar unter <http://www.solan.at/de/produkte/rinder/product.solan-369-oeko-allround.html>, zuletzt geprüft am 09.05.2014.

Stadt Bremerhaven (2013): Deutschland: 65 Prozent aller Haushalte haben ein Tablet oder Notebook. Online verfügbar unter <http://stadt-bremerhaven.de/deutschland-65-prozent-aller-haushalte-haben-ein-tablet-oder-notebook/>, zuletzt geprüft am 02.10.2014.

Statista (2014a): Anzahl der Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2014 (in Millionen). Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonenuutzer-in-deutschland-seit-2010/>, zuletzt geprüft am 02.10.2014.

Statista (2014b): Anzahl weltweit eingesetzter Frachtflugzeuge bis 2033. Prognostizierte Anzahl der weltweit eingesetzten Frachtflugzeuge in den Jahren 2013 und 2033. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/277562/umfrage/anzahl-eingesetzter-frachtflugzeuge-weltweit/>, zuletzt geprüft am 02.10.2014.

Statista (2014c): Standard-Handy-Absatz schrumpft zweistellig. Absatz von Mobiltelefonen und Smartphones in Deutschland. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/infografik/736/absatz-von-mobiltelefonen-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 02.10.2014.

Statistisches Bundesamt (2014): Ausstattung privater Haushalte mit Informations- und Kommunikationstechnik - Deutschland. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsguetern/Tabellen/Infotechnik\\_D.html](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsguetern/Tabellen/Infotechnik_D.html), zuletzt geprüft am 02.10.2014.

Stemme, Kirsten (2002): Untersuchung zur Kobalt-Versorgung von Milchkühen. Online verfügbar unter [http://elib.tiho-hannover.de/dissertations/stemek\\_2002.pdf](http://elib.tiho-hannover.de/dissertations/stemek_2002.pdf), zuletzt geprüft am 08.05.2014.

Sun, Shouheng (2012): New cobalt-graphene catalyst could challenge platinum for use in fuel cells. Brown University. Online verfügbar unter <http://www.sciencedaily.com/releases/2012/10/121017123920.htm>, zuletzt geprüft am 08.05.2014.

Tanaka Chemical Corporation (2013): Products | Tanaka Chemical Corporation. Online verfügbar unter <http://www.tanaka-chem.co.jp/en/products/index.html>, zuletzt geprüft am 17.04.2014.

Tercero, Luis (2012): Criticality of mineral raw materials and sustainability assessment. Expert Workshop on Security of Supply and Scarcity of Raw Materials. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI). Ranco, Italy, zuletzt geprüft am 13.10.2014.

Thomé-Kozmiensky (Hg.) (2012a): Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur automatisierten Demontage und Aufbereitung von Lithium-Ion-Batterien aus Fahrzeugen. Unter Mitarbeit von Peter Ay, Jens Markowski. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Aufbereitungstechnik. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Recycling und Rohstoffe, 5).

Thomé-Kozmiensky (Hg.) (2012b): Interdisziplinäre Entwicklung und nachhaltige Problemlösungen im Forschungs- und Entwicklungsbereich der Ressourcentechnologie. Unter Mitarbeit von Prof. Bernd Friedrich, Kilian Gisbertz. Aachener Kompetenzzentrum für Ressourcentechnologie AKR e. V. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Recycling und Rohstoffe, Band 5).

Thomé-Kozmiensky (Hg.) (2012c): Recycling von Li-Ionen-Traktionsbatterien. Das Projekt LIBRi. Unter Mitarbeit von Elwert, Goldmann, Schirmer, Strauß. TU Clausthal. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Recycling und Rohstoffe, Band 5).

Thomé-Kozmiensky (Hg.) (2012d): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Das Projekt LithoRec. Unter Mitarbeit von Hanisch, Haselrieder, Kwade. TU Braunschweig. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Recycling und Rohstoffe, Band 5).

Thomé-Kozmiensky, Karl J. (Hg.) (2012e): Recycling von Refraktärmetallen. Unter Mitarbeit von Gerhard Gille. H.C. Starck. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (Recycling und Rohstoffe, Band 5).

UBA (2014): ProBas - Projekt; ProBas. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/themen.php?&prozessid={81A717DC-DA5B-4EDC-A754-03331A829E4F}&id=9915334656&step=4&search=>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.

UKERC (2012): Energy Materials Availability Handbook. A handbook by the Technology and Policy Assessment theme of the UK Energy Research Centre, zuletzt geprüft am 24.03.2014.

Umbrella (2011): Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcenverfügbarkeit im Rahmen der BMU-geförderten Projekte LithoRec und LiBRi. Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen - Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt. Abschlussbericht.

UNDP (2011): Table 1: Human Development Index and its components. Online verfügbar unter <https://data.undp.org/dataset/Table-1-Human-Development-Index-and-its-components/wxub-qc5k>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

UNDP (2014): Table 1: Human Development Index and its components. Hg. v. United Nations Development Programme. Online verfügbar unter <https://data.undp.org/dataset/Table-1-Human-Development-Index-and-its-components/wxub-qc5k>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

UNEP (2011): Recycling Rates of Metals – A Status Report. Unter Mitarbeit von Thomas E. Graedel, Julian Allwood, Jean-Pierre Birat und Matthias Buchert, zuletzt geprüft am 24.03.2014.

USGS (2014): Cobalt Statistics 2013. Historical Statistics for Mineral Commodities in the United States, Data Series 2005-140. Online verfügbar unter <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/index.html#cobalt>, zuletzt geprüft am 26.03.2014.

USGS MCS (2013): Cobalt. Mineral Commodity Summaries, zuletzt geprüft am 25.03.2014.

USGS MCS (2014): Cobalt. Mineral Commodity Summaries, zuletzt geprüft am 25.03.2014.

USGS MYB (2013): Cobalt Mineral Yearbook 2011, zuletzt geprüft am 28.02.2014.

van Eimeren (2013): „Always on“ – Smartphone, Tablet & Co. als neue Taktgeber im Netz. Ergebnisse der ARD/ZDF-Onlinestudie 2013. Online verfügbar unter <http://www.ard-zdf-onlinestudie.de/fileadmin/Onlinestudie/PDF/Eimeren.pdf>, zuletzt geprüft am 28.09.2014.

Vassart, Alain (2014): The Link Between the WEEE and the Battery Directive in their Respective Implementation. EBRA & RECHARGE. IERC. Salzburg, Österreich, 2014.

Wissenschaftsportal Französische Botschaft in Deutschland (2012): Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse: Kobalt als Alternative zu Platin. Online verfügbar unter <http://www.wissenschaft-frankreich.de/de/energie/wasserstoffherzeugung-durch-elektrolyse-kobalt-als-alternative-zu-platin/>, zuletzt geprüft am 13.10.2014.

World Business Council on Sustainable Development (2014): Fraunhofer ISI - Elektromobilität und Globaler Verkehr. Online verfügbar unter [http://www.fraunhofer-isi-cms.de/elektromobilitaet/Media/forschungsergebnisse/13062438644984-10.92.21.153-Forschungsergebnisse\\_Verkehrsszenarien\\_Globaler\\_Verkehr.pdf](http://www.fraunhofer-isi-cms.de/elektromobilitaet/Media/forschungsergebnisse/13062438644984-10.92.21.153-Forschungsergebnisse_Verkehrsszenarien_Globaler_Verkehr.pdf), zuletzt geprüft am 06.10.2014.

Yale University (2014): Environmental Performance Index (EPI) Country Rankings. Online verfügbar unter <http://epi.yale.edu/epi/country-rankings>, zuletzt geprüft am 30.06.2014.

Young, Roland (2014): Cobalt processing. Unter Mitarbeit von John Campbell Taylor. Hg. v. Britannica Online Encyclopedia. Online verfügbar unter <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/123274/cobalt-processing>, zuletzt geprüft am 07.02.2014.

Zhang, Zongyin (1999): Processing of Nanostructured WC-Co Powders and Sintered Steels. In: *Nano-Structured Materials* (Vol. 12), S. 163–166, zuletzt geprüft am 10.03.2014.

ZVEI (2013): Konfliktrohstoffe - Positionspapier und Hintergrundpapier der Elektroindustrie. Frankfurt am Main, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-und Elektronikindustrie e.V. Abteilung International Trade & Future Markets. Online verfügbar unter <http://www.zvei.org/Publikationen/ZVEI-Konfliktrohstoffe.pdf>, zuletzt geprüft am 12.03.2014.

