



# Kritische Rohstoffe für E-Mobilität - Herausforderungen und Lösungsansätze -

Ringvorlesung Hochschule Pforzheim am 9. Januar 2020

Aline Hendrich, Consultant, thinkstep (jetzt Sphera)

# Wer bin ich?



**Aline Hendrich**

Consultant Energy & Mobility  
thinkstep (jetzt Sphera)

+49 711 341817-251  
AHendrich@sphera.com





Dr.-Ing. Benjamin Reuter  
Senior Consultant, thinkstep

Aline Hendrich, Jasmin Hengstler,  
Stefan Kupferschmid, Markus Schwenk  
Team Energy + Mobility, thinkstep

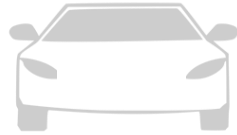
Dr.-Ing. Johannes Gediga  
VP Mining, Metal, Manufacturing &  
Sustainability, thinkstep

Link zur Studie:

[https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Material-Studie\\_e-mobilBW.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Material-Studie_e-mobilBW.pdf)

„Batterieelektrische (BEV) und brennstoffzellenelektrische (FCEV) Fahrzeuge sind **die** Lösung für die nachhaltige Verkehrswende.“

## Optimist

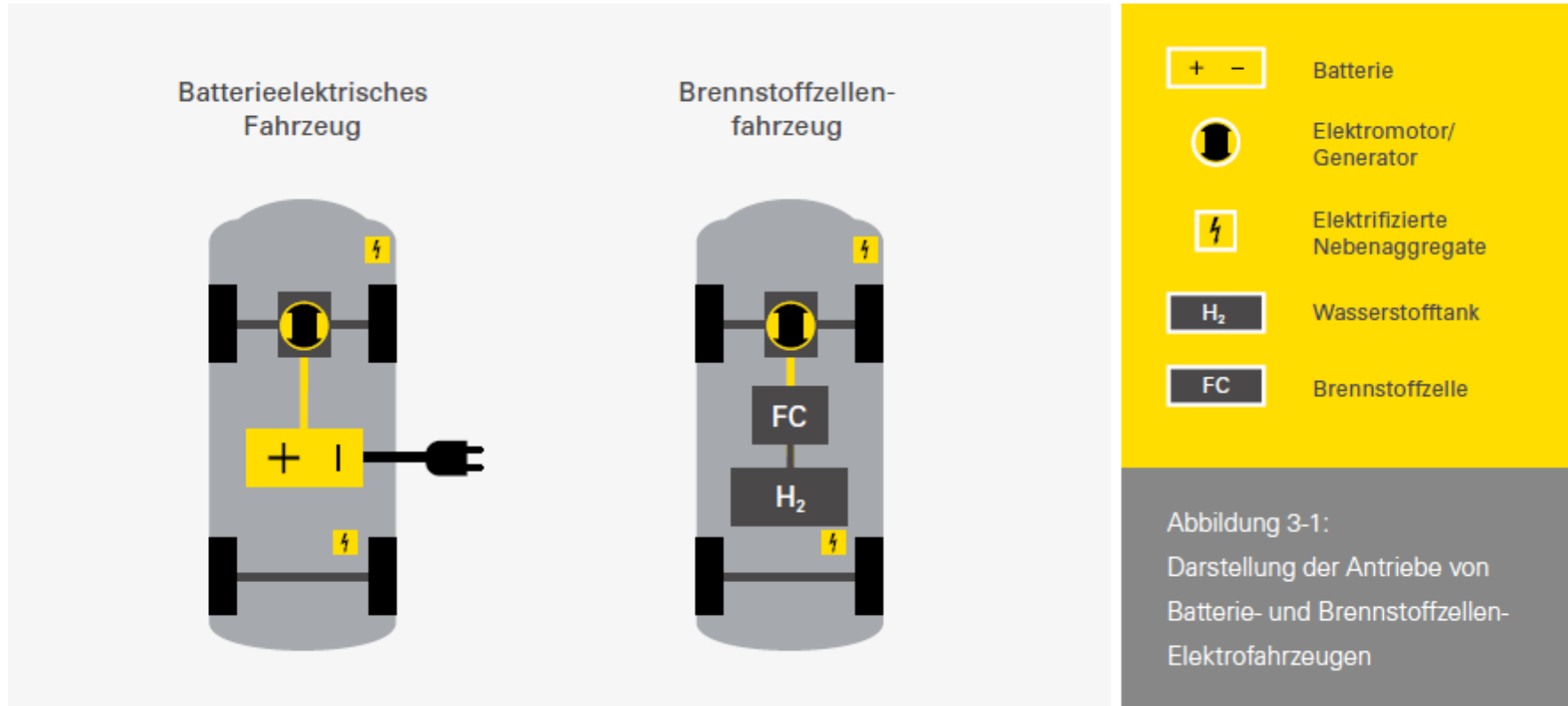


“BEV and FCEV sind **keine** Lösung wegen der Probleme, die durch den Rohstoffbedarf bedingt sind.”

## Pessimist



# Die Fahrzeuge der Zukunft



BEV	FCEV	BEV + FCEV
Traktionsbatterie	Brennstoffzelle	Elektromotor
	H <sub>2</sub> -Speichertank	Kabelbaum

Altenburg et al. (2017): Nullemissionsnutzfahrzeuge

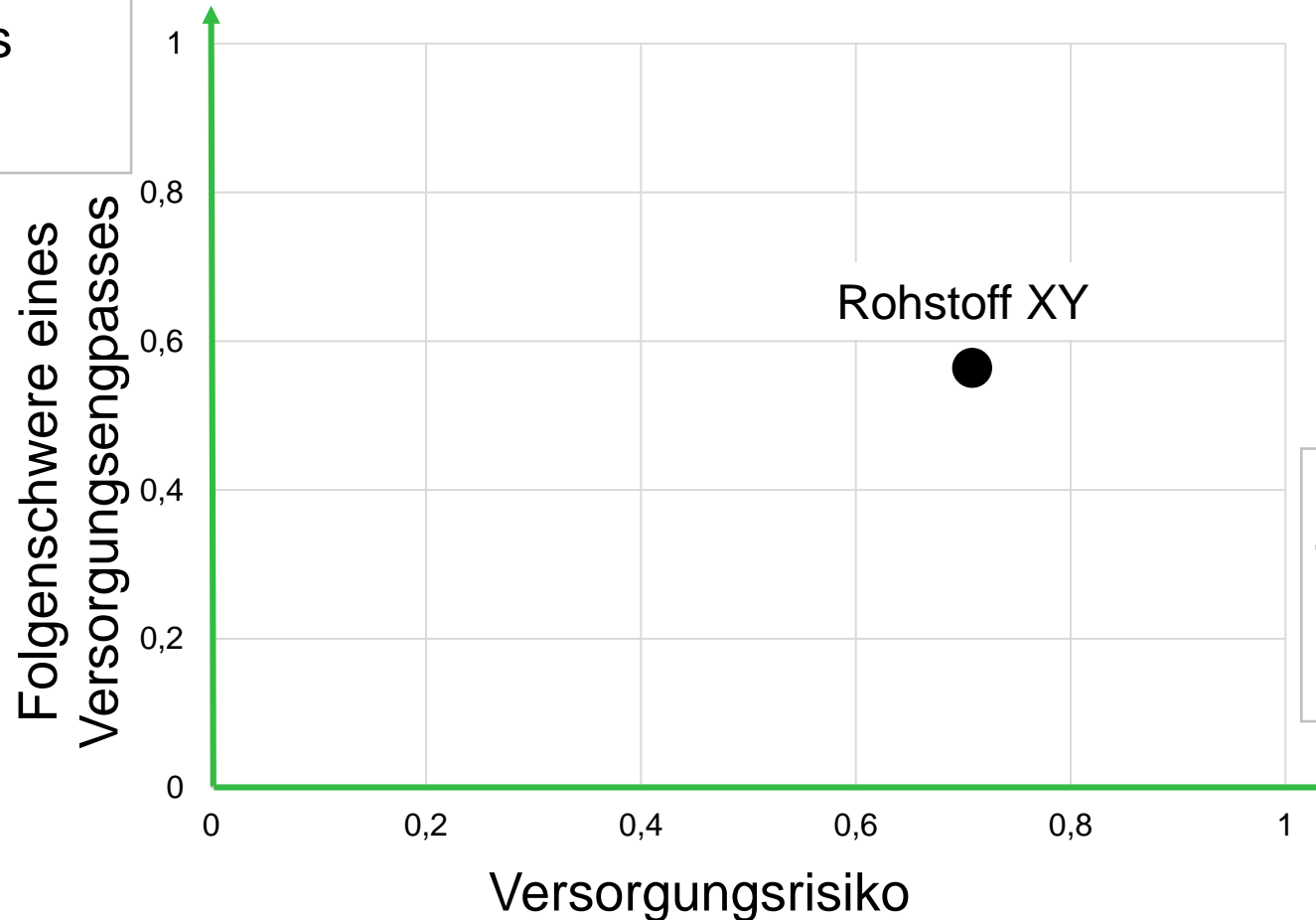
# Die Relevanz der Rohstoffe

## Ansatz der Kritikalität



### Folgeschwere: Experten-Interviews

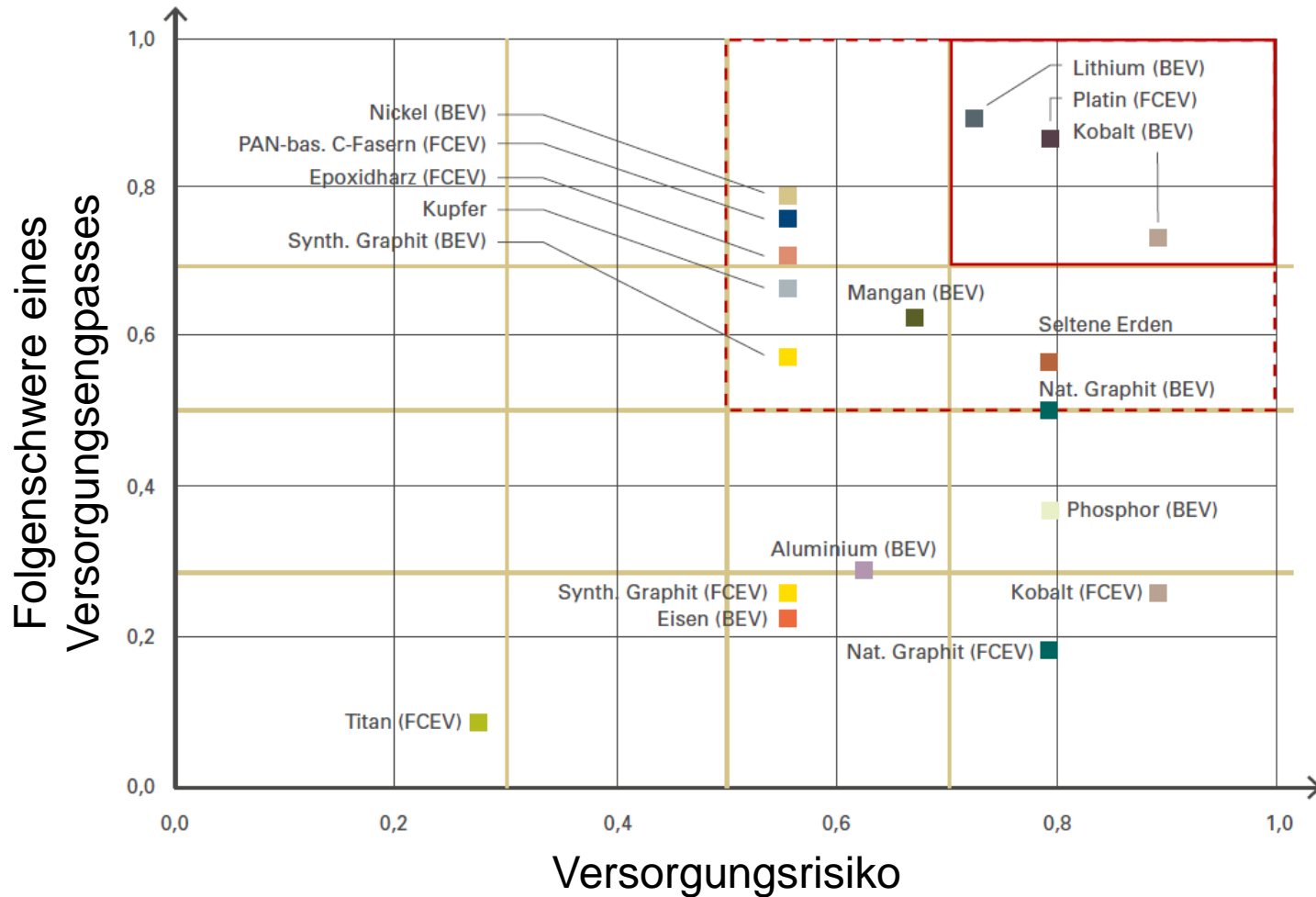
1. Technische Auswirkungen
2. Ökonomische Auswirkungen



Versorgungsrisiko:  
5 Indikatoren nach VDI 4800

# Die Relevanz der Rohstoffe

## Ergebnisbetrachtung



- Lithium
- Kobalt
- Platin
- Nickel
- Kupfer
- Seltenerdelemente



# Weltweite Entwicklung von Abbau und Reserven

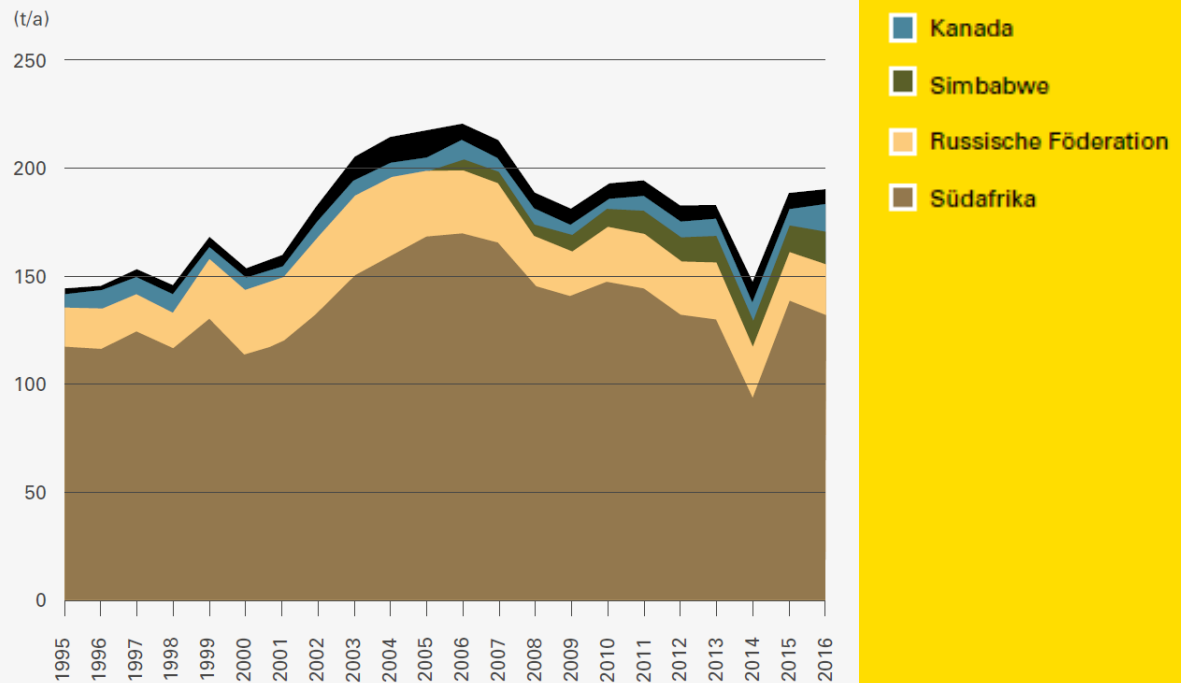


# Entwicklung der Förderung

## Materialien mit maximalem und minimalem Anstieg

Minimale Steigerung 1995-2015:  
Platin +30% (PGM: +58%)

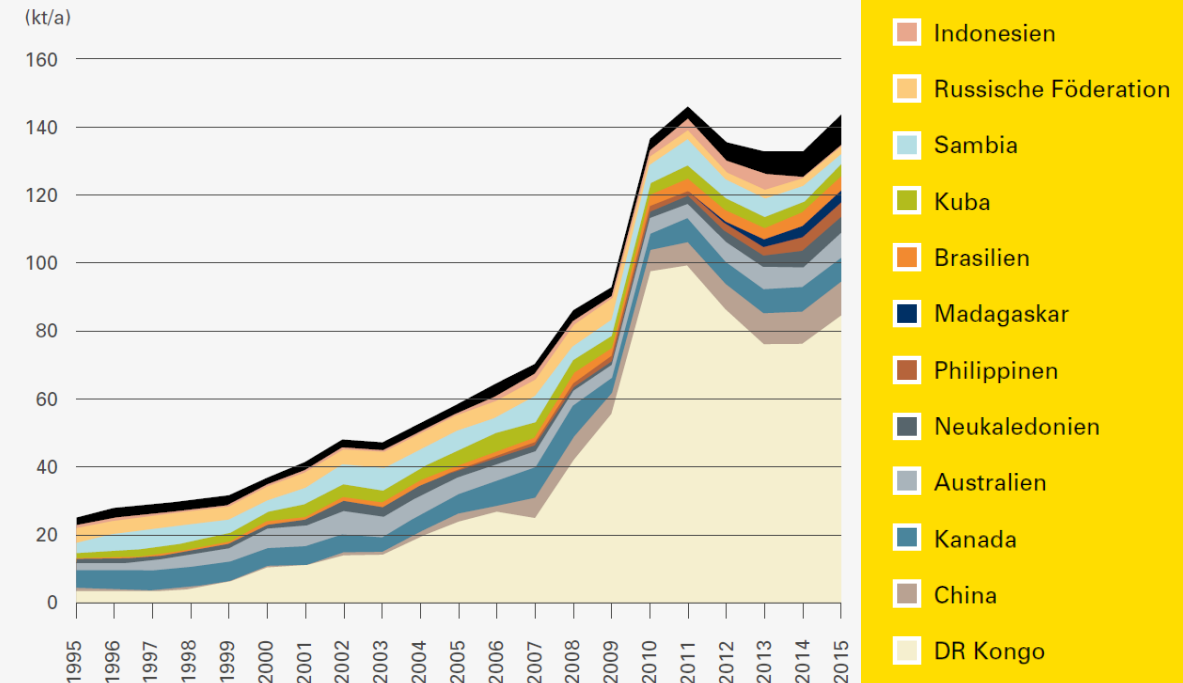
Jährliche Fördermenge Platin 1995-2016



Quelle: USGS (2018): Mineral Commodity Summaries

Maximale Steigerung 1995-2015:  
Kobalt +457%

Jährliche Fördermenge Kobalt 1995-2015



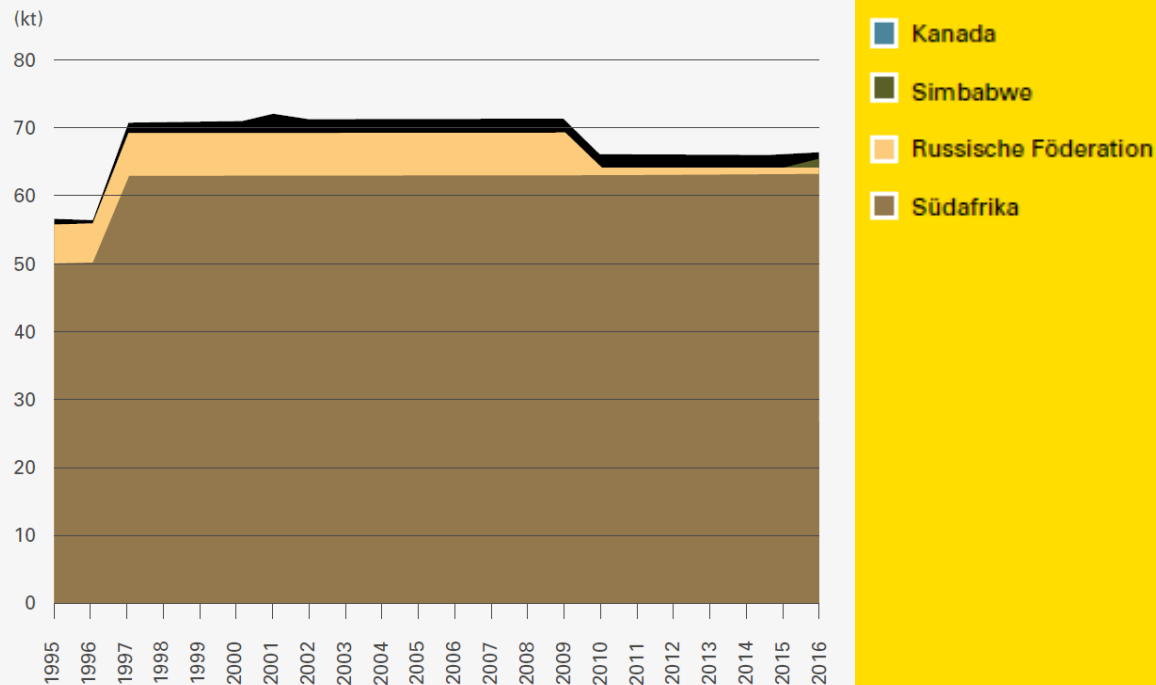
Quelle: DERA/BGR: ROSYS

# Entwicklung der Reserven

## Materialien mit maximalem und minimalem Anstieg

Minimale Steigerung 1995-2016:  
PGM +18%

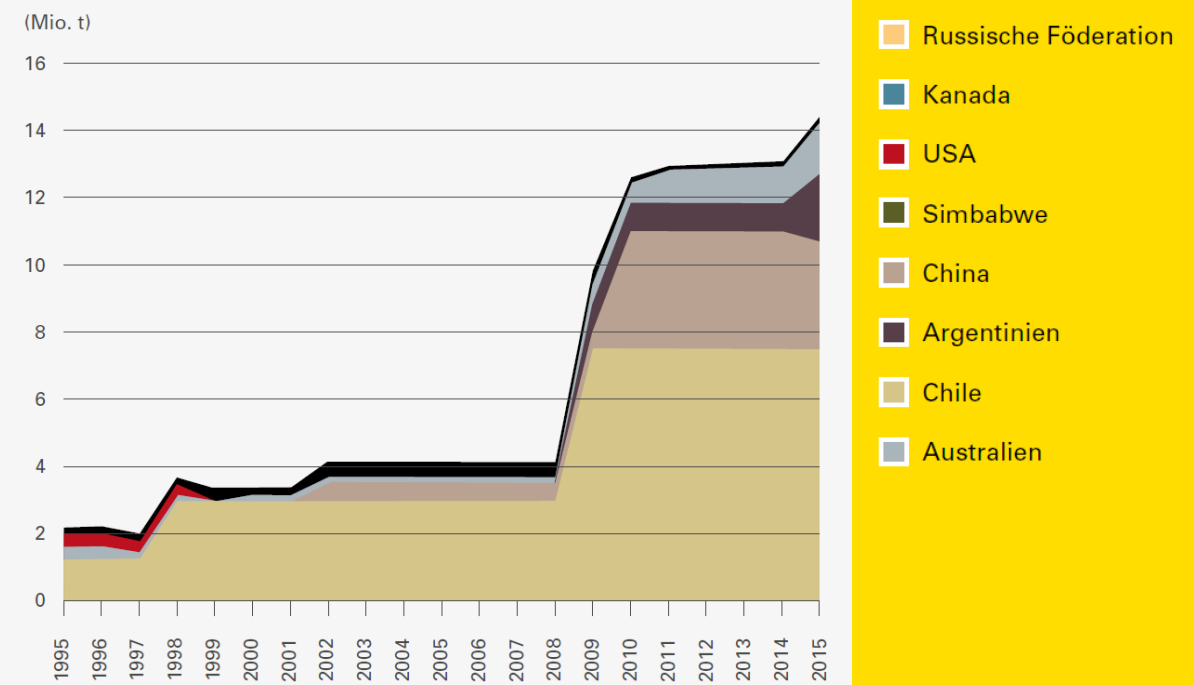
PGM-Reserven 1995-2016



Quelle: USGS (2018): Mineral Commodity Summaries

Maximale Steigerung 1996-2015:  
Lithium +549%

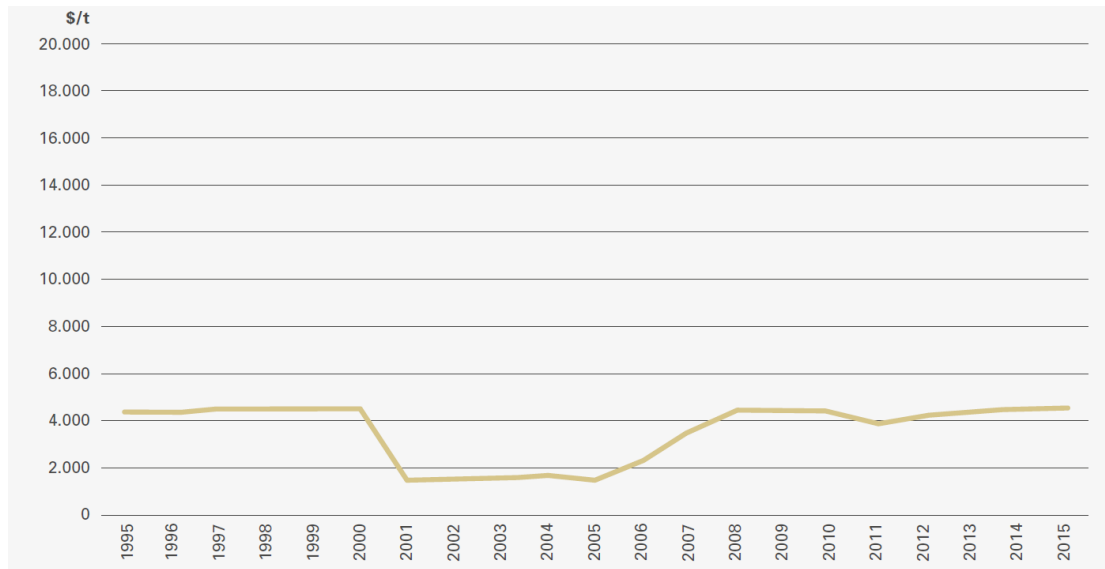
Lithiumreserven 1995-2015



Quelle: DERA/BGR: ROSYS

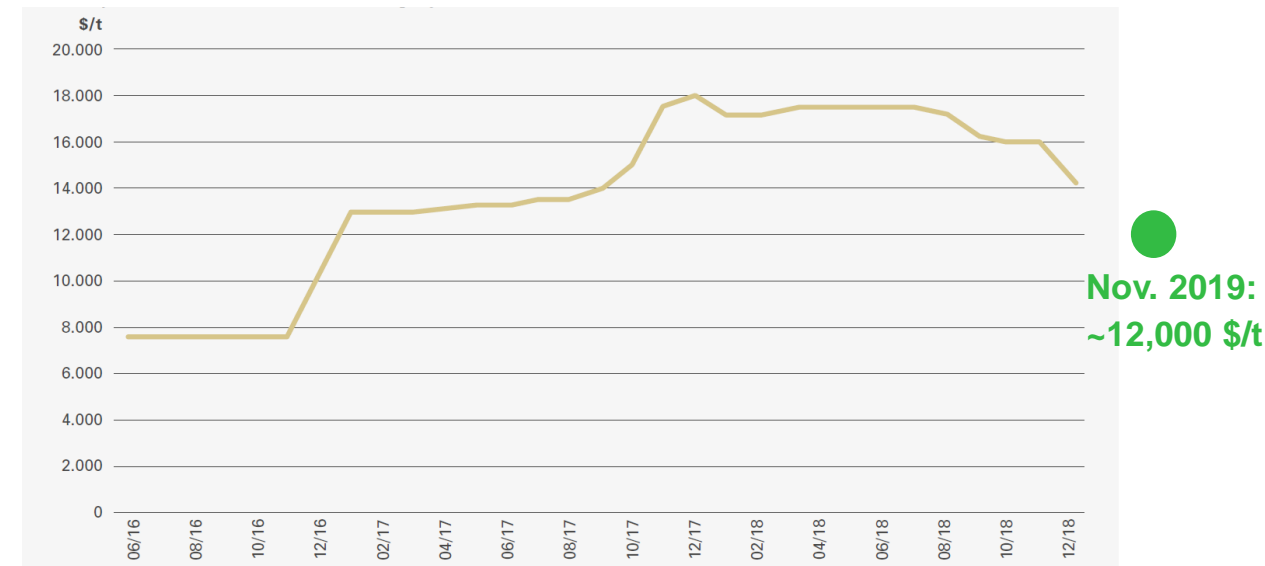
# Preise und Kosten

### Lithiumpreis 1995-2015 (Lithiumcarbonat – $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )



Quelle: USGS (2018): Minerals Information

### Lithiumpreis 2016-2018 (Lithiumcarbonat – $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )



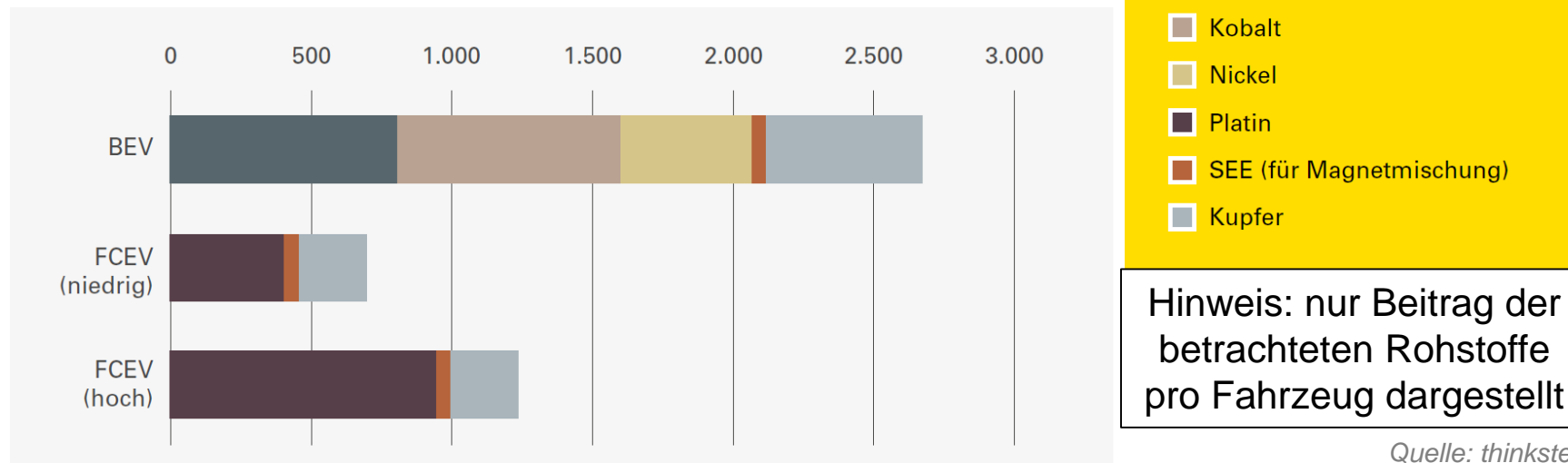
Quelle: BGR (2018): Preismonitor Oktober 2018

Hohe Preisvolatilität

In jüngerer Vergangenheit deutlicher Preisanstieg

Aktuell leicht gefallen

Kostenbeiträge (US-Dollar)



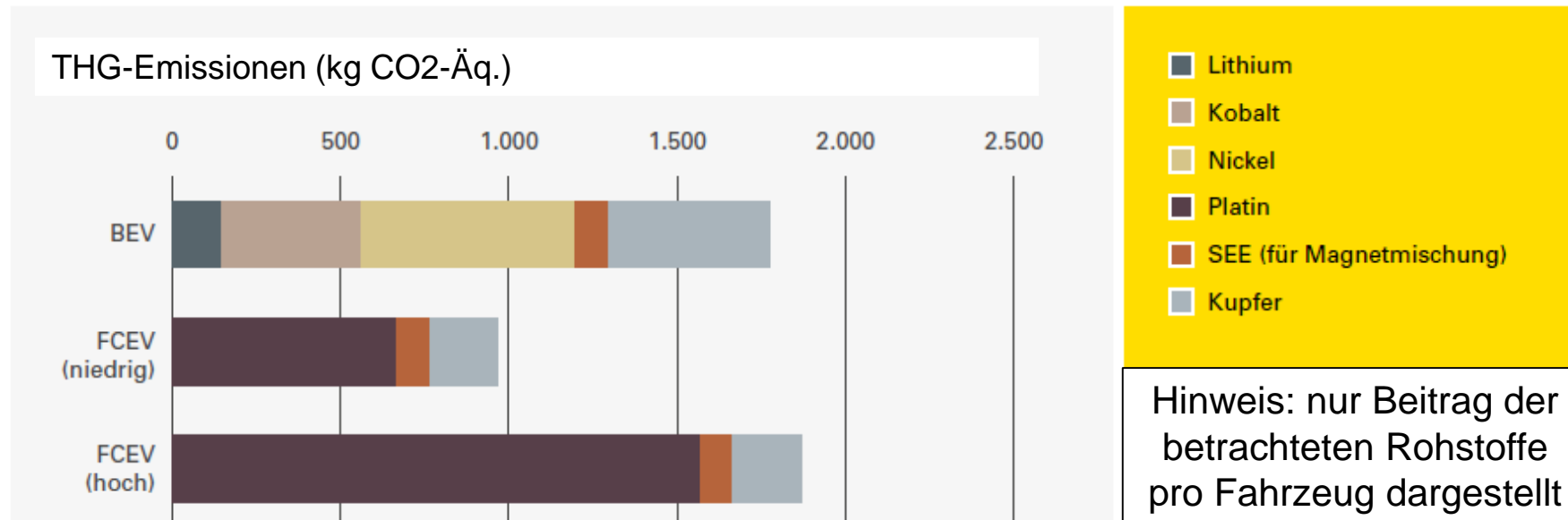
Lithium und Kobalt sind Hauptkostentreiber bei den betrachteten Rohstoffen für BEV

Platin ist Hauptkostenfaktor bei den betrachteten Rohstoffen für FCEV

Seltenerdelement-Anteil unter den Rohstoffkosten gering aufgrund geringer Menge



# Ökologische Betrachtung

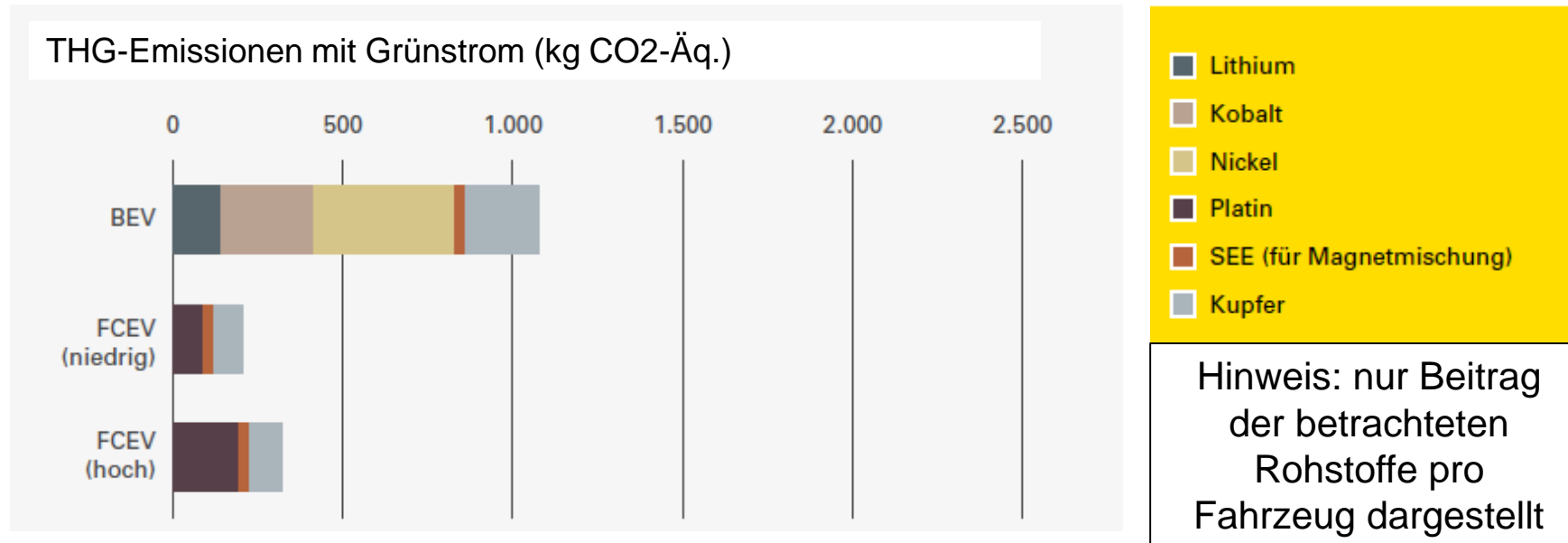


Quelle: thinkstep

Hoher Anteil der THG-Emissionen unter den für BEV betrachteten Rohstoffen auf Kobalt und Nickel zurückzuführen

THG-Anteil aus Platin-Bereitstellung äußerst relevant

Auch der Anteil von Kupfer ist nicht unerheblich (insb. bei BEV)

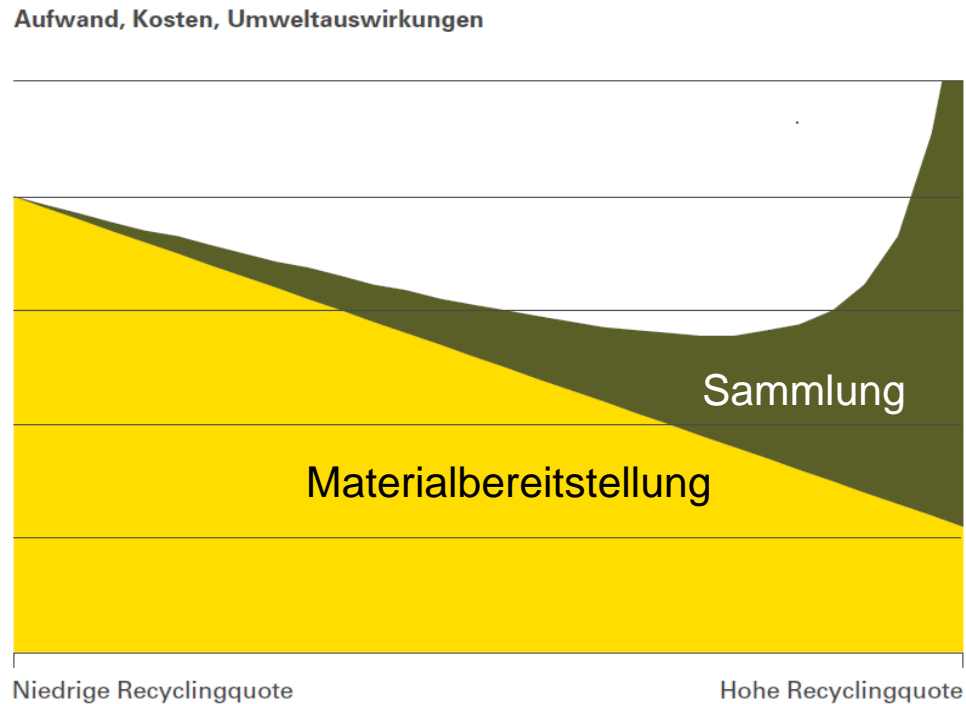


Quelle: thinkstep

- THG-Emissionen von Kobalt, Nickel und Kupfer reduzieren sich bei Verwendung von EE-Strom
- THG-Emissionen reduzieren sich erheblich bei Verwendung von EE-Strom, besonders bei Platin



# Recycling



Quelle: Rankin (2011): Minerals, metals and sustainability

- Aufwände für Materialbereitstellung sinken bei höherer Recyclingquote (mehr Sekundärmaterial)
- Aufwände für Sammlung steigen bei höherer Recyclingquote



Recycling bietet große Potenziale hinsichtlich:

- Reduzierte Kosten
- Reduzierte Umweltauswirkungen
- Reduzierte Importabhängigkeiten

Prozesse zum effizienten Recycling der sechs betrachteten Rohstoffe existieren

Bedarf:

- Aufbau von effizienten und wirtschaftlichen Sammelsystemen
- Aufbau von Kapazitäten zum Batterierecycling
- Aufbau von Kapazitäten zum Brennstoffzellenrecycling
- Aufbau von Kapazitäten zum Recycling von Permanentmagneten



# Ethische Aspekte

# Ethisch-soziale Aspekte

## Betrachtung



### Kobalt

- Kleinbergbau
- Menschenrechtsverletzungen

### Kupfer

- Umweltbelastung
- Gesundheitsgefährdungen

### Lithium

- Wasserverknappung (Lithium aus Sole)
- Indigene Bevölkerung

### Nickel

- Umweltbelastung
- Gesundheitsgefährdungen

### Platin

- Arbeitsbedingungen
- Umweltbelastungen

### SEE

- Transparenz
- Radioaktivität (Thorium)
- Umweltbelastungen
- Gesundheitsgefährdung



# Ethisch-soziale Aspekte

## Initiativen



- Responsible Cobalt Initiative (u.a. BMW, Daimler)
- Responsible Mineral Initiative (u.a. BMW, Daimler, Volkswagen)
- Responsible Steel Initiative (u.a. BMW, Daimler)
- Aluminium Stewardship Initiative (u.a. Audi, BMW, Daimler)
- Drive Sustainability (u.a. BMW, Daimler, Ford, VW, ...)
- Initiative for Responsible Mining Assurance
- ...



# Betrachtungen auf Fahrzeugebene

## Verfügbarkeit für die globale PKW-Flotte

950 Mio. PKW im Jahr 2017 → Annahme: 25% als BEV bzw. FCEV

	Li	Co	Ni	Pt (niedrig)	Pt (hoch)	Nd	Dy	Cu
<b>Gesamtbedarf für 25 % BEV</b>	2,3 Mt	3,4 Mt	10,1 Mt	—	—	119 kt	24 kt	23 Mt
<b>Gesamtbedarf für 25 % FCEV</b>	—	—	—	3,6 kt	8,3 kt	119 kt	24 kt	10 Mt
<b>Wirtschaftlich abbaubare Reserven</b>	14,4 Mt	7,2 Mt	79,2 Mt	37,5 kt <sup>26</sup>	37,5 kt <sup>26</sup>	20,7 Mt <sup>25</sup>	1,5 Mt <sup>25</sup>	720 Mt
<b>Verhältnis bei 25 % BEV</b>	16 %	48 %	13 %	—	—	0,5 %	1,5 %	3 %
<b>Verhältnis bei 25 % FCEV</b>	—	—	—	9,5 %	22 %	0,5 %	1,5 %	1,5 %

Ressourcen sind wiederum deutlich höher

Keine Gefahr der physischen Verknappung zu befürchten





# Betrachtungen auf Fahrzeugebene

## Verfügbarkeit für die globale jährliche PKW-Produktion

73 Mio. PKW prod. im Jahr 2017 → Annahme: 25% als BEV bzw. FCEV

	Li	Co	Ni	Pt (niedrig)	Pt (hoch)	Nd	Dy	Cu
<b>Jährlicher Bedarf für 25 % BEV-Produktion</b>	175 kt	263 kt	774 kt	---	---	9,1 kt	1,8 kt	1,7 Mt
<b>Jährlicher Bedarf für 25 % FCEV-Produktion</b>	---	---	---	275 t	640 t	9,1 kt	1,8 kt	750 kt
<b>Primärförderung 2015<sup>24</sup> (t/a)</b>	32,1 kt	144 kt	2,1 Mt	188 t	188 t	20,6 kt <sup>25</sup>	1,5 kt <sup>25</sup>	18,2 Mt
<b>Verhältnis bei 25 % BEV</b>	545 %	185 %	37,5 %	---	---	45 %	120 %	10 %
<b>Verhältnis bei 25 % FCEV</b>	---	---	---	145 %	340 %	45 %	120 %	5 %

Signifikante Ausweitung des Abbaus einiger Rohstoffe notwendig:  
Li, Co, Pt, SEM





# Handlungsempfehlungen



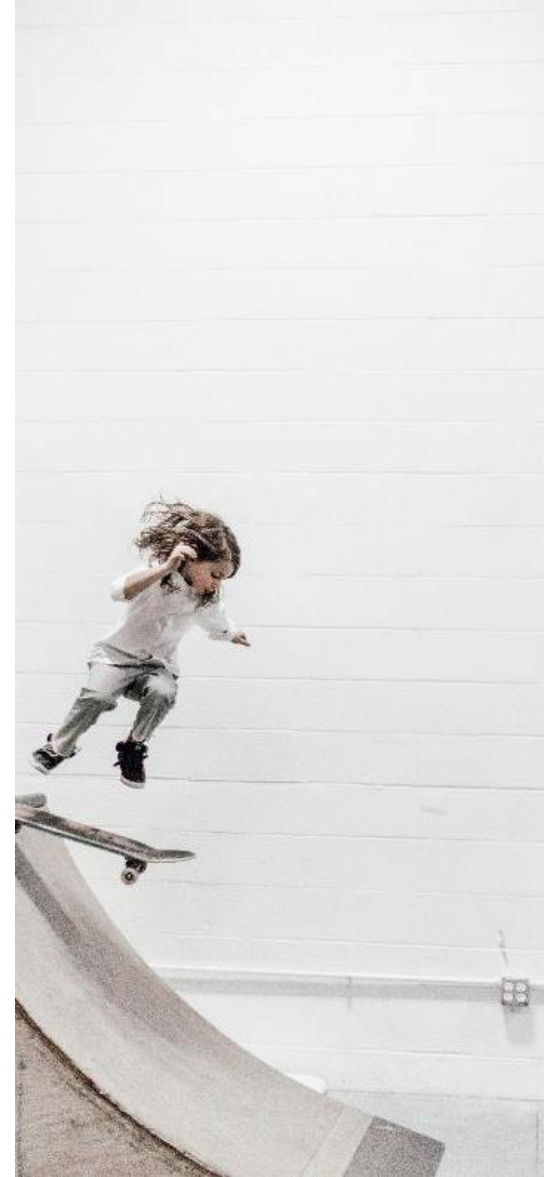
1. Reduktion von Rohstoffabhängigkeiten



2. Kooperation zwischen verarbeitender Industrie und Rohstoffanbietern

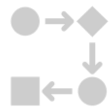


3. Kooperation zwischen verarbeitender Industrie und Recyclingunternehmen





4. Politische Maßnahmen zum Schließen der Stoffkreisläufe



5. Positive Gestaltung der Lieferkette von Primärrohstoffen



6. Ganzheitliche Betrachtung zur Gestaltung des regulatorischen Rahmens



7. Information und gesellschaftliches Bewusstsein





„Batterieelektrische (BEV) und brennstoffzellenelektrische (FCEV) Fahrzeuge sind **die** Lösung für die nachhaltige Verkehrswende.“

### Optimist



„**Wir** sollten die Herausforderungen in Angriff nehmen, um die Technologien wirklich nachhaltig zu machen.“

### Kritischer Realist



“BEV and FCEV sind **keine** Lösung wegen der Probleme, die durch den Rohstoffbedarf bedingt sind.”

### Pessimist





Vielen Dank!

Zeit für weitere Fragen und Austausch



# Backup

# Betrachtungen auf Fahrzeugebene

## Mengengerüste: Materialbedarf pro PKW

	Spezifischer Bedarf	Materialbedarf pro PKW	Quellen
<b>Lithium</b>	120 g/kWh	9,6 kg	(Buchert et al. 2011a; Argonne National Laboratory 2018; Öko-Institut 2016)
<b>Kobalt</b>	180 g/kWh	14,4 kg	(Buchert et al. 2011a; Argonne National Laboratory 2018; Ellingsen et al. 2014; Öko-Institut 2016)
<b>Nickel</b>	530 g/kWh	42,4 kg	(Buchert et al. 2011a; Argonne National Laboratory 2018; Ellingsen et al. 2014; Öko-Institut 2016)
<b>Platin</b>	0,15–0,35g/kWh (niedrig–hoch)	15–35 g (niedrig–hoch)	(Öko-Institut 2016; Wittstock et al. 2016; Öko-Institut 2017; Department of Energy 2017; McKinsey 2010; thinkstep AG 2018b)
<b>Seltenerdelemente</b>	5 g Nd/kWh 1 g Dy/kWh (25 % bzw. 5 % der Magnetmasse)	0,5 kg Nd 0,1 kg Dy	(Buchert et al. 2014; Öko-Institut 2017; Berkel 2013; Widmer et al. 2015; Burres 2016; Adler 2017; Schüler et al. 2011; Reuter 2016; Glöser-Chahoud et al. 2016)
<b>Kupfer in Batteriezellen</b>	650 g/kWh	52 kg	(Buchert et al. 2011a; Argonne National Laboratory 2018; Öko-Institut 2016)
<b>Kupfer im Batteriepack (ohne Zellen)</b>	150 g/kWh	12 kg	(Buchert et al. 2011a)
<b>Kupfer in den Nebenaggregaten der Brennstoffzelle</b>	100 g/kWh	10 kg	(Öko-Institut 2016)
<b>Kupfer im Motor</b>	100 g/kWh	10 kg	(UBS Limited 2017; Reuter 2016)
<b>Kupfer im BEV (mit 80-kWh-Batterie)</b>	---	95 kg	Berechnet auf Basis von (Brandenburg und Torsten 2018), (Lepan 2018)
<b>Kupfer im FCEV (mit 100-kWh-BZ)</b>	---	41 kg	Berechnung mittels der hier dargestellten Angaben

### Annahmen:

- 80 kWh Batteriekapazität (Zelle: Li-NMC 6/2/2)
- Nennleistung von BZ + E-Motor: 100 kW

### Hoher Materialbedarf an Nickel

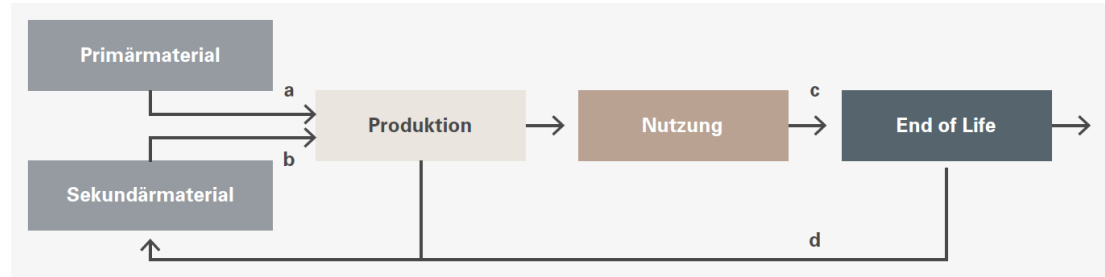
### Bedarf an Platin und SEE pro Fzg. recht gering

### Hoher Bedarf an Kupfer (insb. für BEV: Cu in Batteriezellen, Verkabelung)



# Recycling

## Heutige Recyclingquoten



© eigene Darstellung nach Graedel et al. 2011

Zwei wichtige Größen:

Recycled Content:  $RC = \frac{b}{a+b}$     End of Life Recycling Rate:  $EoL-RR = \frac{d}{c}$

	Recycled Content	EoL Recycling Rate
<b>Lithium</b>	< 1 %	< 1 %
<b>Kobalt</b>	32 %	68 %
<b>Nickel</b>	34 %, 41 %	57 %, 58–63 %, 68 %
<b>Platin</b>	16 %, 25 %, 50 %	76 %, 60–70 %, Fahrzeuge: 50–55 %
<b>SEE (Nd, Dy)</b>	1–10 %	< 1 %
<b>Cu</b>	22 %, 30 %, 37 %	43 %, 53 %

Quellen:  
 UNEP (2011)  
 Johnson Matthey (2018)  
 Nickel Institute (2016)

# Relevant Technologies and Materials

## Relevant Technologies

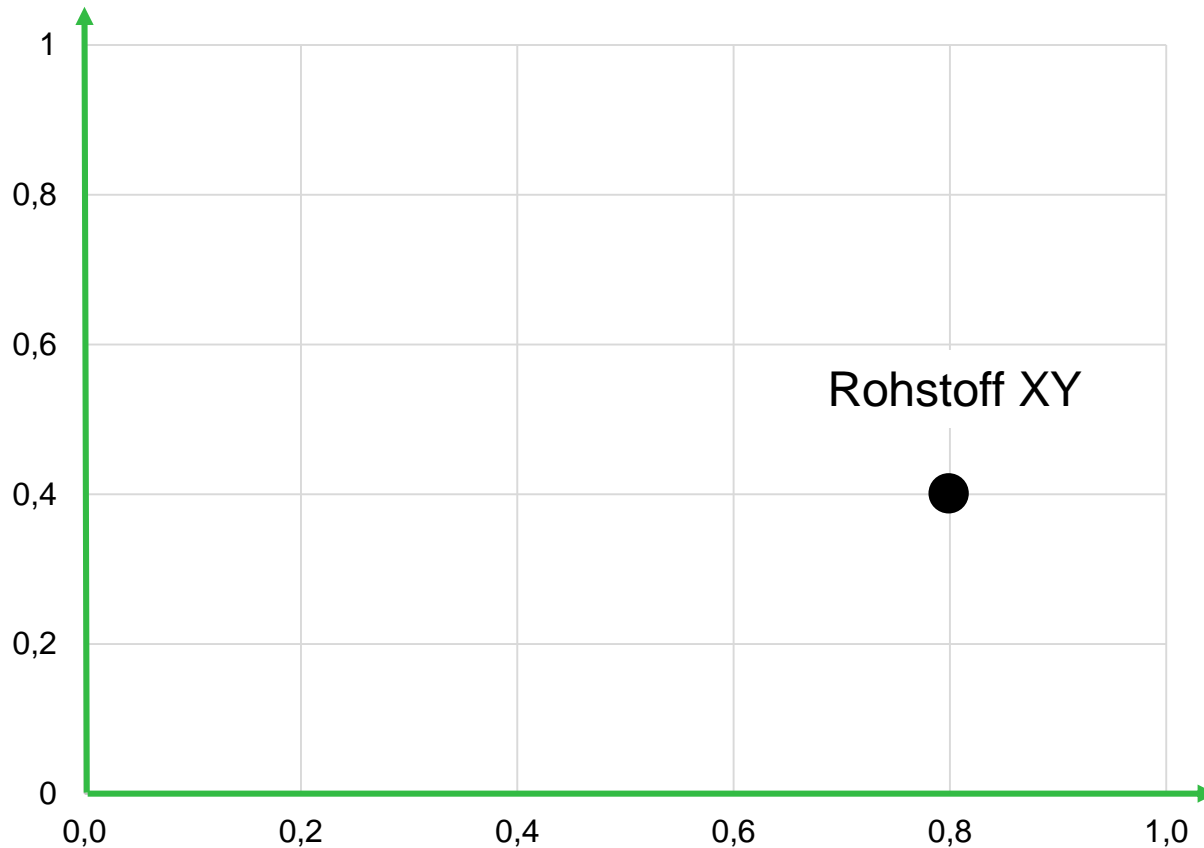
Drive train	Components	Technology
BEV	Traction battery	LiNiMnCoO <sub>2</sub> (NMC) with graphite anode
FCEV	Fuel cell	Proton Exchange Membrane (PEM)
FCEV	Hydrogen storage tank	Typ IV composite tanks
BEV + FCEV	Electric motor	Permanent-magnet synchronous motor (PMSM)
BEV + FCEV	Wire harness	Copper

Confirmed through expert interviews:

- Solid-state battery not before 2030
- PEM-FC with 700 bar pressure tank

# Die Relevanz der Rohstoffe

## Ansatz der Kritikalität



### Versorgungsrisiko: 5 Indikatoren nach VDI 4800

1. Statische Reichweite
  2. Kritische Konzentration der Rohstoffproduktion
  3. Kritische Konzentration der Rohstofflagerstätten
  4. Politisches Länderrisiko
  5. Regulatorisches Länderrisiko
- Herfindahl-Hirschman-Index (HHI)
- Worldwide Governance Indicator (Weltbank)



### Folgeschwere: Experten-Interviews

1. Technische Auswirkungen
2. Ökonomische Auswirkungen

1,0 – essenziell

0,3 – wichtig

0,7 – sehr wichtig

0,0 – gering

	Recycled Content	EoL Recycling Rate
<b>Lithium</b>	< 1 %	< 1 %
<b>Kobalt</b>	32 %	68 %
<b>Nickel</b>	34 %, 41 %	57 %, 58–63 %, 68 %
<b>Platin</b>	16 %, 25 %, 50 %	76 %, 60–70 %, Fahrzeuge: 50–55 %
<b>SEE (Nd, Dy)</b>	1–10 %	< 1 %
<b>Cu</b>	22 %, 30 %, 37 %	43 %, 53 %

© Graedel et al. 2011, Johnson Matthey 2018; Nickel Institute 2016a

Tabelle 8-1: Darstellung globaler Werte (nach verschiedenen Quellen) für Recycled Content und EoL Recycling Rate für die als kritisch identifizierten Rohstoffe aus heutiger globaler Perspektive