

# **Elektromobilität und die große Transformation**

**Wolfgang Liebert**

**Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften (ISR) BOKU**

„Elektromobilität auf dem Prüfstand“

BOKU-Energiecluster

4. Juni 2019

## E-Mobilität generell

### „Offensichtliche“ Vorteile:

- sehr hoher Wirkungsgrad / viel weniger Energiebedarf bei Nutzung als bislang
- Bedarf an erneuerbarem Strom maßvoll (machbar?)
- Erweiterung der Möglichkeiten zur Reduktion von THG im Verkehrsbereich

Österreich: Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verkehr seit 1990: um 2/3  
Verkehr 2.-größter Verursacher (2016: 23 Mt CO<sub>2</sub>-äq.)

→ hohe Dringlichkeit

### **ABER:**

- Gesamtwirkungen und
- Gesamtfolgen in den Blick bekommen und im Blick halten

→ Technikfolgenabschätzung (TA) unter Einschluss von Ökobilanzen/LCA

Wichtig: globale Perspektive einnehmen

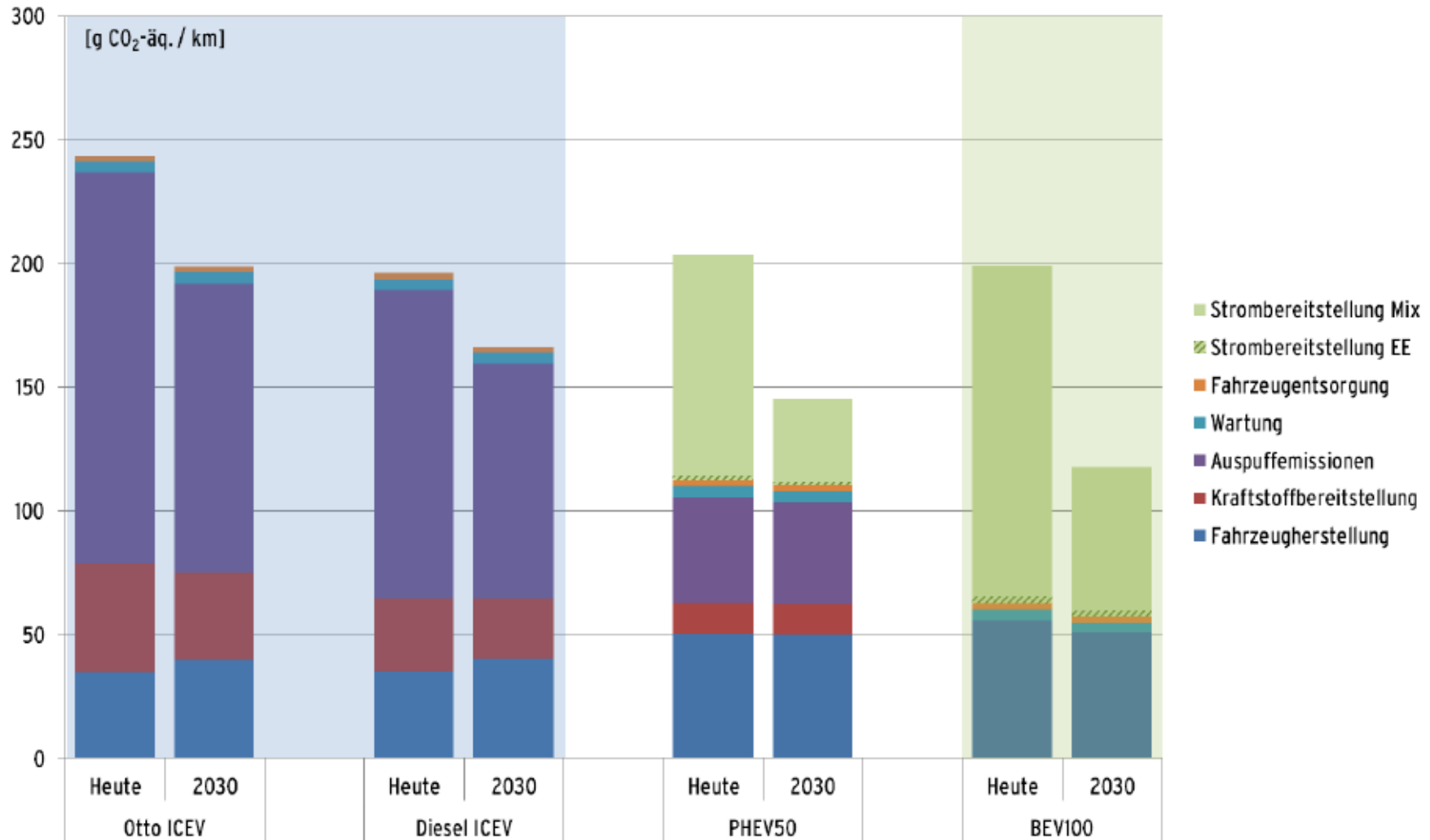
## Viele Studien in den letzten Jahren zur Thematik:

- Umweltbundesamt (UBA) Wien
- Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) Heidelberg
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Stuttgart & Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt und Energie
- Umwelt- und Prognose-Institut (UPI) Heidelberg
- European Academies - Science Advisory Council
- Öko-Institut Freiburg/Darmstadt
- Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) Berlin
- ...

... einige exemplarische Punkte ansprechen:

- THG-Bilanz
- Material-/Ressourcenbedarf
- Materialgewinnung & Folgen

# Treibhausgasemissionen [g CO<sub>2</sub>-äq.] pro gefahrenen Kilometer für PKWs: Benziner, Diesel, Plug-in-Hybrid, Elektro-Mobil (heute bzw. 2030) (Beiträge: Herstellung, Kraftstoff, Emissionen, Stromqualität, etc.)



Quelle: Helmes et al. (IFEU Heidelberg): Weiterentwicklung u. vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Endbericht für Umweltforschungsplan d. Bundesministeriums für Umwelt etc. August 2015

## Treibhausgasemissionen II

- E-Autos und Hybrid-Autos haben einen relevanten THG/CO<sub>2</sub>-Rucksack durch die Herstellung (insbesondere wg. Motor und Batterie)
- E-Mobile sind nur von Vorteil, wenn Strom aus erneuerbaren Quellen verfügbar ist

Vergleich Kompakt-PKW (~ Golf) E-PKW und aktueller Benziner:

- E-PKW unter Annahme von 100% Windstrom-Nutzung muss 40.000 km fahren bis er Vorteile gegenüber Benziner heraus fährt
- E-PKW unter Annahme österreichischer Strom-Mix muss noch einige 1000 km mehr fahren bis er Vorteile gegenüber Benziner heraus fährt

Die Vorteile von E-Mobilen können aufgeessen werden

- durch steigende Gesamt-Anzahl von Kfz
- durch zu langsame oder unvollständige Stromwende

Alle Szenarien mit Teilumstellung PKW auf E und/oder mit Teilumstellung Stromerzeugung erreichen nicht das klimapolitische Ziel

... man könnte auch reden über:

- Wasserverbrauch (~ 1 l /km)
- Feinstaub
- Flächenbedarf etc.

## Gegenwärtige Wachstumsdynamik im Kfz-Bereich global

Weltweit zugelassen

PKW: > 1 Milliarde

LKW/Busse: > 350 Millionen

Derzeitige Jahresproduktion:

PKW: ~ 80 Millionen

LKW/Busse: ~ 40 Millionen

Kfz/ 1000 Einwohner:

USA 830

W-Europa 600

O-Europa 360

M/S-Amerika 175

China >100 ↗

Afrika 40

Indien 36 ↗

ISR-Zukunftsszenarien PKW weltweit (2050):

TREND: plus 2,5%/a → 2,1 Mrd. PKW (2050)

SLOW: plus ~ 1 %/a → 1,4 Mrd. PKW (2050)

REDUKTION: minus ~ 1 %/a → 0,7 Mrd. PKW (2050)

## Materialbedarf für E-PKWs

Große Anzahl wesentlicher Materialien für E-PKWs:  
darunter auch Eisen, Seltene Erden (insbes. f. Permanentmagnete), etc.

Generell mehr Materialbedarf als bei Verbrennungsmotor-PKW  
(insbes. Motor und Batterie)

Konkretion schwierig:

- große Abweichungen bei Mengenangaben in der Literatur (auch: Modellvarianten)
- viele Akku-Varianten (inklusive Größe) je nach Modell (und Reichweiten)

## Materialbedarf (in Auswahl) für E-PKW mit begrenzter Reichweite (~ E-Golf)

	Bedarf f. kleinere n E-PKW	Bedarf f. 5 Mio. (Jahres- produkt. 2020 ?)	Bedarf f. 50 Mio. (Jahres- produkt. 2030 ?)	Bedarf f. 2 Mrd. (Gesamt- flotte 2050 ?)
Aluminium	115 kg	0,6 Mio t	6 Mio t	240 Mio t
Kupfer	115 kg	0,6 Mio t	6 Mio t	240 Mio t
Nickel	105 kg	0,5 Mio t	5 Mio t	200 Mio t
Lithium	10 kg	50.000 t	0,5 Mio t	20 Mio t
Kobalt	4 kg	20.000 t	0,2 Mio t	8 Mio t
Molybdän	2 kg	10.000 t	0,1 Mio t	4 Mio t
.....				

Quelle: IFEU 2015 u.a.



**Materialbedarf (in Auswahl) für E-PKW  
mit begrenzter Reichweite (~ E-Golf)**

**im Vergleich mit Minenproduktion 2018,  
Reserven (2019), Ressourcen (2019)**

	Bedarf f. kleinere n E-PKW	Bedarf f. 5 Mio. (Jahres- produkt. 2020 ?)	Bedarf f. 50 Mio. (Jahres- produkt. 2030 ?)	Bedarf f. 2 Mrd. (Gesamt- flotte 2050 ?)	Minen- Produkt. 2018	Reserven 2019	Ressour- cen 2019
Aluminium	115 kg	0,6 Mio t	6 Mio t	240 Mio t	60 Mio t	> 55 Mrd t	
Kupfer	115 kg	0,6 Mio t	6 Mio t	240 Mio t	21 Mio t	830 Mio t	> 5 Mrd t
Nickel	105 kg	0,5 Mio t	5 Mio t	200 Mio t	2,3 Mio t	89 Mio t	130 Mio t
Lithium	10 kg	50.000 t	0,5 Mio t	20 Mio t	85.000 t	14 Mio t	62 Mio t
Kobalt	4 kg	20.000 t	0,2 Mio t	8 Mio t	140.000 t	6,9 Mio t	25 Mio t
Molybdän	2 kg	10.000 t	0,1 Mio t	4 Mio t	300.000 t	17 Mio t	25 Mio t
.....							

Quelle: IFEU 2015 u.a.

Quelle: USGS 2019

## Materialbedarf (in Auswahl) für E-PKW mit begrenzter Reichweite (~ E-Golf)

im Vergleich mit **Minenproduktion 2018**,  
**Reserven (2019)**, **Ressourcen (2019)**

	Bedarf f. kleinere E-PKW	Bedarf f. 5 Mio. (Jahresprodukt. 2020 ?)	Bedarf f. 50 Mio. (Jahresprodukt. 2030 ?)	Bedarf f. 2 Mrd. (Gesamtflotte 2050 ?)	Minen-Produkt. 2018	Reserven 2019	Ressourcen 2019
Aluminium	115 kg	0,6 Mio t	6 Mio t	240 Mio t	60 Mio t	> 55 Mrd t	
Kupfer	115 kg	0,6 Mio t	6 Mio t	240 Mio t	21 Mio t	830 Mio t	> 5 Mrd t
Nickel	105 kg	0,5 Mio t	5 Mio t	200 Mio t	2,3 Mio t	89 Mio t	130 Mio t
Lithium	10 kg	50.000 t	0,5 Mio t	20 Mio t	85.000 t	14 Mio t	62 Mio t
Kobalt	4 kg	20.000 t	0,2 Mio t	8 Mio t	140.000 t	6,9 Mio t	25 Mio t
Molybdän	2 kg	10.000 t	0,1 Mio t	4 Mio t	300.000 t	17 Mio t	25 Mio t
.....							

In einigen Fällen: großer Anteil heute bekannter Reserven  
(oder mehr als das) fährt 2050 in PKWs herum  
Die LKW- und Bus-Flotten sind hier nicht berücksichtigt !

## Materialbedarf (in Auswahl) für E-PKW mit begrenzter Reichweite (~ E-Golf)

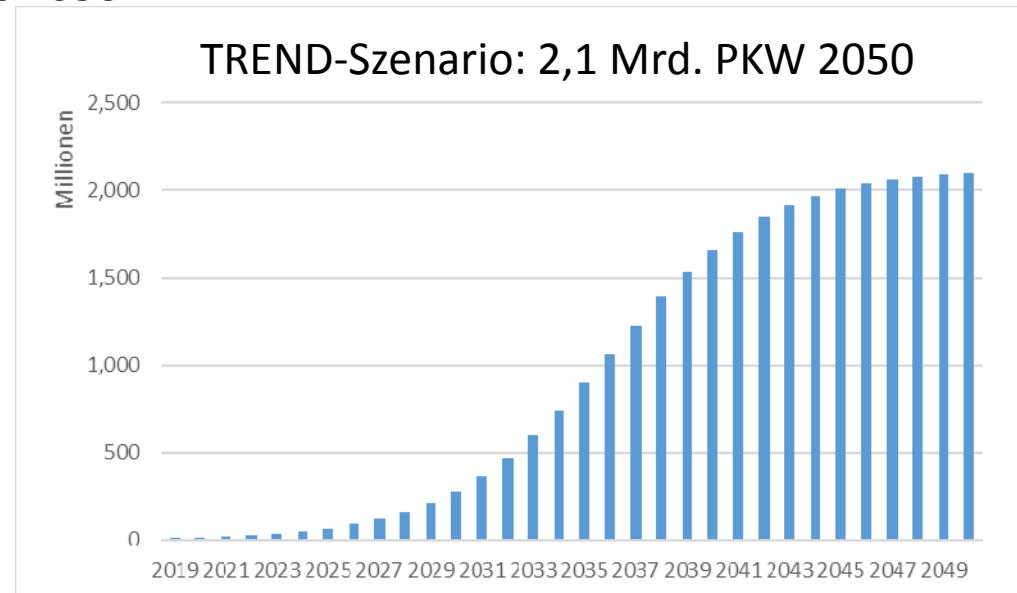
im Vergleich mit **Minenproduktion 2018**,  
**Reserven (2019)**, **Ressourcen (2019)**

	Bedarf f. kleinere E-PKW	Bedarf f. 5 Mio. (Jahresprodukt. 2020 ?)	Bedarf f. 50 Mio. (Jahresprodukt. 2030 ?)	Bedarf f. 2 Mrd. (Gesamtflotte 2050 ?)	Minen-Produkt. 2018	Reserven 2019	Ressourcen 2019
Aluminium	115 kg	0,6 Mio t	6 Mio t	240 Mio t	60 Mio t	> 55 Mrd t	
Kupfer	115 kg	0,6 Mio t	6 Mio t	240 Mio t	21 Mio t	830 Mio t	> 5 Mrd t
Nickel	105 kg	0,5 Mio t	5 Mio t	200 Mio t	2,3 Mio t	89 Mio t	130 Mio t
Lithium	10 kg	50.000 t	0,5 Mio t	20 Mio t	85.000 t	14 Mio t	62 Mio t
Kobalt	4 kg	20.000 t	0,2 Mio t	8 Mio t	140.000 t	6,9 Mio t	25 Mio t
Molybdän	2 kg	10.000 t	0,1 Mio t	4 Mio t	300.000 t	17 Mio t	25 Mio t
.....							

- Nachfrage nach einigen Mineralen wird stark steigen
- Stimulierung von Ressourcenabbau
- neue Ressourcenabhängigkeiten (z.B. „Länderkonzentration“ & „Länderrisiko“ hoch bei Co, SE)
- kein Bruch mit dem Ressourcen hunger der Vergangenheit
- Risiko des „Show Stoppers“

## ISR-Szenario-/Simulations-Annahmen: Lithium für E-Mobilität (nur PKW)

- sigmoider Zuwachs an e-mobilen PKW bis **2050**
- 10 Jahre Batterienutzung im PKW
- Lithium-Bedarf:
  - 10 kg Li für Akku E-PKW
  - 5 kg Li für Akku Hybrid-PKW
  - andere globale Li-Bedarfe leicht steigend
- 2 Zielpfade für 2050:
  - 50% / 50% E-PKWs / Hybrid-PKWs
  - 100 % E-PKWs
- 2 Recycling-Varianten:
  - SCHWACH: Start 2031 mit 1% → 2050: 30%
  - ENGAGIERT: Start 2031 mit 25% → 2050: 75%

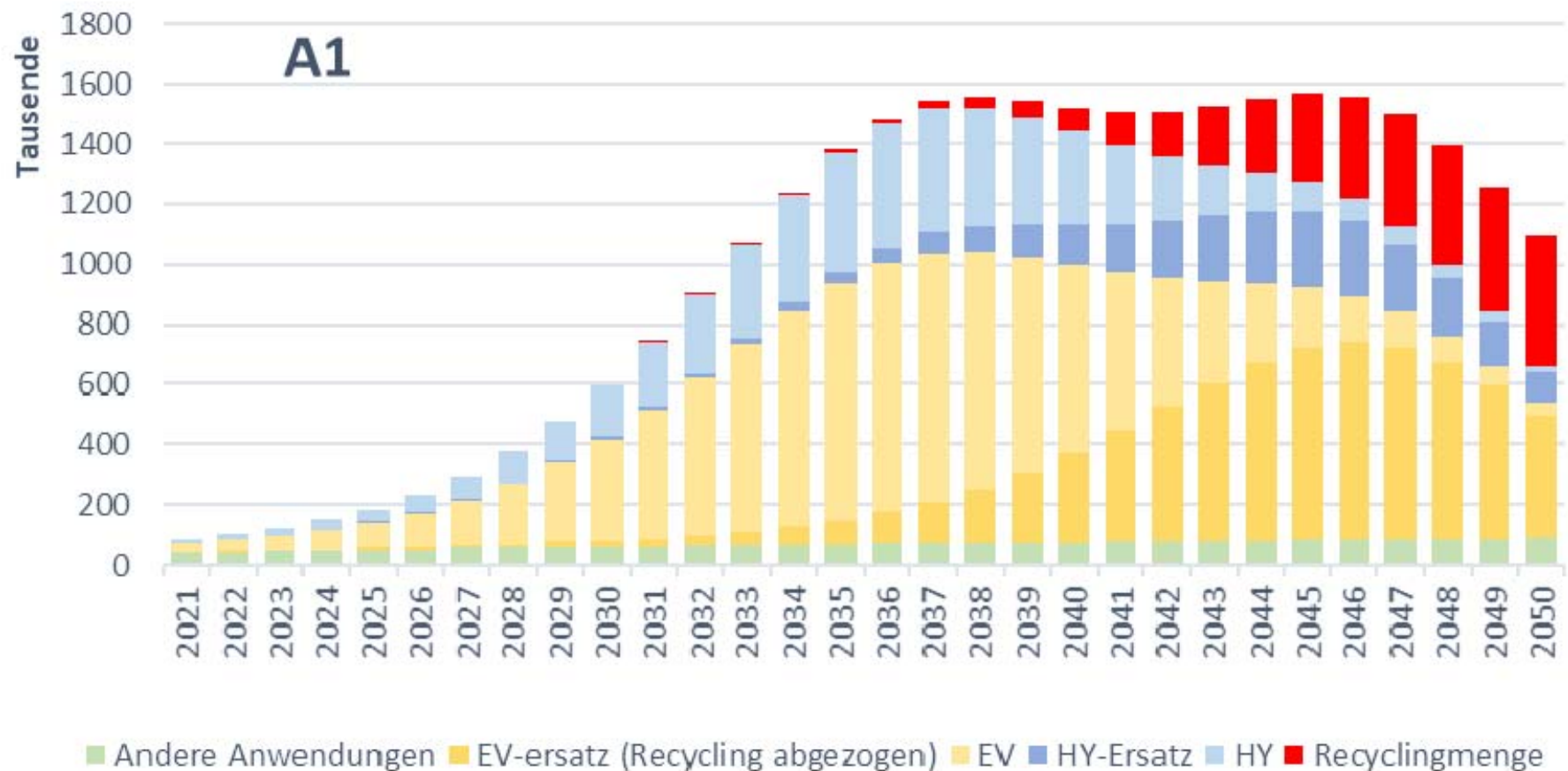


Gegenwärtig: > 1 Mrd. PKW (> 350 Mio. LKW/Busse)  
TREND: plus 2,5%/a → 2,1 Mrd. PKW (2050)  
SLOW: plus ~ 1 %/a → 1,4 Mrd. PKW (2050)  
REDUKTION: minus ~ 1 %/a → 0,7 Mrd. PKW (2050)

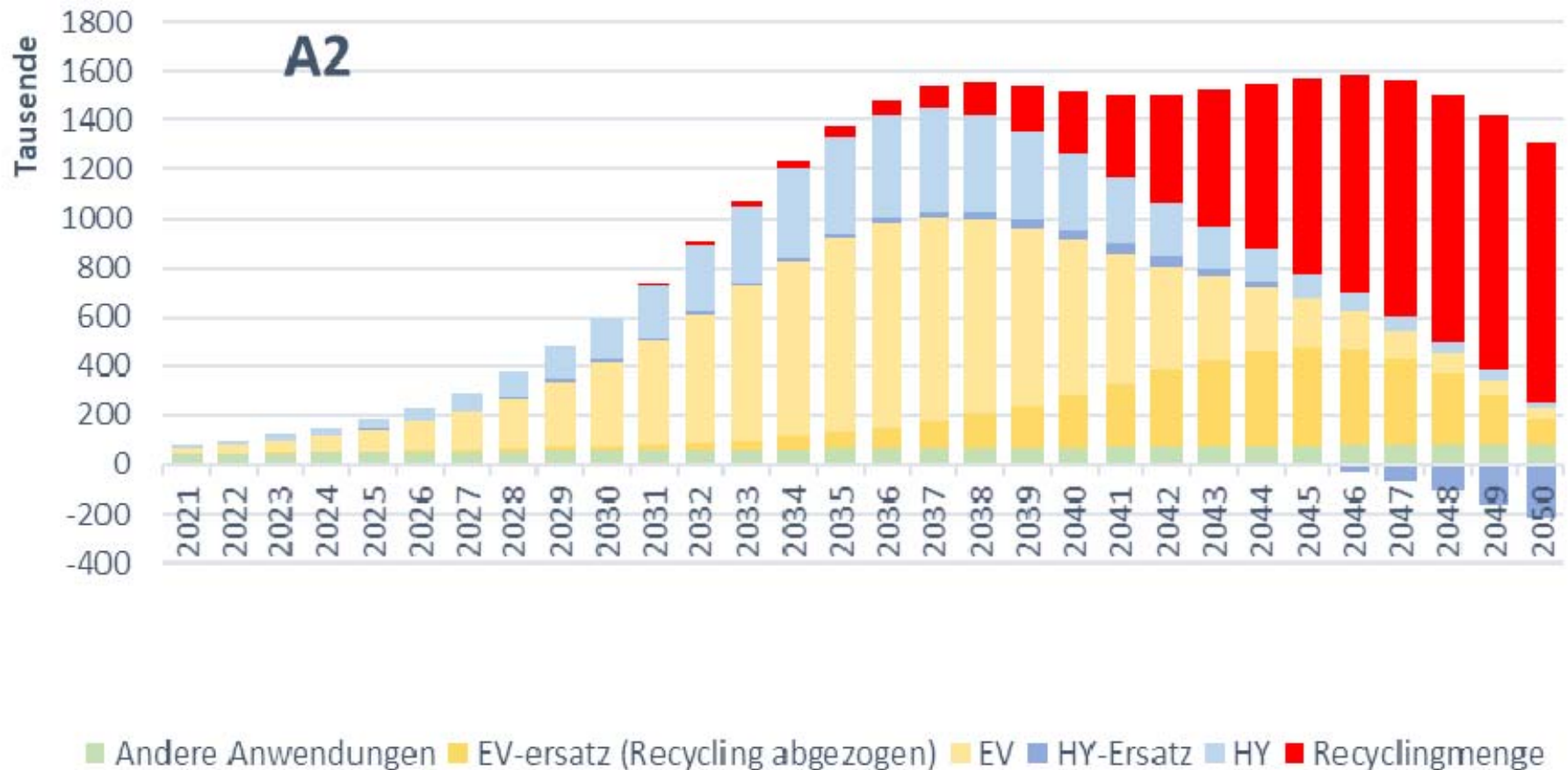
### Recycling:

Ni, Cu, Co aus Batterien:  
➤ 50 % gelingt bereits  
Lithium:  
in den Kinderschuhen  
& nicht wirtschaftlich

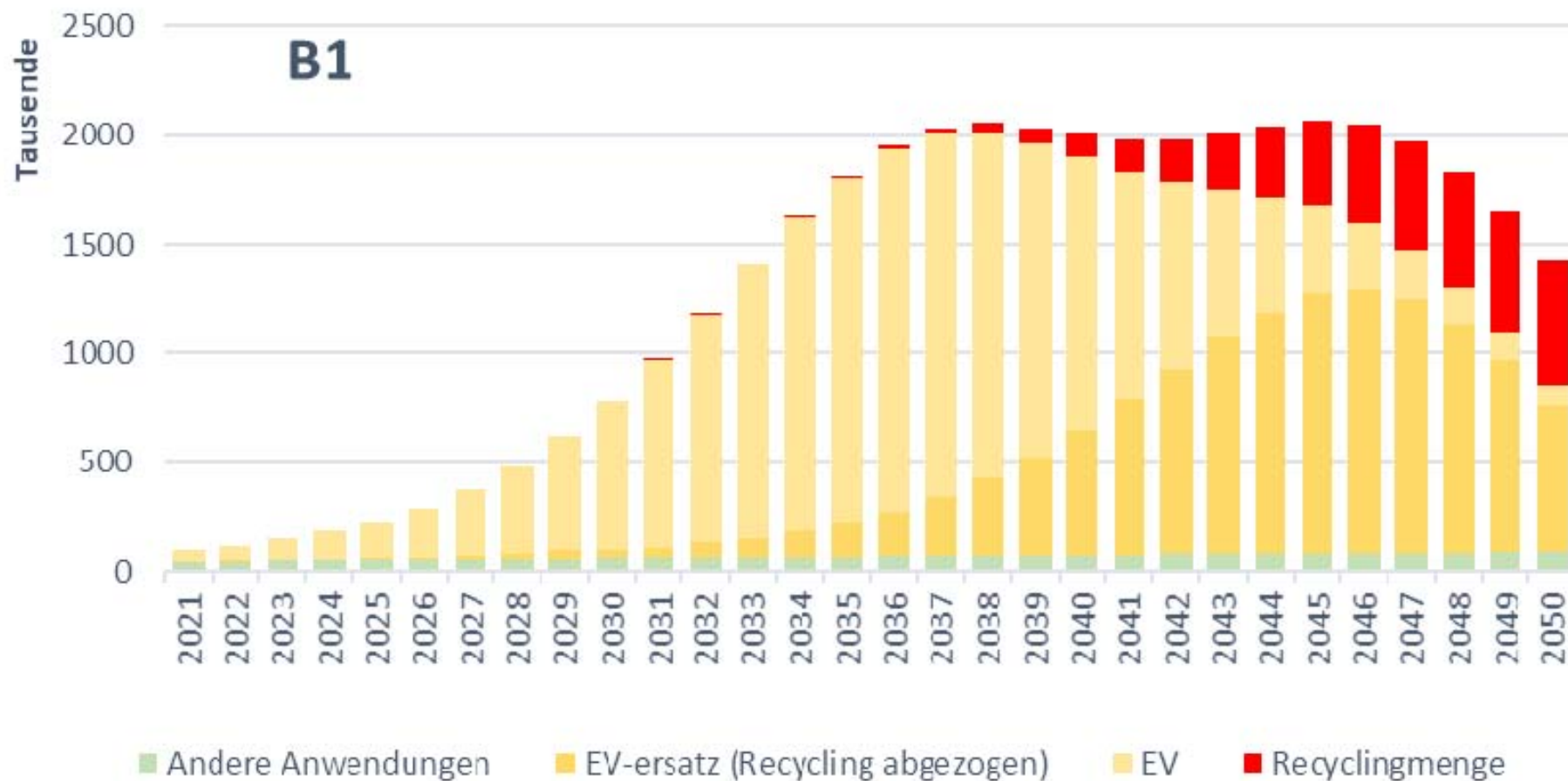
**LITHIUM-Bedarf [kt] im TREND-Szenario (2,1 Mrd. PKW 2050)  
50% E-PKW / 50% Hybrid-PKW  
„Schwaches“ Recycling**



**LITHIUM-Bedarf [kt] im TREND-Szenario (2,1 Mrd. PKW 2050)**  
**50% E-PKW / 50% Hybrid-PKW**  
**„Engagiertes“ Recycling**

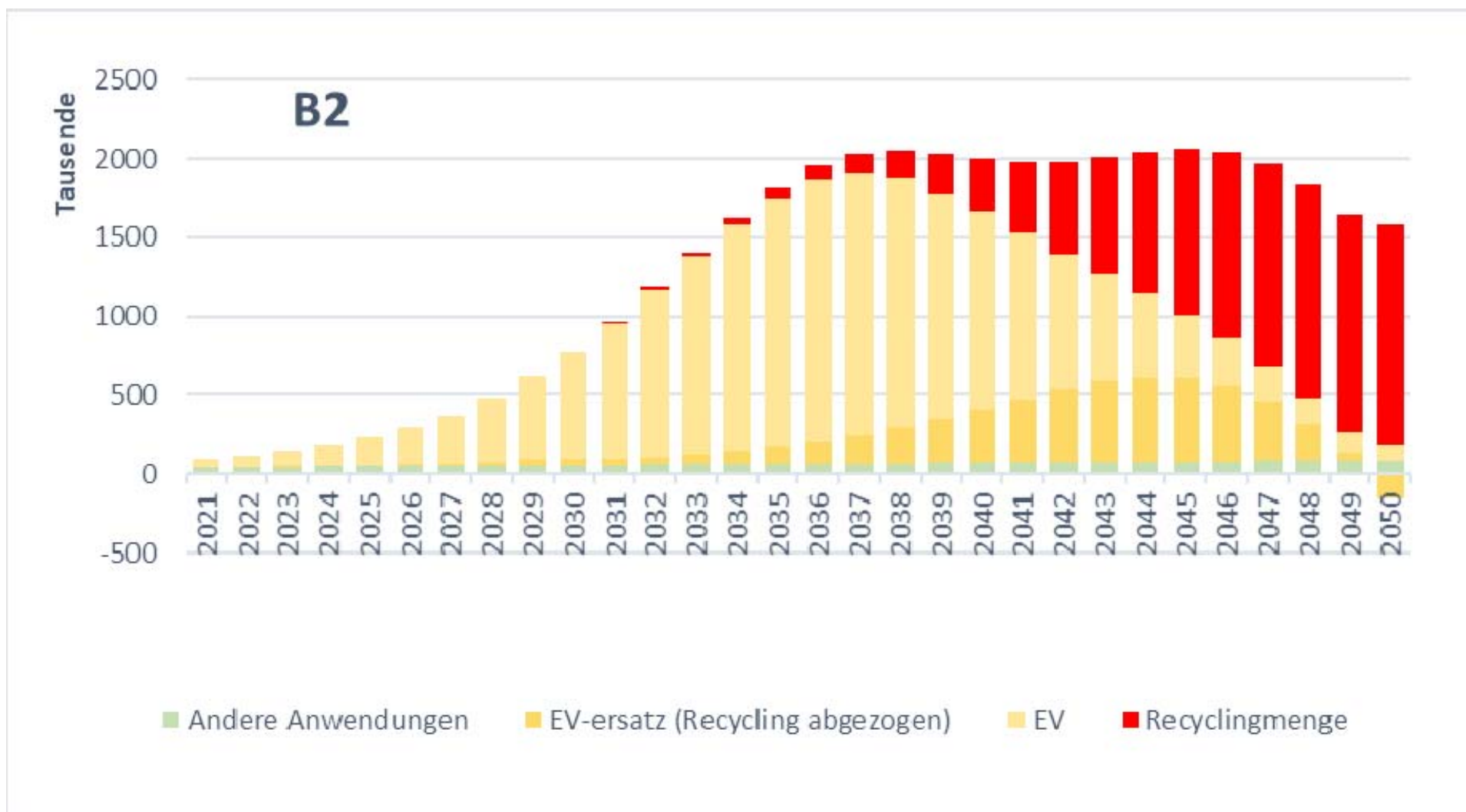


# LITHIUM-Bedarf [kt] im TREND-Szenario (2,1 Mrd. PKW 2050) 100% E-PKWs „Schwach“ Recycling





# LITHIUM-Bedarf [kt] im TREND-Szenario (2,1 Mrd. PKW 2050) 100% E-PKW „Engagiertes“ Recycling





## TREND-Szenario: 2,1 Milliarden PKW 2050

Szenario 2,1 Mrd PKW 2050	Grad E-Mobilität	Recycling / Sekundär- lithium	Li-Bedarf gesamt 2021 -2050	davon sekund. Li (Recycling)	Primärer Jahresbedarf in 10 Jahren	Maximaler primärer Jahresbedarf
A1	50/50 E/Hybrid	SCHWACH (1% → 30%)	28 Mio t	3,2 Mio t	600 kt	2037: 1,5 Mio t
A2	50/50 E/Hybrid	ENGAGIERT (25% → 75%)	28 Mio t	8,6 Mio t	600 kt	2037: 1,45 Mio t
B1	100 % E	SCHWACH (1% → 30%)	37,4 Mio t	4,2 Mio t	750 kt	2038: 2 Mio t
B2	100 % E	ENGAGIERT (25% → 75%)	37,4 Mio t	11,5 Mio t	750 kt	2037: 1,85 Mio t

Reserven: 14 Mio t  
Ressourcen: 62 Mio t

Jahresproduktion  
2018: 85 kt

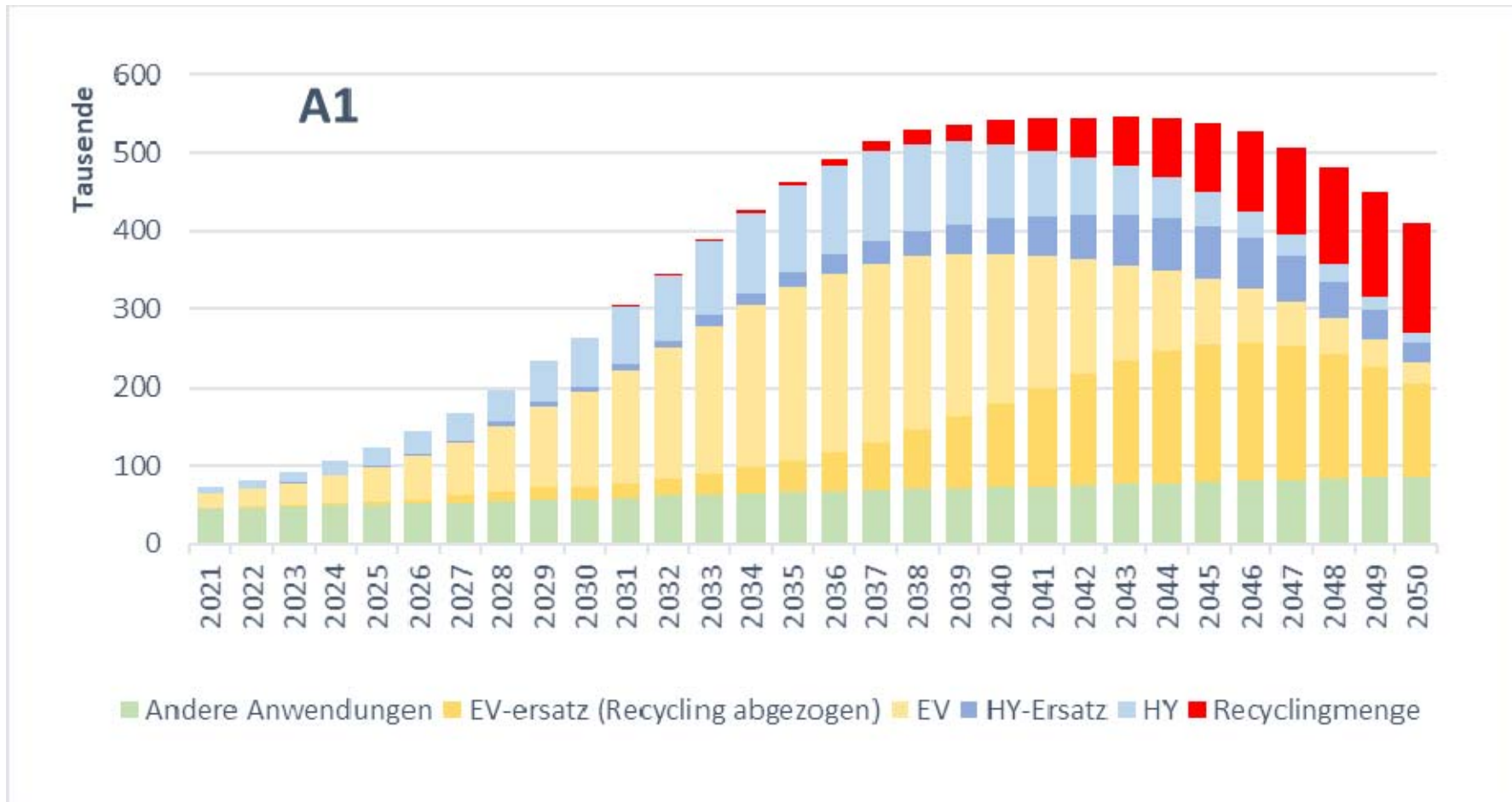
## SLOW-Szenario: 1,4 Milliarden PKW 2050

Szenario 1,4 Mrd PKW 2050	Grad E-Mobilität	Recycling / Sekundär- lithium	Li-Bedarf gesamt 2021 -2050	davon sekund. Li (Recycling)	Primärer Jahresbedarf in 10 Jahren	Maximaler primärer Jahresbedarf
A1	50/50 E/Hybrid	SCHWACH (1% → 30%)	18,6 Mio t	2,1 Mio t	420 kt	2038: 1,0 Mio t
A2	50/50 E/Hybrid	ENGAGIERT (25% → 75%)	18,6 Mio t	5,7 Mio t	420 kt	2037: 0,95 Mio t
B1	100 % E	SCHWACH (1% → 30%)	24,8 Mio t	2,8 Mio t	700 kt	2038: 1,3 Mio t
B2	100 % E	ENGAGIERT (25% → 75%)	24,8 Mio t	7,6 Mio t	700 kt	2037: 1,2 Mio t

Reserven: 14 Mio t  
Ressourcen: 62 Mio t

Jahresproduktion  
2018: 85 kt

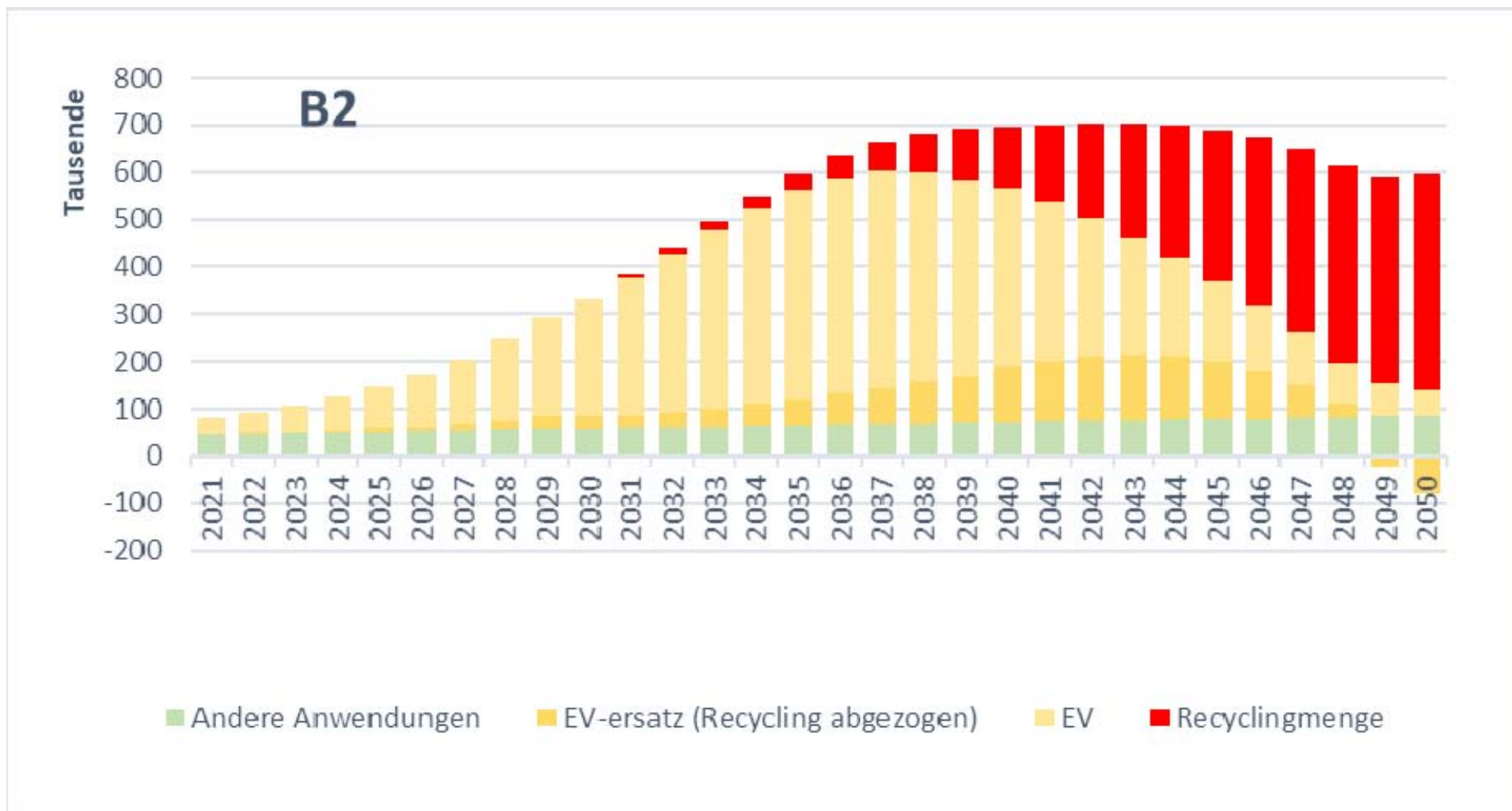
**LITHIUM-Bedarf [kt] im REDUKTION-Szenario (700 Mio. PKW 2050)  
 50% E-PKW / 50% Hybrid-PKW  
 „Schwachere“ Recycling**



# LITHIUM-Bedarf [kt] im REDUKTION-Szenario (700 Mio. PKW 2050)

## 100% E-PKW

### „Engagiertes“ Recycling



## REDUKTION-Szenario: 700 Millionen PKW 2050

Szenario 0,7 Mrd PKW 2050	Grad E-Mobilität	Recycling / Sekundär- lithium	Li-Bedarf gesamt 2021 -2050	davon sekund. Li (Recycling)	Primärer Jahresbedarf in 12 Jahren	Maximaler primärer Jahresbedarf
A1	50/50 E/Hybrid	SCHWACH (1% → 30%)	9,1 Mio t	1,0 Mio t	300 kt	2039: 510 kt
A2	50/50 E/Hybrid	ENGAGIERT (25% → 75%)	9,1 Mio t	2,8 Mio t	300 kt	2037: 470 kt
B1	100 % E	SCHWACH (1% → 30%)	12,2 Mio t	1,4 Mio t	380 kt	2039: 660 kt
B2	100 % E	ENGAGIERT (25% → 75%)	12,2 Mio t	3,8 Mio t	380 kt	2037: 600 kt

Reserven: 14 Mio t      Jahresproduktion  
 Ressourcen: 62 Mio t      2018: 85 kt

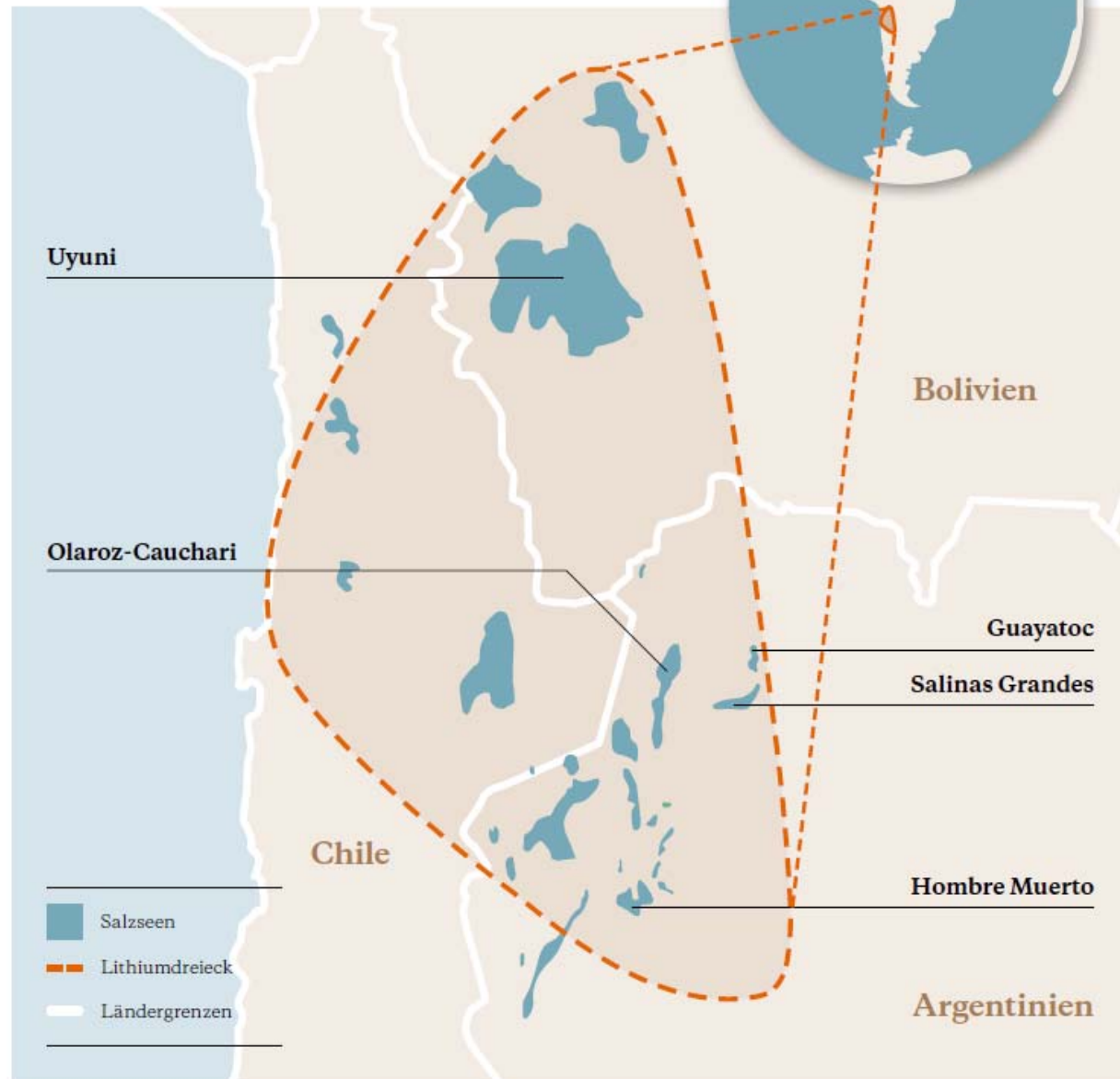
Auch hier: größter Teil heute bekannten Reserven fahren 2050 in PKW herum  
 (LKW- und Bus-Flotte nicht berücksichtigt)

Szenario zeigt wohin die „Reise“ gehen muss:

Bei PKW-Anstieg in z.B. China und Indien deutliche Reduktion in Industriestaaten

## Lithiumdreieck

Hauptabbaugebiete in den Ländern Argentinien, Bolivien und Chile.



## Lithium-Gewinnung

Ressourcen-Vorkommen:

- ~ 60% in kontinentalen Solen / Salzseen (insbes. Dreiländereck Argentinien, Bolivien, Chile)
- ~ 25% in best. Gesteinsformen (wie Spodumen)

Abbau aus Solen „leicht“ möglich (ähnlich anderen Salz-Salinen)

ABER:

Chemikalieneinsatz tritt hinzu (wg. Mg, B, Sulfat)

Wasserverdunstung:

~ 2 Mio. l pro t Lithium

Quelle: Brot für die Welt, Das weiße Gold. Umwelt- und Sozialkonflikte um den Zukunftsrohstoff Lithium, Okt. 2018

## Lithium-Gewinnung

$\frac{3}{4}$  der Weltproduktion durch Australien und Chile (Arg. 13%, China 7%, ...)

2017 gingen etwa 40.000 t in Keramiken, Glas, Schmierstoffe und kleine Elektronik-Akkus

### Umwelt- und Sozial-Folgen (Beispiel Lithium-Dreieck)

- Grundwasserspiegel sinkt ab (Quellen versiegen wie in Chile beobachtet)
- Vegetation vertrocknet, Böden versalzen
- endemische Vogelarten sterben aus (Flamingos, Kamelarten,...)
- traditionelle Lebensweisen Indigener bedroht (Land- u. Viehwirtschaft, Salzgewinnung)
- Konflikte mit Indigenen (Beteiligung an Planung, Arbeit, Gewinn?)

Quelle (Umwelt- und Sozialfolgen):

Brot für die Welt:

Das weiße Gold. Umwelt und Sozialkonflikte um den Zukunftrohstoff Lithium  
Analyse 84, Okt. 2018 (30 Seiten)

[https://info.brot-fuer-die-welt.de/sites/default/files/blog-downloads/bfdw\\_analyse\\_lithium-broschuere\\_report.pdf](https://info.brot-fuer-die-welt.de/sites/default/files/blog-downloads/bfdw_analyse_lithium-broschuere_report.pdf)

## Perspektiven

- Dies spricht nicht gegen E-Mobile als solche, aber gegen die Illusionen, die damit verbunden werden.
- Einbettung in die Verkehrswende insgesamt dringlich (**GROSSE TRANSFORMATION !**)
- Einbettung in die GROSSE TRANSFORMATION (Klima, Energie, Ressourcen, Kreisläufe, Innovation, Produktionssystem, Lebensweisen, etc.) unverzichtbar
- **Technikgestaltung** ist wichtig:
  - Reduktion bzw. Substitution von Materialbedarfen
  - Recyclingfähigkeit von Beginn an
  - Realisierung von effektivem Recycling ermöglichen
  - Auslegung von Akkus und Motoren effektivieren (z.B. keine Permanentmagnete)
  - Lebenszeitverlängerung von Autos und Akkus (in Reduktions-Szenarien sinnvoll)
  - Sektorkopplung im Energiesystem
- Gestaltung der **Verkehrswende**:
  - automobilen Verkehr reduzieren
  - Öffis ausbauen
  - Alternativen zu motorisiertem Verkehr
  - Reboundeffekte (trotz Förderprogrammen) vermeiden
  - ....und vieles mehr! ...
- **Umwelt- und Sozialfolgen** ernsthaft adressieren
- Verfügbarmachung einer **Ersatztechnik für Verbrenner greift viel zu kurz**
- **Transformation „nur“ politisch** und über Verhaltensänderungen zu fordern greift ebenfalls **zu kurz**



## Perspektiven

- Dies spricht nicht gegen E-Mobile als solche, aber gegen die Illusionen, die damit verbunden werden.
  - Einbettung in die Verkehrswende insgesamt dringlich (**GROSSE TRANSFORMATION !**)
  - Einbettung in die GROSSE TRANSFORMATION (Klima, Energie, Ressourcen, Kreisläufe, Innovation, Produktionssystem, Lebensweisen, etc.) unverzichtbar
  - **Technikgestaltung** ist wichtig:
    - Reduktion bzw. Substitution von Materialbedarfen
    - Recyclingfähigkeit von Beginn an
    - Realisierung von effektivem Recycling ermöglichen
    - Auslegung von Akkus und Motoren effektivieren (z.B. keine Permanentmagnete)
    - Lebenszeitverlängerung von Autos und Akkus (in Reduktions-Szenarien sinnvoll)
    - Sektorkopplung im Energiesystem
  - Gestaltung der **Verkehrswende**:
    - automobilen Verkehr reduzieren
    - Öffis ausbauen
    - Alternativen zu motorisiertem Verkehr
    - Reboundeffekte (trotz Förderprogrammen) vermeiden
    - ....und vieles mehr! ...
  - **Umwelt- und Sozialfolgen** ernsthaft adressieren
  - Verfügbarmachung einer **Ersatztechnik für Verbrenner greift viel zu kurz**
  - **Transformation „nur“ politisch** und über Verhaltensänderungen zu fordern greift ebenfalls **zu kurz**
- **Bewusstsein für Limitierungen jenseits von technischen Illusionen!**
  - **Große Transformation heißt auch bewusstes Brechen mit altem Denken und Handeln!**

## **Dank an**

- Nikolaus Arnold (ISR)
- Barbara Weißnegger (Masterarbeit zur Lithiumfrage)
- Mitwirkende in der LV „Technikfolgenabschätzung“ SoSe 2019