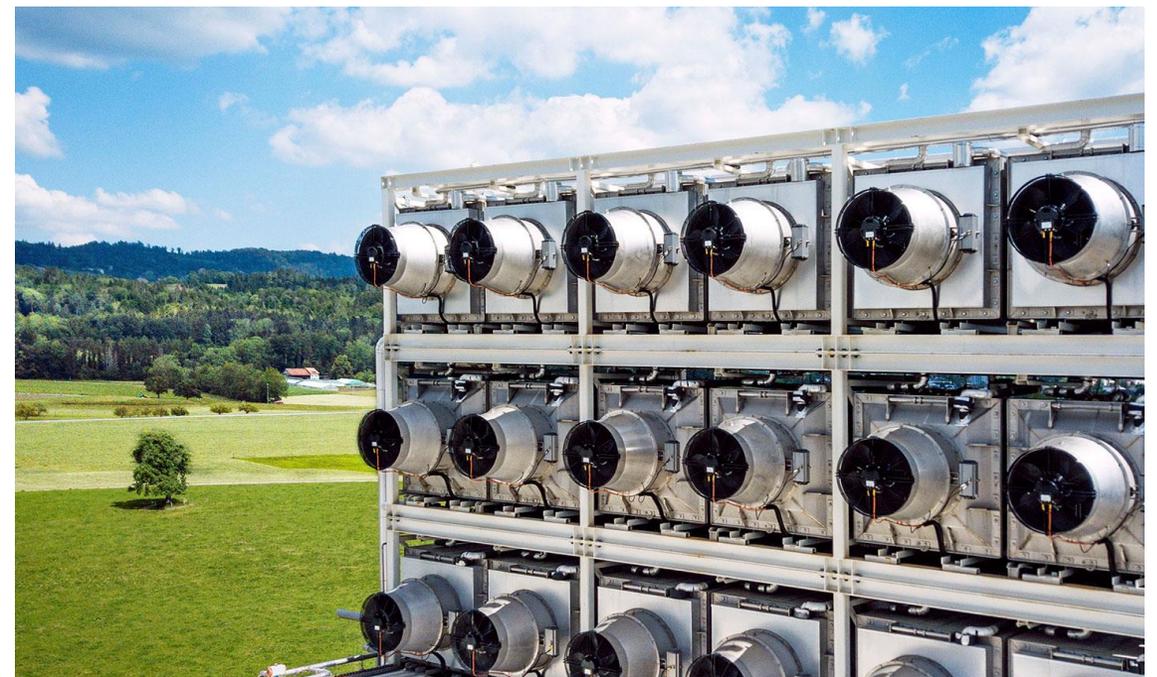


ERGEBNISSE DER STUDIE: „ROHSTOFFE FÜR ZUKUNFTSTECHNOLOGIEN 2021“

Maisel, Franziska; Marscheider-Weidemann, Frank; Langkau, S.; Baur, S.-J.; Billaud, M.; Deubzer, O.; Eberling, E.; Erdmann, L.; Haendel, M.; Krail, M.; Loibl, A.; Maisel, F.; Marwede, M.; Neef, C.; Neuwirth, M.; Rostek, L.; Rückschloss, J.; Shirinzadeh, S.; Stijepic, D.; Tercero Espinoza, L.; Tippner, M.



© Bärns, CC BY-SA 3.0



© Climeworks

AGENDA

- Methodik der Studie
- Technologieauswahl
- Technologiebeispiele
- Ergebnisse

Diffusionsmodell

Schätzmethode trennt die technische und wirtschaftliche Entwicklung

$$(1) \quad B = b \cdot A$$

B Rohstoffbedarf einer bestimmten Anwendung in t/a

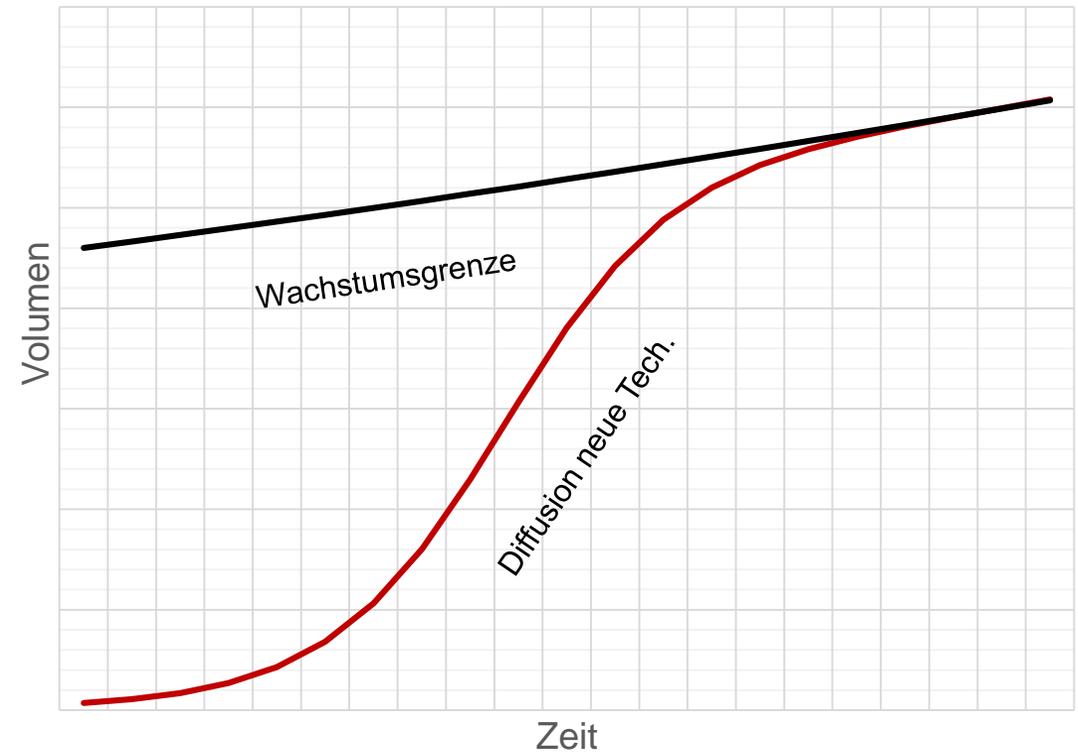
b spezifischer Rohstoffbedarf der Anwendung (t/Einheit)

A Aktivitätsrate (Produktionsmenge) der Anwendung (Einheiten/a)

Betrachtung für Bezugs- und Zieljahr:

$$(2) \quad \frac{B_{2040}}{B_{2018}} = \frac{b_{2040}}{b_{2018}} \cdot \frac{A_{2040}}{A_{2018}}$$

Verlauf Bass-Diffusions-Modell



Foresightmethodik 2040 - Rahmenszenarien

SSP (Shared Socioeconomic Pathways) Szenarien

SSP 1 Nachhaltigkeit (Taking the Green Road)	SSP 2 Mittelweg (Middle of the Road)	SSP 5 Fossiler Pfad (Taking the Highway)
<p>Die Weltgemeinschaft wandert auf einem nachhaltigen Pfad, weil die Bedeutung von nachhaltigen Strukturen für eine gesunde Wirtschaft und eine gesunde Gesellschaft anerkannt wurden. Herausforderungen zur Emissionsreduktion sind niedrig, ebenso wie die Herausforderungen bei der Anpassung an den Klimawandel.</p>	<p>Die Weltgemeinschaft folgt einem Pfad, auf dem sich die sozialen, wirtschaftlichen und technologischen Trends nicht deutlich von den historischen Mustern unterscheiden. Entwicklung und Einkommenswachstum verlaufen ungleichmäßig, wobei einige Länder relativ gute Fortschritte machen. Globale und nationale Institutionen arbeiten darauf hin, machen aber nur langsame Fortschritte bei der Erreichung nachhaltiger Entwicklungsziele.</p>	<p>Der Glaube an Technologie als „Wunderwaffe“ gegen den Klimawandel setzt Investitions- und Entwicklungsprioritäten für die Weltgemeinschaft. Herausforderungen zur Emissionsreduktion sind hoch, die Herausforderung in der Anpassung an den Klimawandel sind jedoch niedrig.</p>

[Gemeinsame sozioökonomische Pfade \(SSP\) wurden für die Durchführung integrierter, multidisziplinärer Analysen von einem internationalen Team von Klimawissenschaftler:innen, Ökonom:innen und Energiesystemmodellierer:innen entwickelt:](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009)
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Verkehrspfadigmen

- Umsetzung der 3 „V“: „vermeiden, verlagern und verbessern“
- Vermeidung von Verkehrsleistung (z.B. durch Digitalisierung, Verbesserung der Besetzungsgrade/des Ladefaktors der Fahrzeuge und durch Sharing/Pooling)
- Verlagerung des Verkehrs auf effizientere und THG-ärmere Verkehrsmittel (z.B. von der Straße auf die Schiene oder aus der Luft auf die Schiene)
- Verbesserung der Effizienz der Fahrzeuge und Vergrößerung der Anteile elektrifizierter Fahrzeuge

Services

Verkehrs-Infrastruktur

- *Vernetztes Fahren* - Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (C2X) über Mobilfunk (min. 4G) und Rechenzentren
- Lkw-Parkplatzmanagement
- Radschnellwegenetz
- Ausbau Schieneninfrastruktur (Strecken, Knoten, Digitale Leit- und Sicherungstechnik)
- Oberleitungsinfrastruktur auf den Bundesautobahnen für Hybrid-Lkws
- Wasserstoffbetankungsinfrastruktur

Verkehrsträger

Pkw/Lkw/Busse

- *Automatisches Pilotieren von Kraftfahrzeugen*
- *Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge (Nd, Dy)* □
- PEM-Brennstoffzellen Elektrofahrzeuge
- Superkondensatoren für Kraftfahrzeuge
- Pantographen für Hybrid-Oberleitungs-Lkw

Fahrräder

- Pedelecs, S-Pedelecs, e-Bikes, e-Lastenfahrräder

Schiffe/Bahnen

- Sky sails (vollautomatischer Zugdrachenantrieb)
- LNG-Schiffsantrieb
- H2BZ-Triebwagen
- Batterie-Triebwagen
- Automatisiertes Rangieren

Flugzeuge

- *Unbemannte Luftfahrzeuge („Drohnen“)*
- Flugtaxis (elektrisch angetriebene Multikopter u.ä.)
- *Scandium-Legierungen für den „Airframe“-Leichtbau*
- Einsatz von Batterietechnologie für Kurz-/Mittelstrecke

Fahrzeugbau

- *Leichtbau (Tailored Blanks, Mg, Al, CFK)*



Kraftstoffe /Energieversorgung

- *Synthetische Kraftstoffe: PtX, BtL (Co)*
- *Wasserstoff aus Elektrolyse (Ir)*
- *Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher für Pkw (Li, Ni, Mn, Co) /Festkörperbatterie (Li, Ti, Ni, Mn, La)*
- *Induktive Übertragung elektrischer Energie (Cu)*
- LNG (auf -161 bis -164 °C verflüssigtes Erdgas)

Technologieportfolio Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021

Mobilität, Luft- und Raumfahrt

1. Pkw-Leichtbau (TB, Al, Mg, Carbonfasern)
2. Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge
3. Legierungen für den „Airframe“-Leichtbau
4. Automatisches Pilotieren von Kraftfahrzeugen
5. Flugtaxis & unbemannte Luftfahrzeuge
6. Superlegierungen
7. Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher (für mobile Anwendungen)
8. Feststoffbatterie

Digitalisierung und Industrie 4.0

9. Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik
10. Quantencomputer
11. Optoelektronik / Photonik
12. Mikroelektronische Kondensatoren
13. Hochfrequenz-Mikrochips
14. Industrielle Robotik + Industrie 4.0
15. Additive Fertigung („3D-Drucker“)
16. Geräte im IoT

Energietechnologien und Dekarbonisierung

17. Thermoelektrische Generatoren
18. Dünnschicht-Photovoltaik
19. Wasser-Elektrolyse
20. Direct-Air Capture (DAC)
21. SOFC - Stationäre Brennstoffzelle
22. CCS - Carbon Capture and Storage
23. Redox-Flow –Speicher
24. Windkraftanlagen
25. Hochleistungs-Permanentmagnete
26. Synthetische Kraftstoffe

Kreislauf- und Wasserwirtschaft

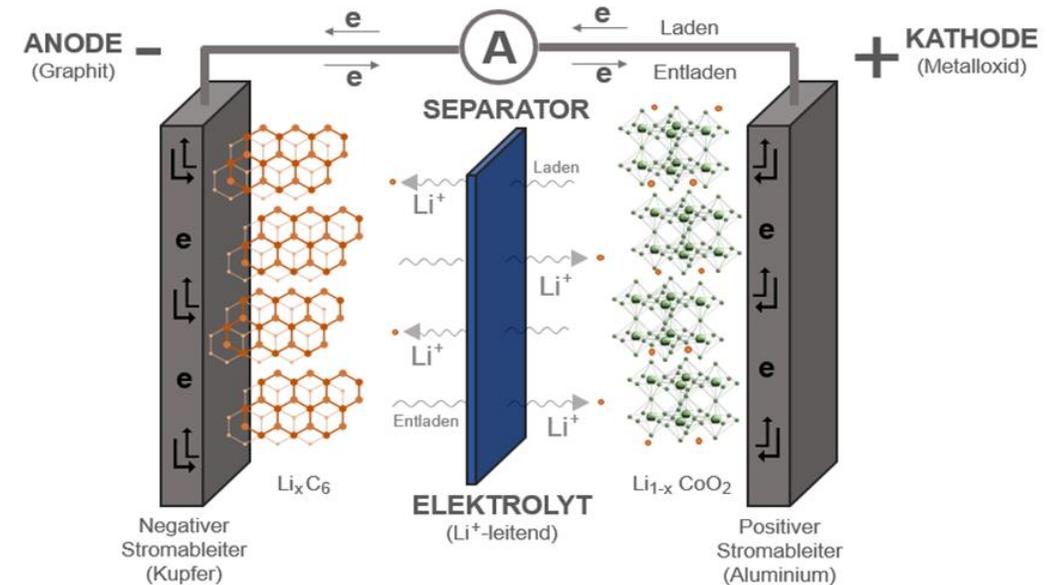
27. Meerwasserentsalzung
28. Rohstoffliches Recycling (von Kunststoffen)

Strom- und Datennetzwerke

29. Ausbau Stromnetz
30. Glasfaserkabel
31. 5G (6G)
32. Rechenzentren
33. Induktive Übertrag. elektrischer Energie

Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher für PKW - Einführung -

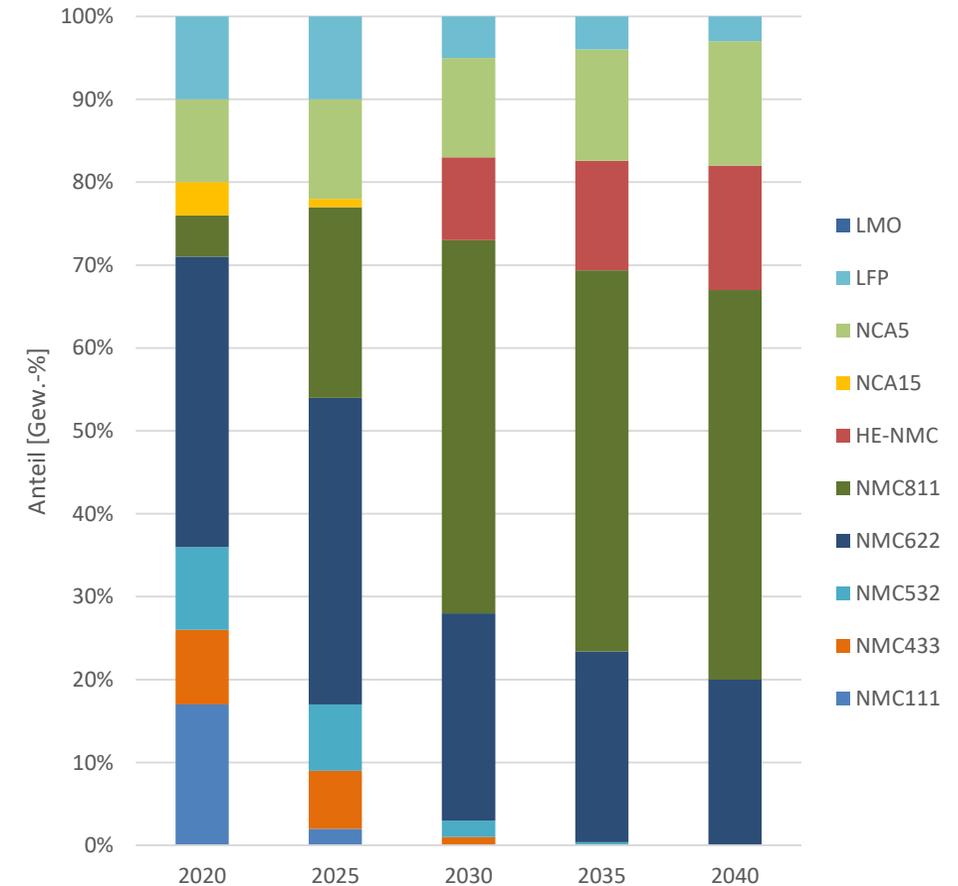
- Elektromobilität ist seit Jahren ein wachsender Sektor.
- Einsatz von Lithium-Ionen Batterien im Bereich der Elektromobilität
- Anodenmaterialien:
 - Graphit, Silizium, Kupfer (Stromsammler)
- Verschiedene Kathodenmaterialien:
 - Lithium-Manganoxid (LMO)
 - Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC: NMC-111, NMC-433, NMC-532, NMC-622, NMC-811)
 - Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA: NCA5, NCA15)
 - Lithium-Eisenphosphat (LFP)



Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher für PKW

- Marktvorschau -

- Abschätzung der Marktanteile der Kathodenmaterialien aufgrund von Marktstudien:
 - Trend zu einem kobaltarmen und nickelreichen Rohstoffeinsatz
 - LFP aufgrund geringer Energiedichten nicht erfolgsversprechend für den Automobilmarkt
 - NMC mit höherem Nickelanteil dominieren den Markt
 - HE-NMC mit Marktanteil ab 2030



Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher für PKW - Rohstoffbedarf -

- Umfangreiche Literaturrecherche von Antriebstechnologien und Fahrzeugsegmenten (Kleinwagen, Kompaktwagen, Oberklasse, leichte und schwere Nutzfahrzeuge, Busse) sowie Batteriekapazität [kWh]
- Spezifische Metallmengen der Batteriekathoden [kg/kWh]
- Gesamtkapazitäten der Mobilitätsszenarien (Neuzulassungen) [GWh]

Fahrzeugsegment	HEV bis 2020	HEV ab 2020	PHEV bis 2020	PHEV ab 2020	BEV bis 2020	BEV ab 2020	FCEV bis 2020	FCEV ab 2020
	Durchschnittliche Batteriekapazität [kWh]							
Kleinwagen	-	1	24		25	30	1*	1,6*
Kompaktwagen	1	1	11	12	35	51	1*	1,6*
Oberklasse	-	2	12	14	83	83	1	1,6
Leichte Nutzfahrzeuge	-	-	14		29	50	1*	1,6
Schwere Nutzfahrzeuge	-	-	41		307		10*	
Busse	-	-	-	-	193		10*	

HEV: Hybrid-Elektrofahrzeug, PHEV: Plug-In Hybrid-Elektrofahrzeug, BEV: Batterie-Elektrofahrzeug, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug

Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher für PKW - Rohstoffbedarf -

Rohstoff	Weltproduktion 2018 [t]	Verbrauch 2018 [t]	Bedarfsvorschau 2040 [t]		
			SSP1 Szenario (Nachhaltigkeit)	SSP2 Szenario (Mittelweg)	SSP5 Szenario (Fossiler Pfad)
Kobalt	151.060 (B)	12.751	310.927	270.368	59.830
Nickel	2.310.000 (B)	32.318	2.003.038	1.741.756	385.436
Mangan	20.300.000 (B)	11.142	530.471	461.275	102.076
Lithium	88.641 (B)	7.458	377.320	328.102	72.606
Grafit	3.207.500 (B)	-	1.019.323	886.359	196.144
Kupfer	20.561.500 (B)	8.525	451.651	392.737	86.909

B: Bergwerksförderung (t Inh.)

- Lithium: Verbrauch 2018 ca. 8% der Produktion (2% in 2013), Anstieg um das bis zu 50-fache
- Kobalt: Verbrauch 2018 ca. 8% der Produktion (1% in 2013), Anstieg um das bis zu 25-fache

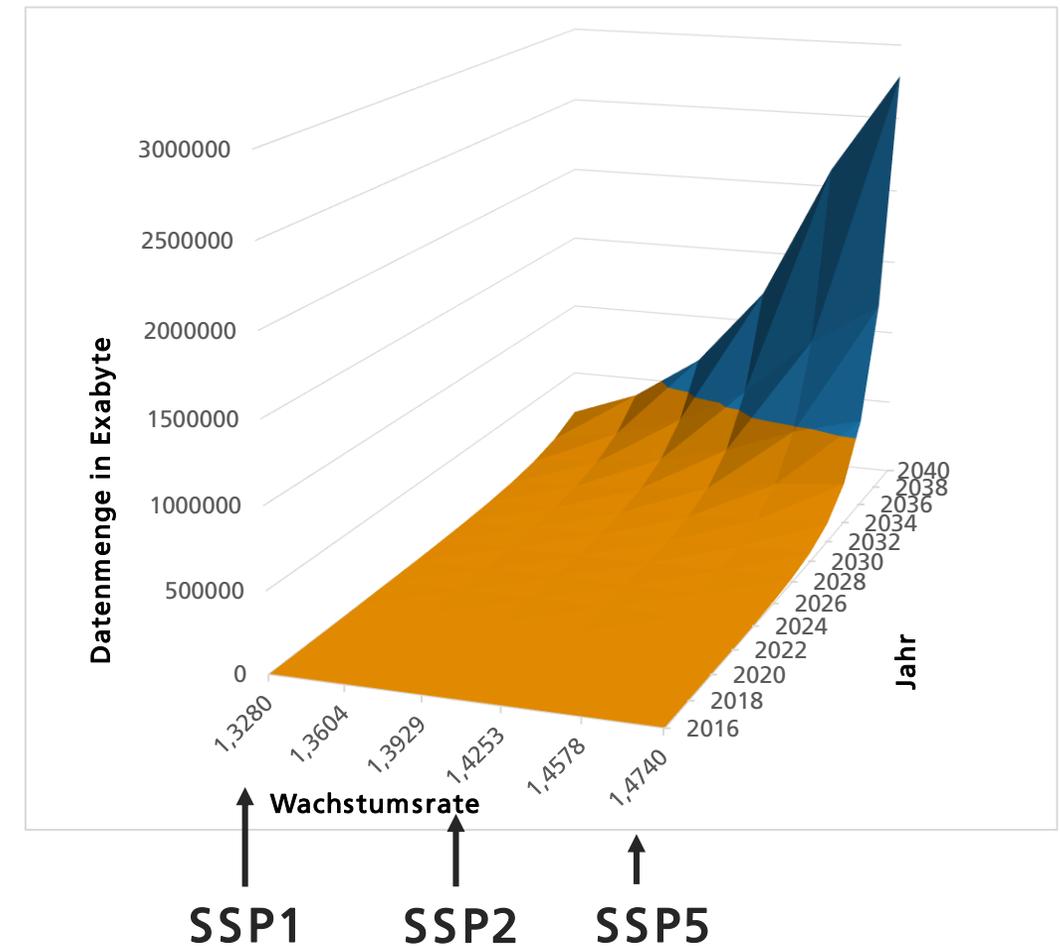
Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher für PKW

- Zusammenfassung/Recycling -

- Rohstoffbedarf für Lithium-Ionen Batterien steigt an.
- Das Recycling von Sekundärrohstoffen aus Altbatterien muss mehr gefördert werden.
- Bestehenden Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien konzentrieren sich hauptsächlich auf die Rückgewinnung von Kobalt und nicht auf die Rückgewinnung von Lithium.
- Durch die neue Batterierichtlinie Recyclingeffizienzen für Lithium-Ionen Batterien und stoffliche Verwertungsquoten für deren enthaltene Rohstoffe Kobalt, Nickel, Lithium und Kupfer festgelegt.
- Grafitrecycling ist noch nicht etabliert, da sich recyceltes Grafit nicht für den Wiedereinsatz in Batterien eignet.
- Australische Firma meldet erfolgversprechendes Reinigungsverfahren, hochreines Anodenmaterial für Batterien aus gebrauchten Lithium-Ionen-Batteriematerialien zurückzugewinnen.

Rechenzentren - Einführung -

- Es gibt nicht „DAS“ Rechenzentrum. Verschiedene Querschnittstechnologien und Komponenten sind möglich, hohe Diversität der Bauformen, schneller Wandel der Technik
- Synopse fokussiert auf Speichermedien:
 - Marktanalyse vorhandener und zukünftiger Speichertechnologien
 - Zentrale Komponenten: SSD, HDD, Magnetbänder (!)
 - Bezugseinheit = Datenmenge [Zetabyte = 10^{21} Bytes]
Problem: Datenmengen sehr veränderbar, exponentielles Wachstum über langen Zeitraum



Rechenzentren

- Szenarientwicklung -

SSP1 Szenario (Nachhaltigkeit)	SSP2 Szenario (Mittelweg)	SSP5 Szenario (Fossiler Pfad)
<ul style="list-style-type: none">• Geringes Datenmengenwachstum (32%/Jahr für Rechenzentren)• Hoher Speicherkapazitätsanstieg <p>→ Geringster Ressourcenverbrauch</p>	<ul style="list-style-type: none">• Mittleres Datenmengenwachstum (39%/Jahr)• Mittlerer Speicherkapazitätsanstieg <p>→ Mittlerer Ressourcenverbrauch</p>	<ul style="list-style-type: none">• Hohes Datenmengenwachstum (47%/Jahr)• Geringerer Speicherkapazitätsanstieg <p>→ Hoher Ressourcenverbrauch</p>

Anmerkung: Verteilung der Daten auf die Speichermedien für alle Szenarien aufgrund fehlender Quellen konstant gehalten. Veränderung über Zeit berücksichtigt.

Rechenzentren

- Rohstoffbedarf für Szenarien -

- Berechnung der Datenmenge pro Datenträgertyp
- Rohstoffbedarf pro Datenmenge:

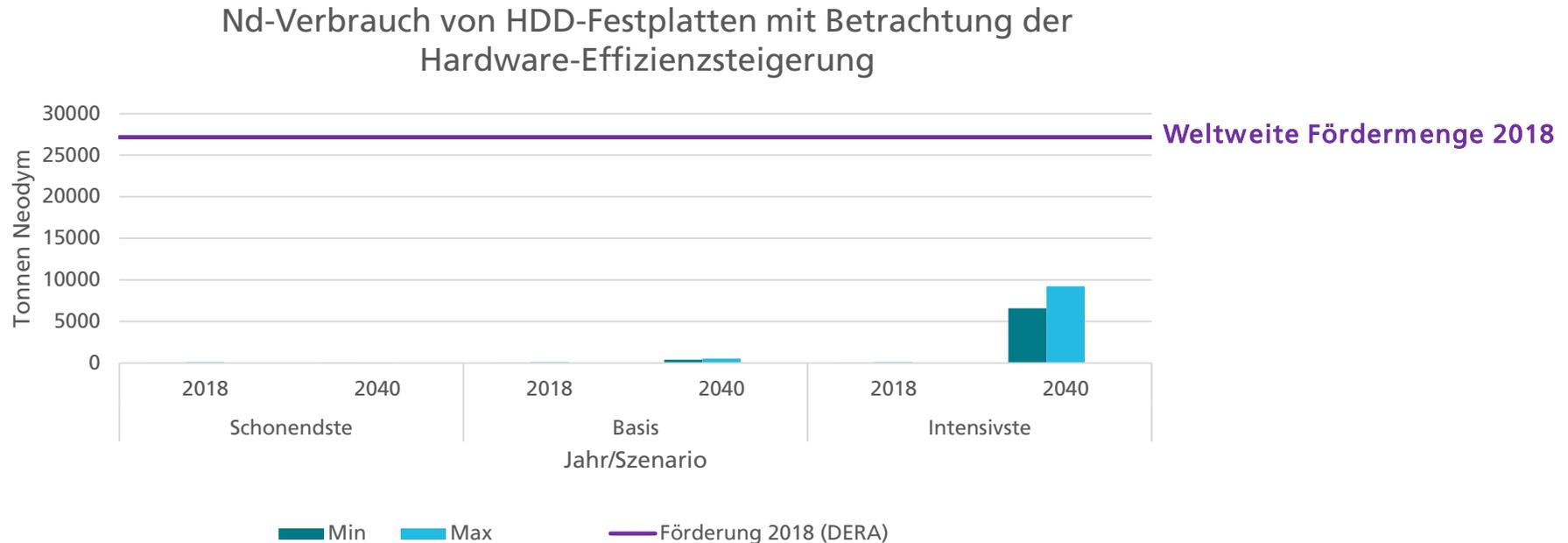
HDD-Festplatten		SSD-Festplatten	
Kobalt (Co):	0,34 – 1,0 t/ZB	Silizium (Si):	0,02 t/ZB
Chrom (Cr):	0,03 – 0,09 t/ZB	Tantal (Ta):	0,6 t/ZB
Platin (Pt):	0,18 – 0,55 t/ZB		
Ruthenium (Ru):	0,3 – 0,4 t/ZB		
Neodym (Nd):	342 – 480 t/ZB		

[Ku, 2017]

- Datenlücke bei den Magnetbändern:
 - Substitution der magnetischen Beschichtung möglich (Barium, Strontium)
 - Beherrschbarkeit einer potenziellen Knappheit wird angenommen.

[Ku, 2017] Ku, A.; Anticipating critical materials implications from the Internet of Things (IOT): Potential stress on future supply chains from emerging data storage technologies. Sustainable Materials and Technologies. 15. 10.1016/j.susmat.2017.10.001.

Rechenzentren - Neodymbedarf für HDD-Festplatten -



- Annahme: weiterhin ein verbauter Lese-/Schreibkopf in Relation zur größer werdenden Festplattenkapazität
- Effizienzsteigerung bei Datenspeicherung wird angenommen bis 2040 → Neodymverbrauch bei HDD Festplatten sinkt pro Einheit Datenmenge.

Rechenzentren - Rohstoffbedarf -

Rohstoff	Weltproduktion 2018 [t]	Verbrauch 2018 [t]	Bedarfsvorschau 2040 [t]					
			Szenario SSP 1		Szenario SSP 2		Szenario SSP 5	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
Kobalt	151.060 (B)	0,1	37	109	142	418	503	1.479
Neodym	23.300 (B)	180	44	63	376	530	6.570	9.220
Platin	190 (B)	0,1	20	60	75	230	266	813
Ruthenium	33 ¹ (R)	0,1	33	44	125	167	444	592
Tantal	1.832 (B)	0,01	48		185		649	

B: Bergwerksförderung (t Inh.)

R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

¹ Quelle: JM 2020

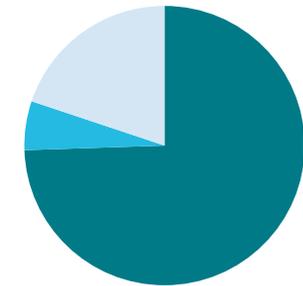
Anmerkung: Min.-/Max.-Werte ergeben sich laut [Ku, Anthony. (2017)] durch Spannbreite an Rohstoffbedarf bei HDD Festplatten

Rechenzentren

- Zusammenfassung -

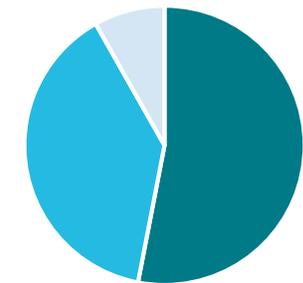
- Foresight basierend auf Datenmengen ermittelt, die den Entwicklungen der SSPs entsprechen können
- Rohstoffbedarf nur für die Speichermedien in Rechenzentren ermittelt
→ Gesamte Technik der Rechenzentren wird spürbar höhere Bedarfe haben
- COVID-19-Pandemie hat Entwicklungsvorschub geleistet für digitales Arbeiten und Leben
- Belastbare Studien für 2020 noch nicht verfügbar
- Nachfragewachstum und Technologiesprünge können entgegengesetzte Wirkungen auf den Rohstoffbedarf haben

Datenträgerverteilung
2018



■ HDD ■ SSD ■ Magnetband

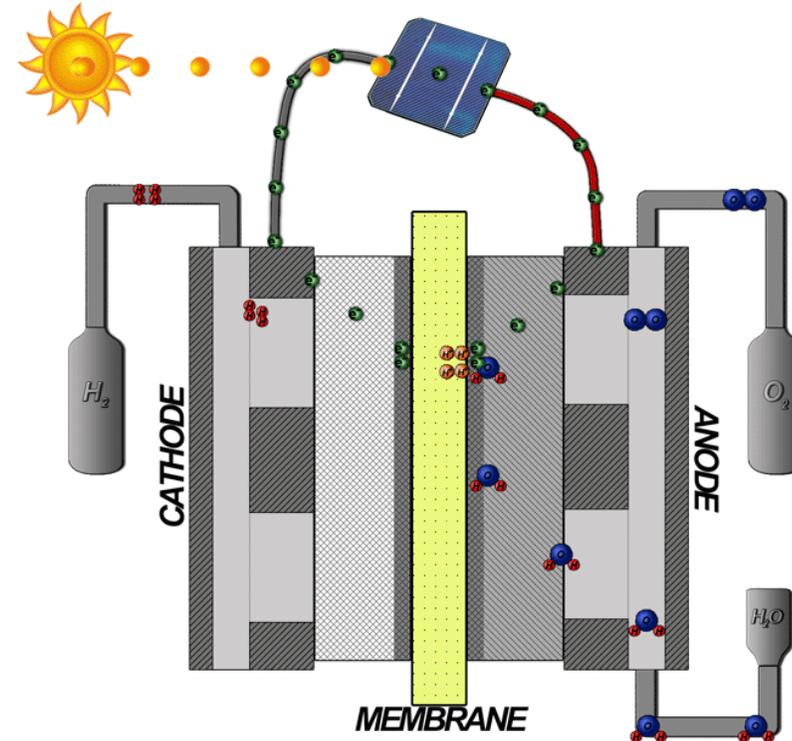
Datenträgerverteilung
2040



■ HDD ■ SSD ■ Magnetband

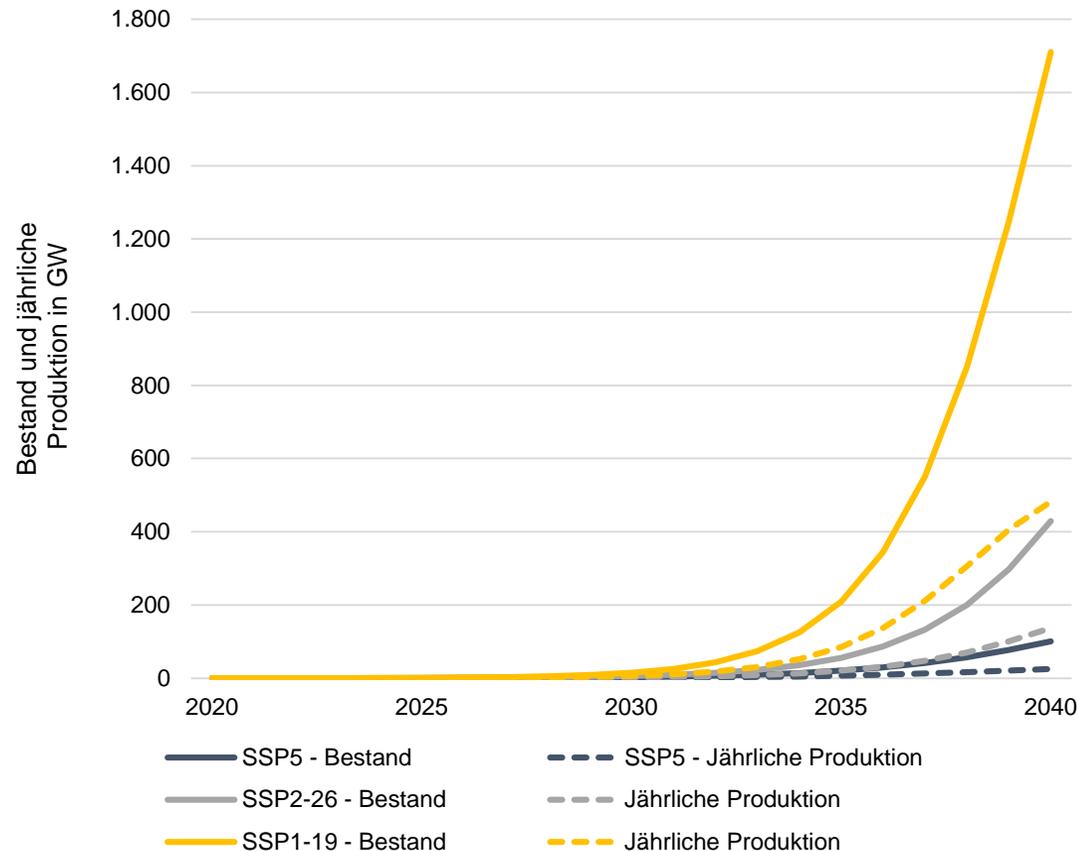
Wasserelektrolyse - Einführung -

- Elektrolysearten im Fokus:
 - Alkalische Elektrolysen (AEL)
 - Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (PEMEL)
 - Festkörperoxid-Elektrolyse (SOEL)
- AEL und PEM tendenziell ähnliche Einsatzfelder; SOEL erfordert Abwärmequelle
- AEL: Stromdichten $0,2 - 0,8 \text{ A/cm}^2$. Wirkungsgrade von $50 - 78 \%$ bei $70 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$ und $< \text{als } 30 \text{ bar}$
- PEMEL: Stromdichten $1 - 2 \text{ A/cm}^2$, Wirkungsgrad bei $50 - 83 \%$ bei $50-80 \text{ }^\circ\text{C}$, ähnliche Drücke wie der AEL
- SOEL: Stromdichten $0,3 - 1 \text{ A/cm}^2$ bei $700 - 850 \text{ }^\circ\text{C}$. Wirkungsgrade aktuell bei $45 - 55 \%$, durch den Einsatz externer Wärmequellen Steigerung auf ca. 80%



Wikipedia: Eintrag Elektrolyseur (PEM)

Wasserelektrolyse - Marktvorschau -



■ Abhängig von SSP-Szenarien, mögliche installierte Leistungen weltweit:

■ 2030: 3 - 15 GW

■ 2040: 100-1710 GW

■ Dekarbonisierung:

■ Industrie

■ Synthetische Kraftstoffe

■ Mobilität (Brennstoffzelle)

Wasserelektrolyse

- Betrachtete Materialien -

- AEL: KOH, Ni
- PEMEL: Ir, Pt (Ru)
- SOEL: v. a. Yttrium und Zirkonium. Varianten mit anderen Mischmetalloxiden Sc, Ce, Ge u.a.

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Iridium	6,8 ¹ (R)	0,01	34	10	2
Platin	190 (B)	0,00	6	2	0,33
Zirkonium	1.256.362 ² (B)	10,50	40.300	11.400	2.100
Scandium	9,1 (B)	0,01	24	7	1
Yttrium	7.600 (B)	0,74	2.800	800	150

B: Bergwerksförderung (t Inh.)

R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

¹ Quelle: JM 2020, ² Produktion Zirkoniumminerale

Wasserelektrolyse

- Zusammenfassung -

- AEL: etabliert Technologie, große Entwicklungssprünge fraglich
- PEMEL: spez. Iridiumbedarf wird geringer
- SOEL: unterschiedliche Temperaturniveaus, unterschiedliche Technologien, flexible Materialauswahl, Technologieentwicklung unsicher
- In der Studie unterstellte Verteilung 2040: 85 % AEL, 10 % PEMEL und 5 % SOEL

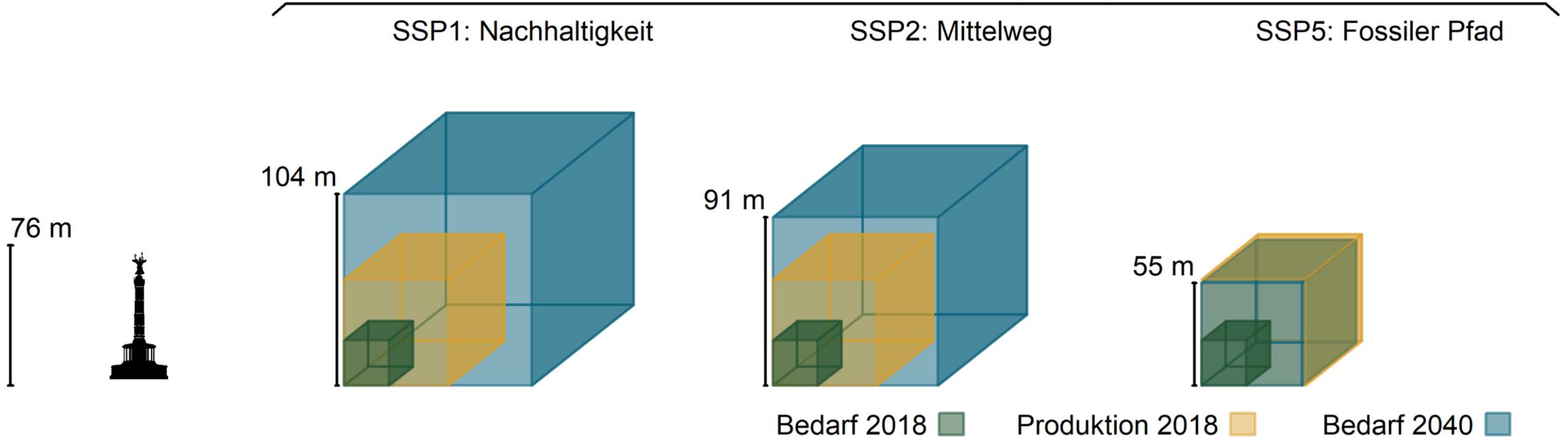
- Derzeit Wasserstoff-Hype
(Wasserstoffstrategien EU + DE)

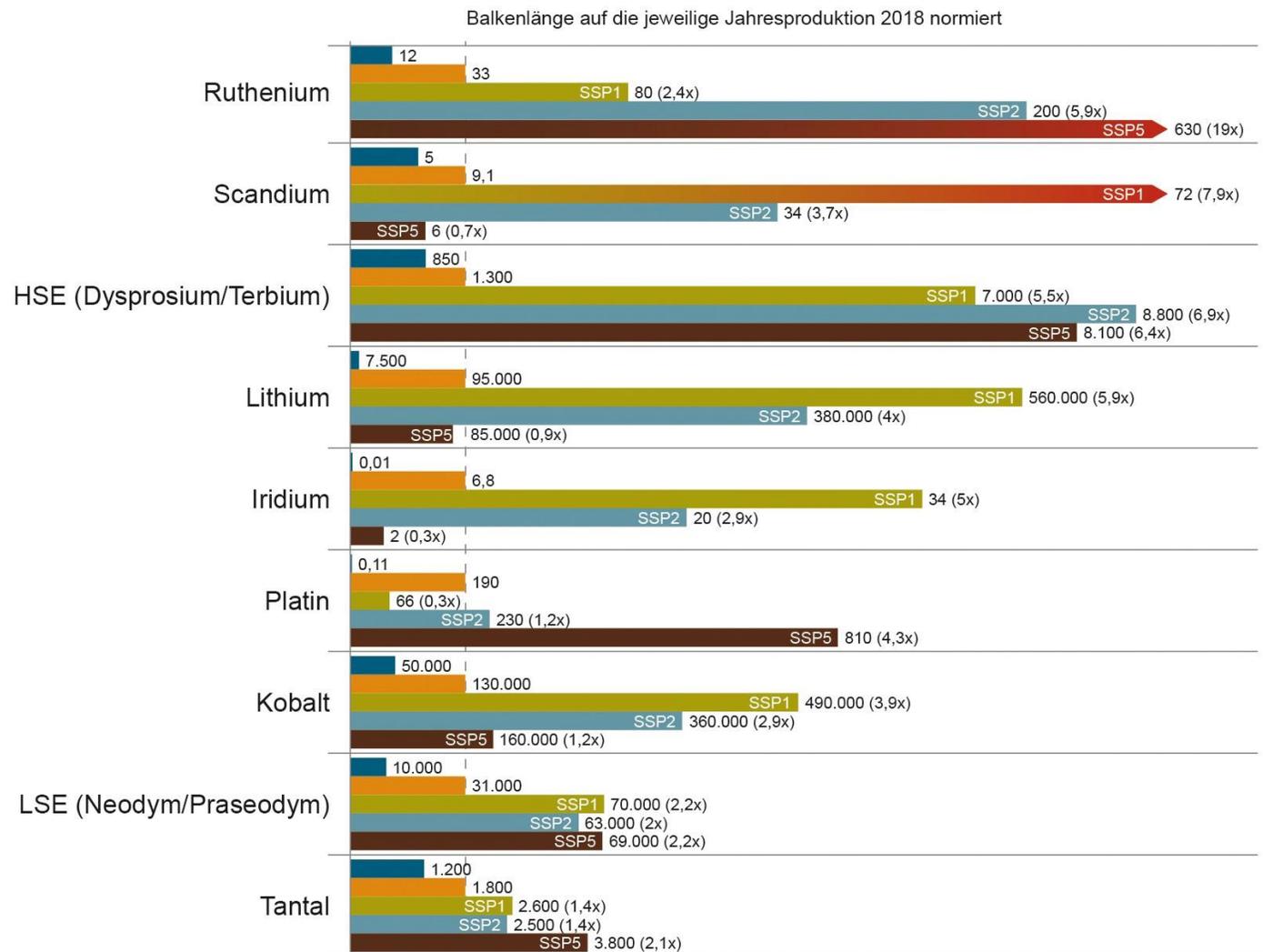
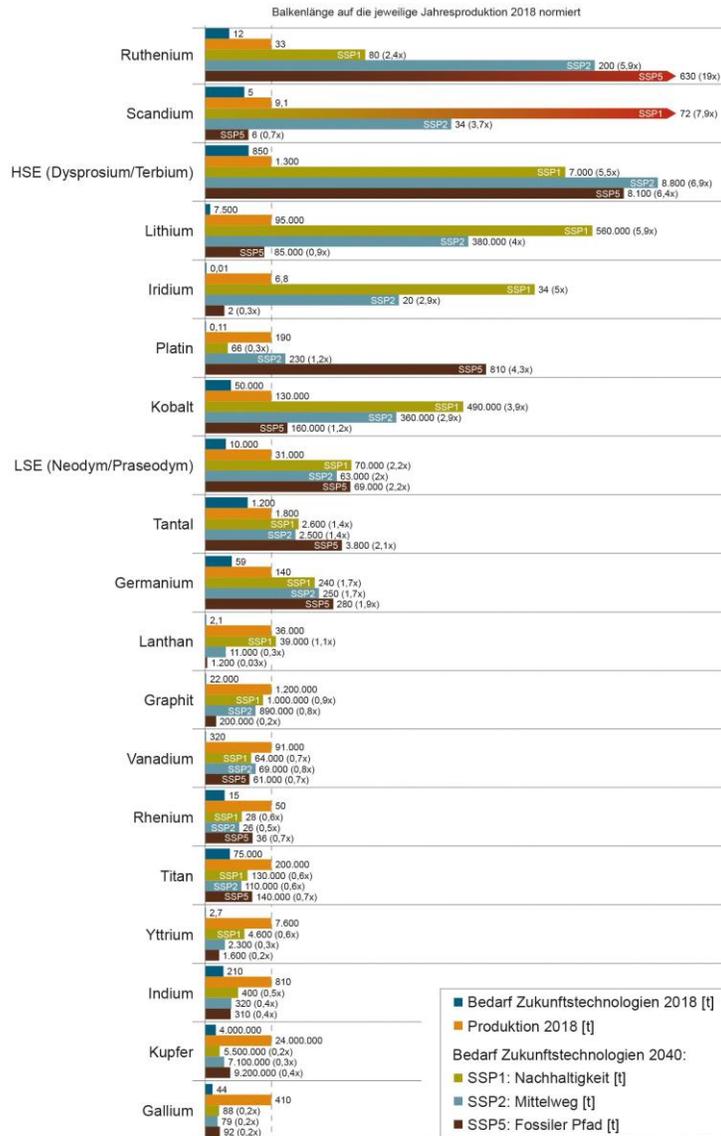


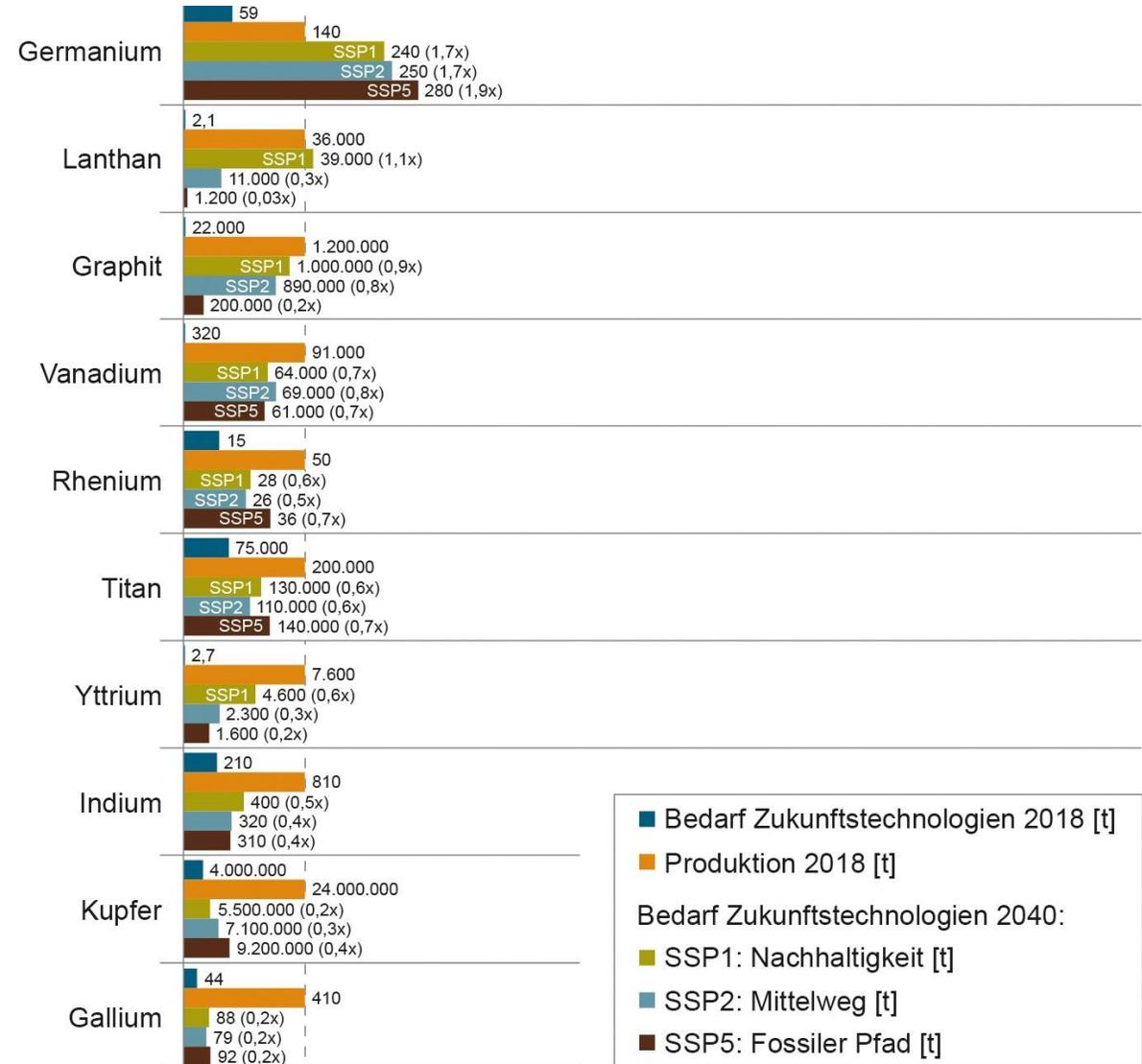
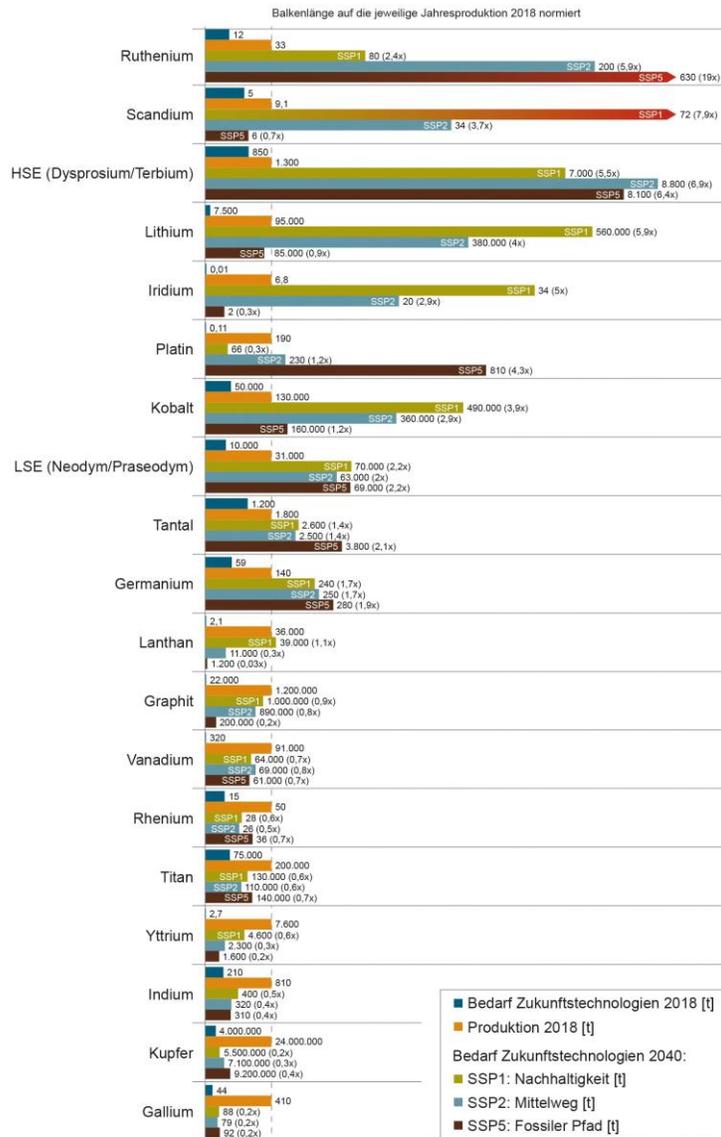
Ergebnisse: Produktion 2018 und Bedarf von Lithium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

Lithium

Bedarfsszenarien (2040)







Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



© <http://s430.photobucket.com/user/7ustaGirl>

Dr. Frank Marscheider-Weidemann

Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung ISI

☎ 0721 6809 -154

mw@isi.fraunhofer.de

Franziska Maisel

Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit
und Mikrointegration IZM

☎ 030 46403-293

franziska.maisel@izm.fraunhofer.de