

# Ressourcen für die Energiewende

## Status quo der Energiesystemmodellierung

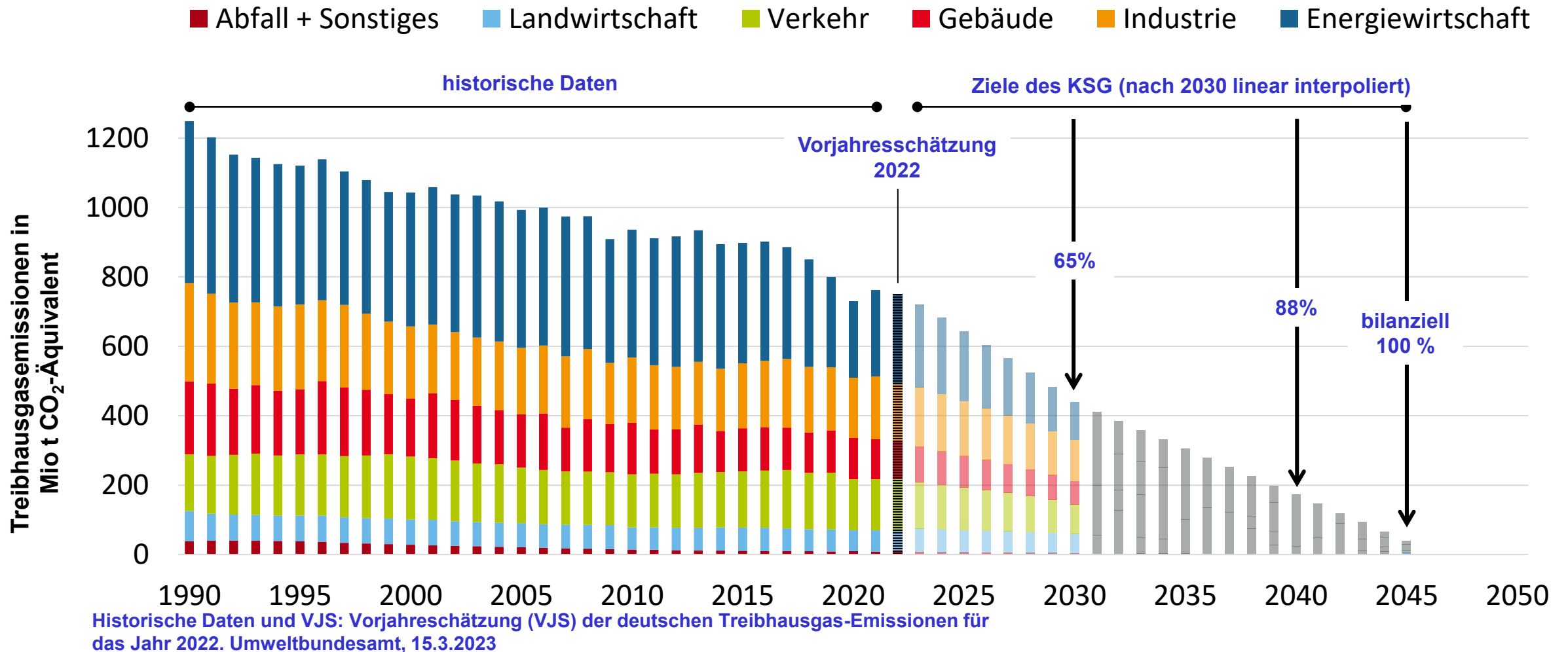
**Dr. Charlotte Senkpiel | Fraunhofer ISE**

Estelle Gervais | Fraunhofer ISE

Dr. Petra Zapp | FZ Jülich

# THG-Emissionen Deutschlands

## Historie und Zielwerte Bundes-Klimaschutzgesetz



# Energiesystemanalyse – Ergebnisse

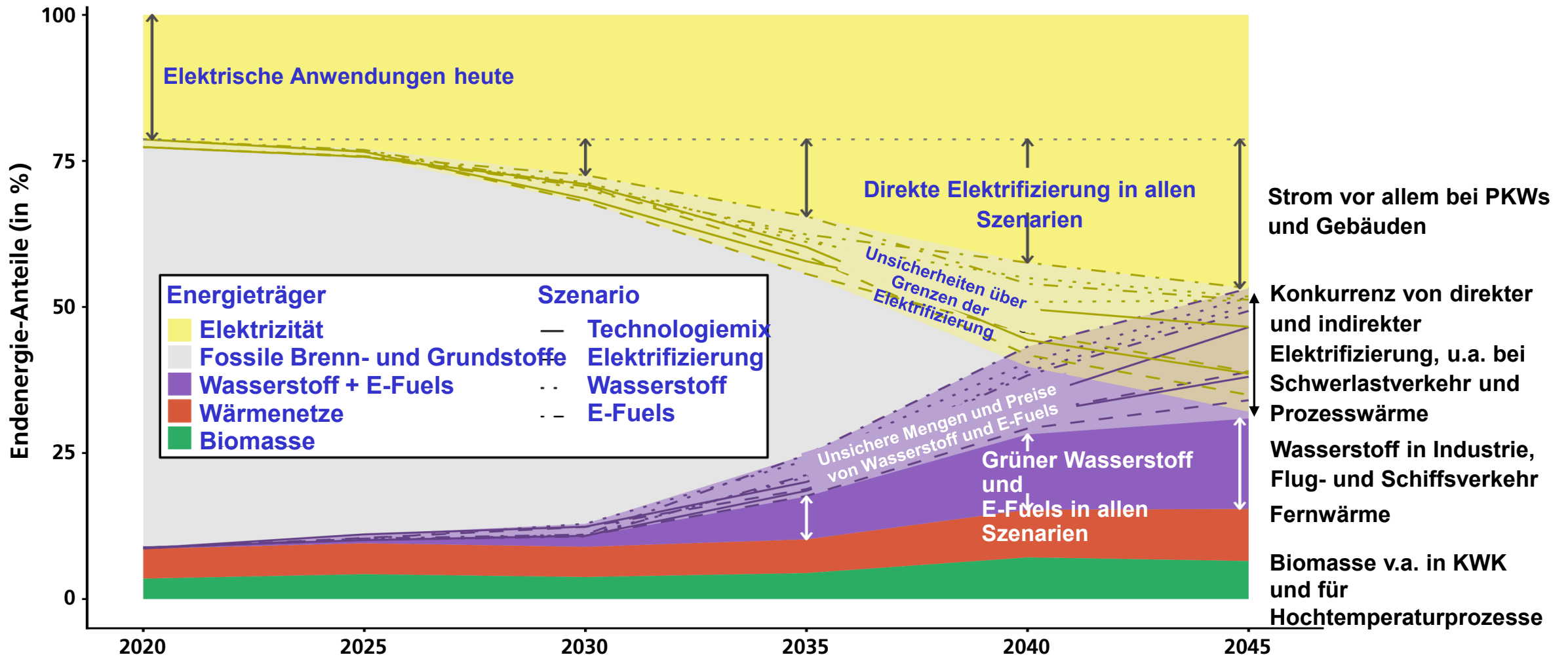


Abbildung: Ariadne Kurzdossier 2021: Durchstarten trotz Unsicherheit, 16.11.2021, <https://ariadneprojekt.de/publikation/eckpunkte-einer-anpassungsfaehigen-wasserstoffstrategie/>

# Welche Materialzusammensetzung haben aktuelle Technologien?

„Built-in“ 2020

**Basismetalle**

**PV Metalle**

**Wind Seltene Erde**

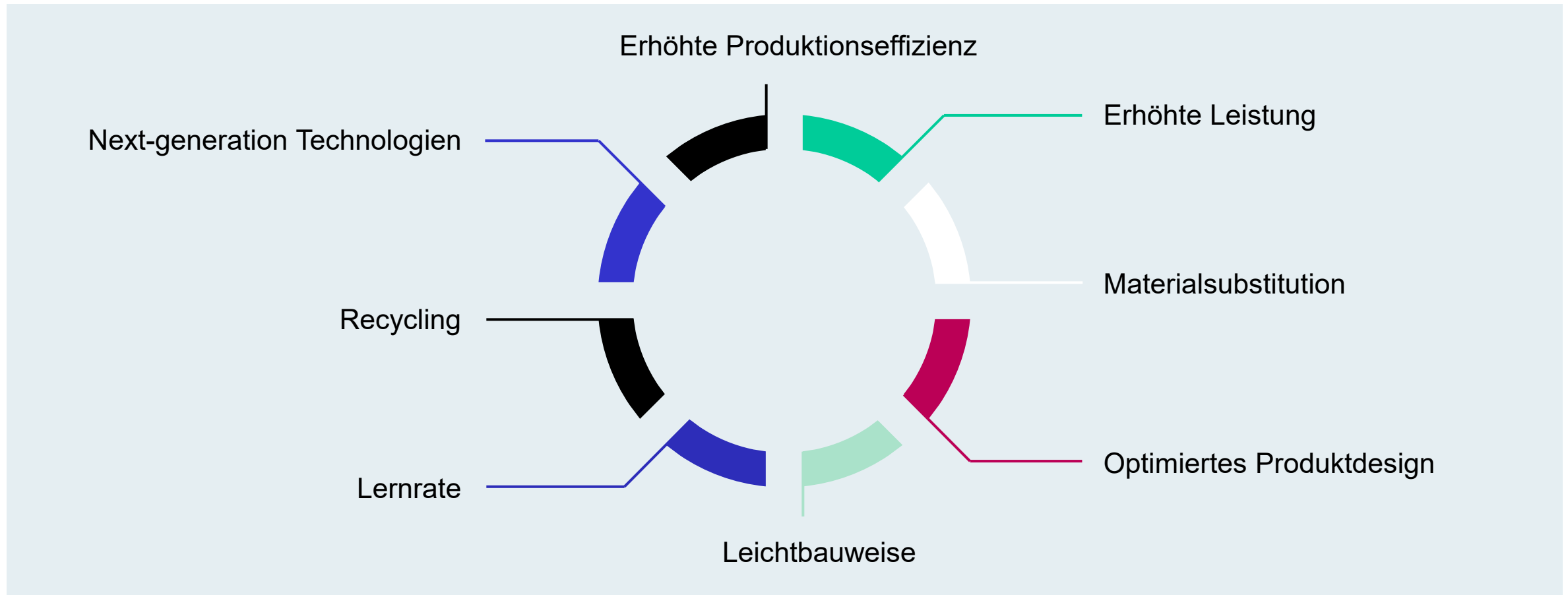
**Batterie Metalle**

Technologie	Untertechnologie	Stahl	Al	Cu	Pb	Zn	Ni	Ag	Si	Sn	In	Ga	Se	Cd	As	Nd	Dy	Pt	Ti	Va	Li	Mn	Co
PV	PERC	x	x	x	x			x	x	x													
	SHJ	x	x	x	x			x	x	x	x												
	CIGS	x	x	x						x	x	x	x	x									
	III-V/Si	x	x	x				x	x	x	x	x											
Wind	EESG	x	x	x																			
	PMSG-MS	x	x	x	x											x	x						
	PMSG-DD	x	x	x	x											x	x						
KWK	GuD	x	x	x																			
Wärmepumpe	Luft-Wasser	x	x	x																			
Brennwertkessel	Gas basiert	x	x	x		x																	
Solarthermie	Kollektoren	x	x	x																			
Brennstoffzelle	PEMFC	x		x														x	x				
Power-to-X	AEL	x	x	x			x																
	VRP	x	x	x																			
Batterie	NMC Li-ionen	x	x	x			x																
	Wärmespeicher	Wassertank	x																				
Übertragungsnetz	AC	x	x																				
	DC	x		x	x																		
Sanierung	Dämmung	x				x																	

**Brennstoffzelle Metalle**

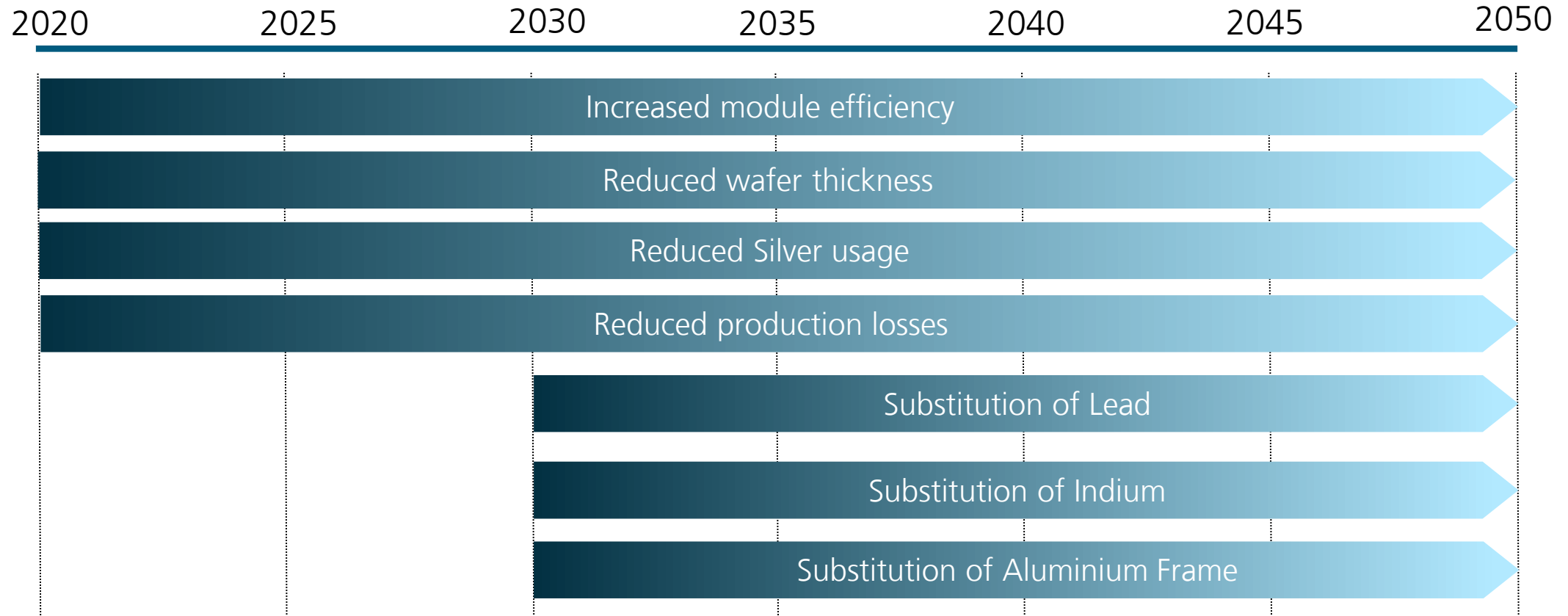
# Welche Rolle kann Materialeffizienz zukünftig spielen?

## Das gesamte Spektrum



# Welche Rolle kann Materialeffizienz zukünftig spielen?

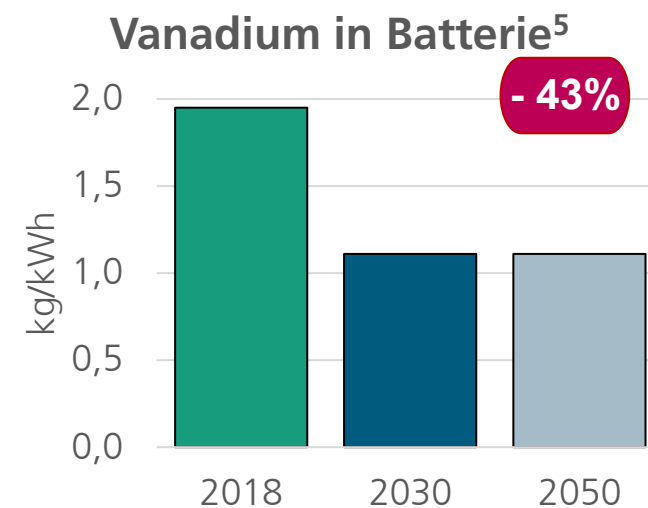
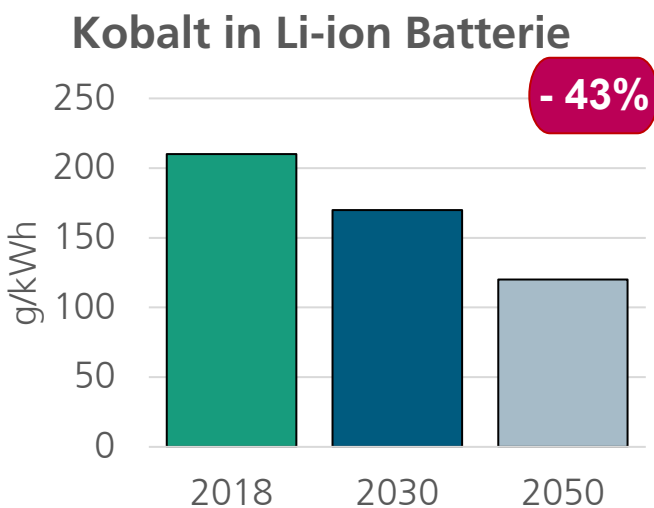
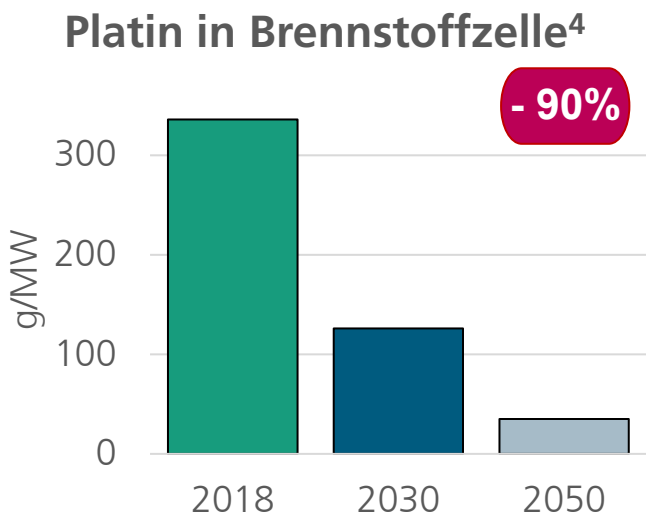
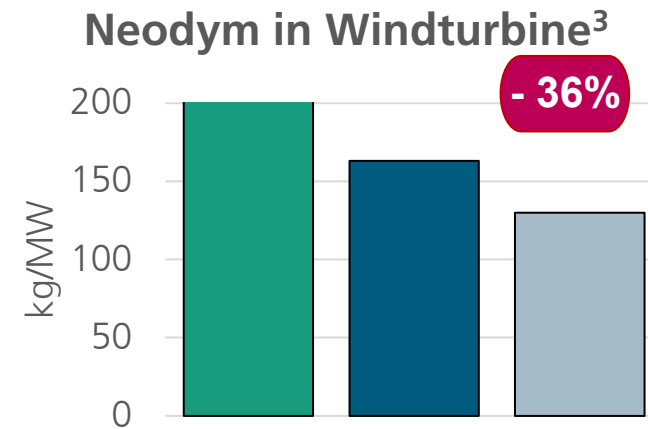
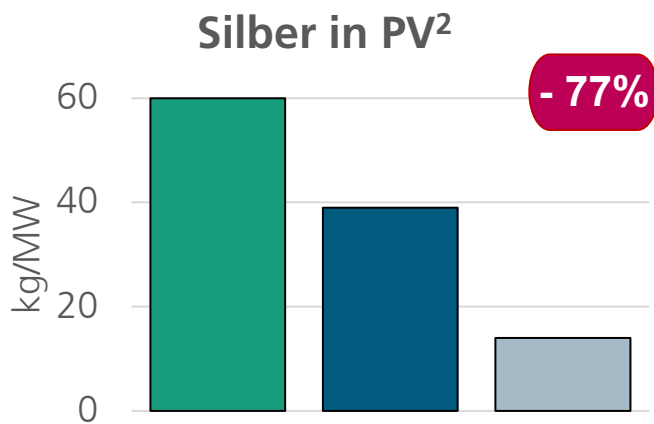
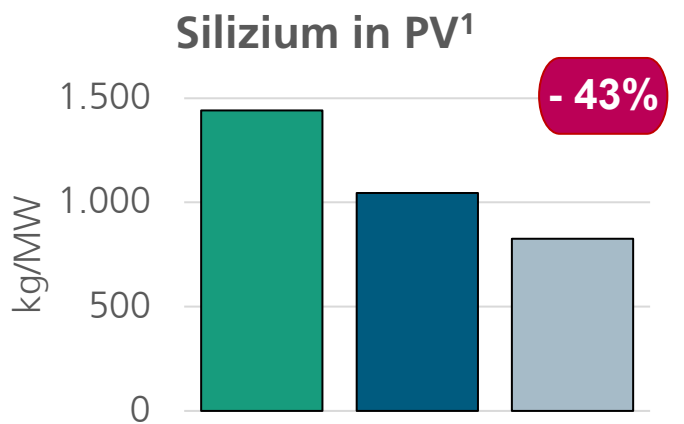
## Beispiel von Materialeffizienz-Roadmap in der Photovoltaik



- 1 PERC
- 2 HJT
- 3 PMSG-DD
- 4 PEMFC
- 5 VRF

# Welche Rolle kann Materialeffizienz zukünftig spielen?

## Hohes Optimierungspotenzial



# Kritische Ressourcen für die Wasserelektrolyse

## Status quo bei den Elektrolyseuren

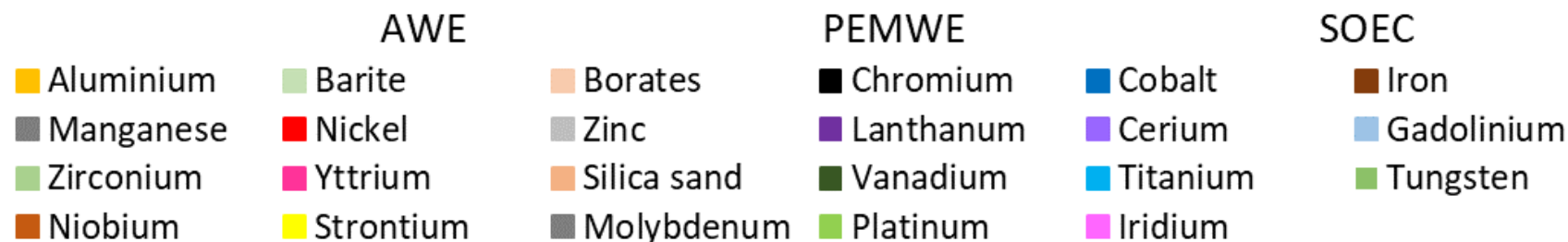
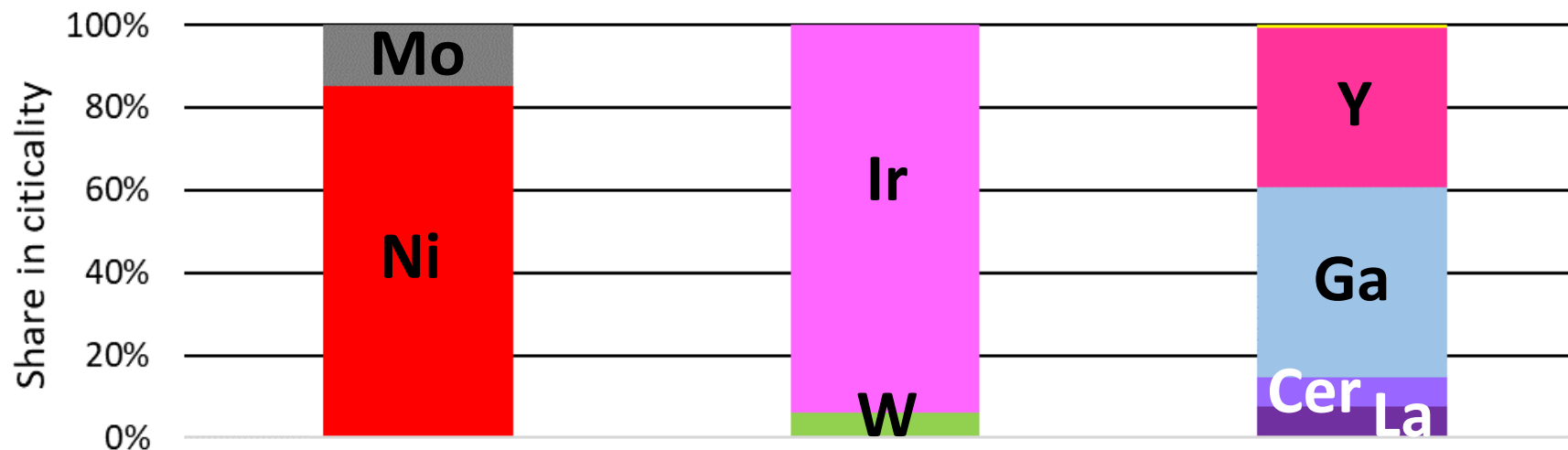
Kritikalitätsansatz nach JRC  
(Mancini et al. 2018)

Basierend auf dem EU CRM  
Ansatz:

- kombiniert Versorgungssicherheit (SR) und ökonomische Relevanz (EI)
- Materialien sind kritisch wenn  $SR \geq 1$  und  $EI \geq 2.8$
- Listen-Update alle 3 Jahre
- 34 CRM in 2023

Wichtige Einflussgrößen:

- Importabhängigkeit
- Politische Stabilität und Diversifizierung von Lieferländern
- Recyclingrate in EU
- Anteil am weltweiten Bedarf
- Substituierbarkeit



AWE alkalische Wasserelektrolyse,  
PEMWE Polymermembran Wasserelektrolyse,  
SOEC Festoxidelektrolyse



# Kritische Ressourcen für die Photovoltaik

## „Red Flags“ in PV-Zelltechnologien

### Silizium (Si)

- Basis Material in PV
- Hohe Marktkonzentration in China entlang der Wertschöpfungskette
- Soziale Risiken

### Silber (Ag)

- Ohne drastische Ressourceneffizienz könnte die Silbernachfrage für PV bis 2030 mehr als 80 % der derzeitigen weltweiten Silberproduktion einnehmen

### Indium (In)

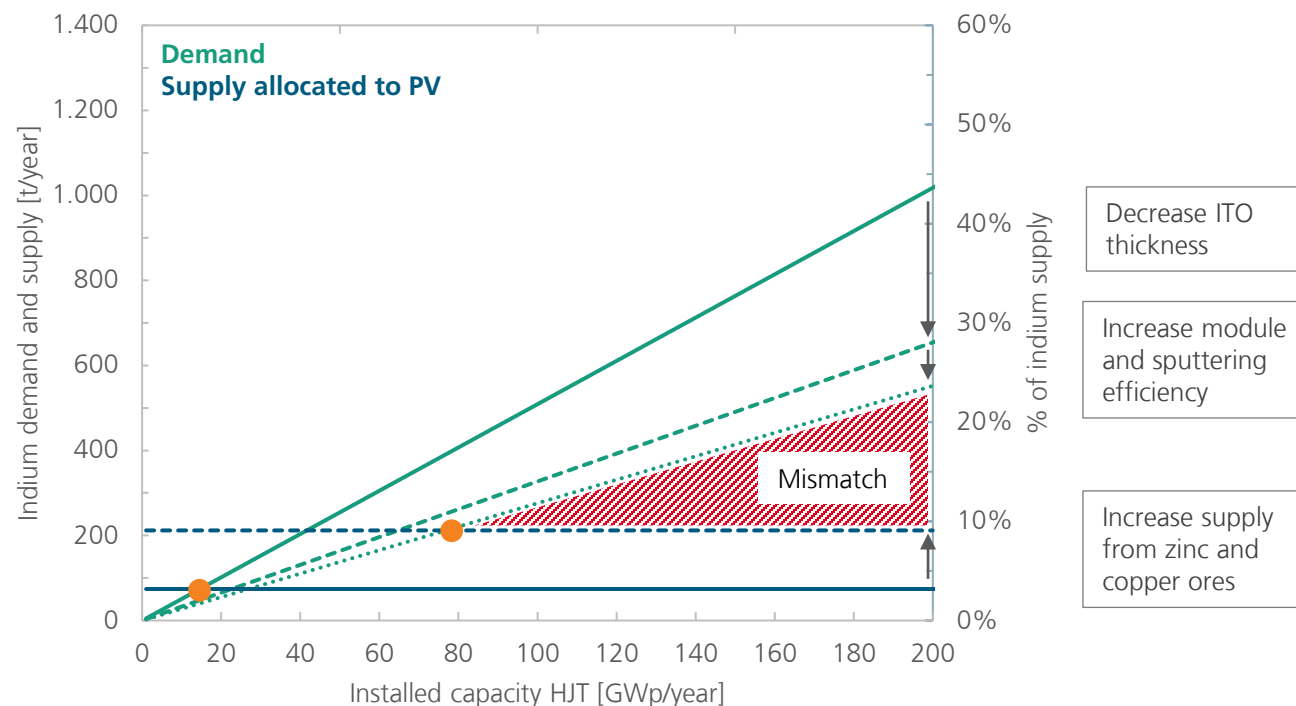
- In HJT verwendet
- Forschung für Substitutionsmöglichkeiten

### Kupfer (Cu)

- Insbesondere für das Stromnetz und Elektrofahrzeuge
- Seit 2023 ist Kupfer Teil der EU strategischen Rohstoffliste

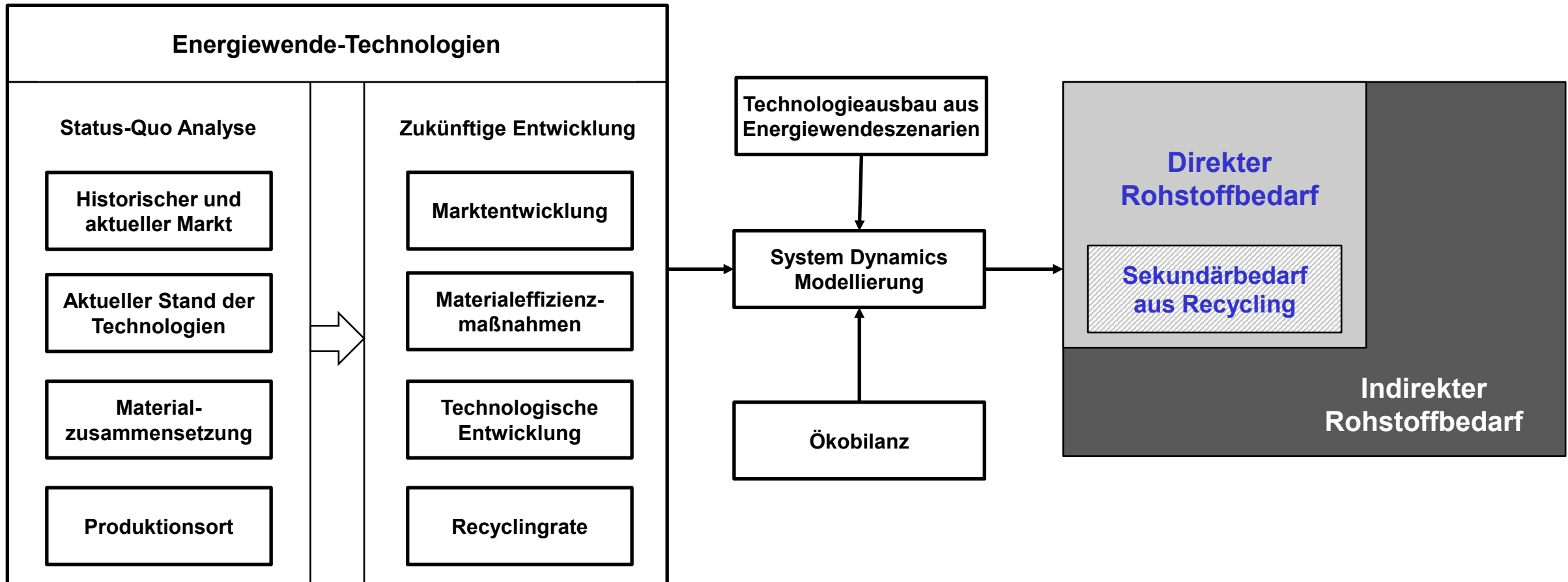
**Andere Risiken:** Gallium, Indium, Arsenic für III-V Solarzelle, Bismuth als Blei Substitut, Blei Toxizität in Perowskit

Demand vs. supply for indium in HJT<sup>1</sup>



# Möglichkeiten der Bewertung von Energieszenarien

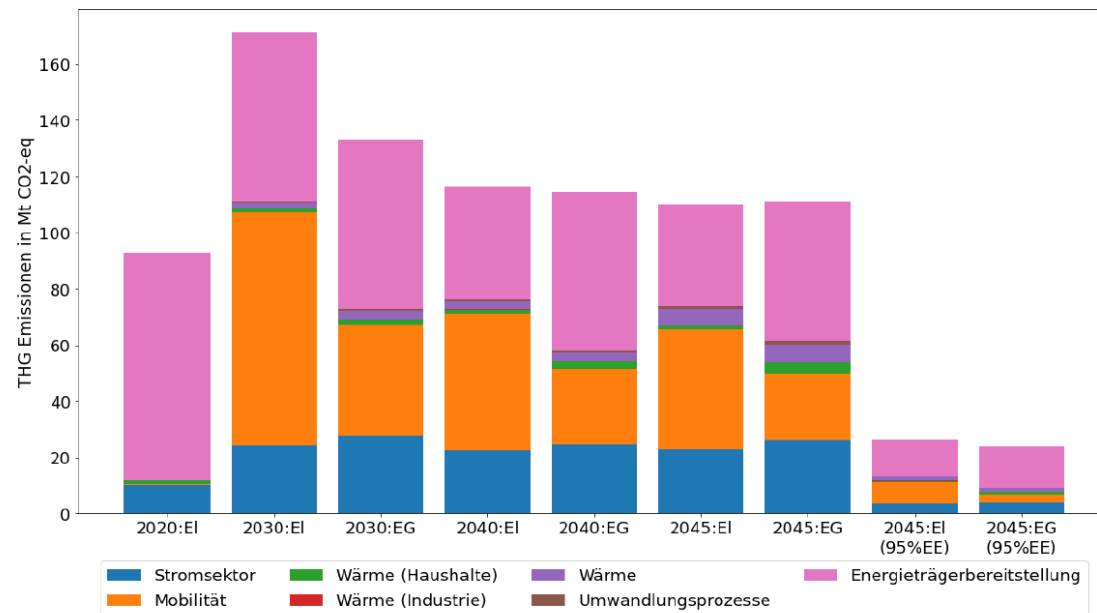
## Ex-post Quantifizierung der Ressourcenbedarfe durch System Dynamics



# Möglichkeiten der Bewertung von Energieszenarien

## Ex-post Quantifizierung der Ressourcenbedarfe durch LCA

### Treibhausgasemissionen für Herstellung und Entsorgung



### Materialbedarf

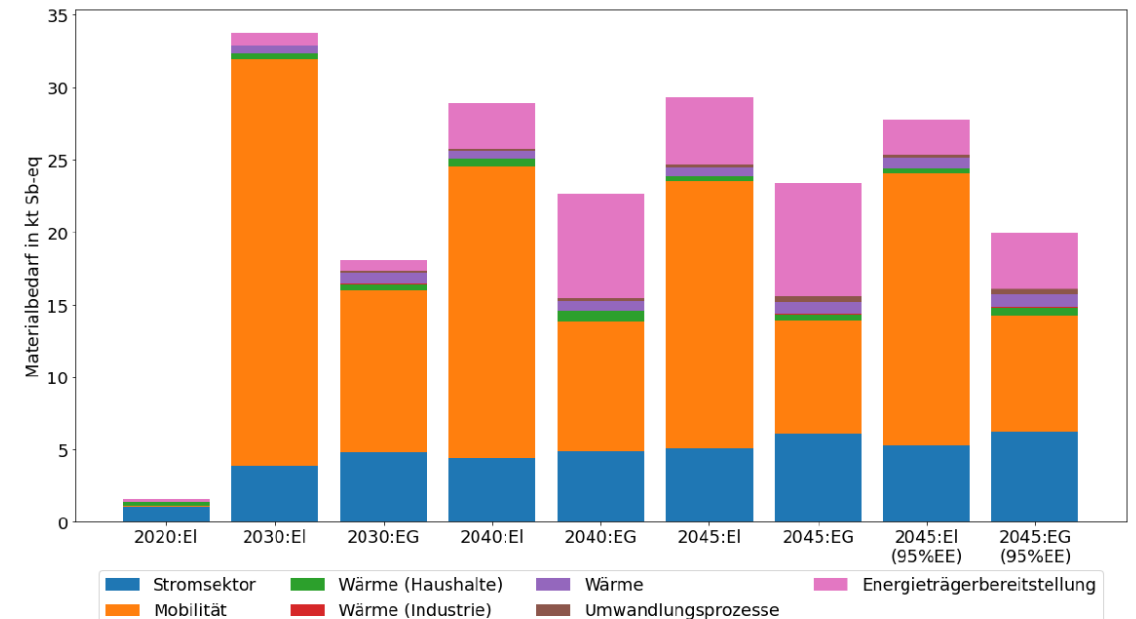
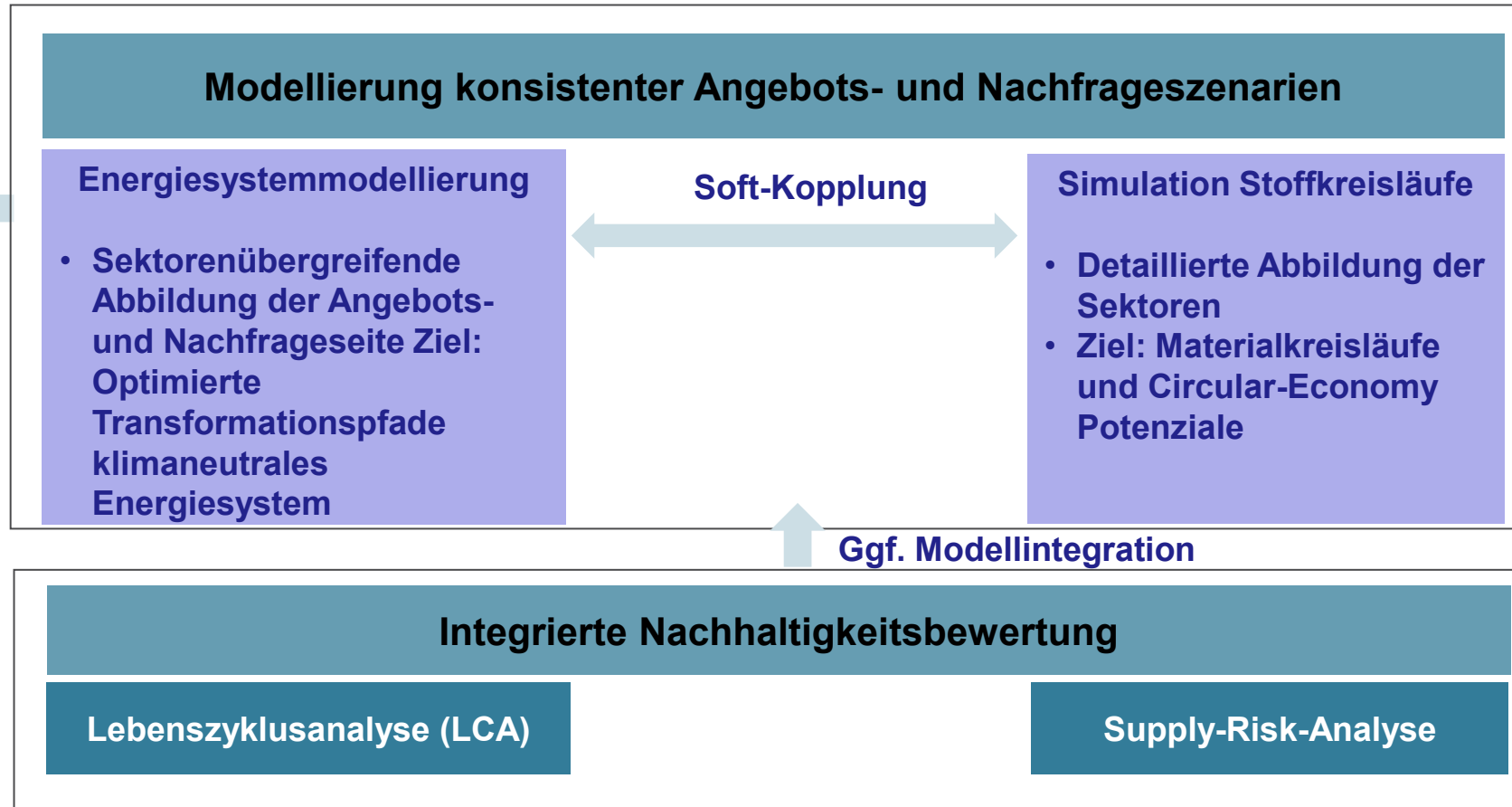


Abbildung: Abschlussbericht TransDE – Transformation der Infrastruktur Deutschlands bis zum Jahr 2050 im Einklang mit der Energiewende aller Verbrauchssektoren, [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/20230704\\_Abschlussbericht\\_TransDE\\_Final\\_Webseite\\_v3.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/20230704_Abschlussbericht_TransDE_Final_Webseite_v3.pdf)

# Konzeptidee zur Modellierung konsistenter Szenarien unter Berücksichtigung von Ressourcen

- Beispiele  
Übergabeparameter:
- Länderspezifische Materialbedarfe /
  - Emissionsintensitäten



detaillierte  
Bewertung einzelner  
Transformations-  
pfade

# Welche Rolle spielen Ressourcen in der Energiesystemanalyse

## ... aktuell und in der Zukunft?

### Aktuell:

- Zahlreiche Forschungsarbeiten zur Bewertung von Einzeltechnologien
- Ex-Post Bewertung von Energieszenarien durch LCA und System Dynamics

### Forschungsbedarf:

- Integrierte Betrachtung in der Energiesystemmodellierung/Klimaneutralitätsszenarien zur Abbildung von:
  - Materialbedarfen und deren Kritikalität (Verteilungsfragen)
  - Indirekte Emissionen
  - Materialeffizienz- und Substitutionsmöglichkeiten
  - Kreislaufwirtschaftspotenzialen

**Effizienz und Suffizienz spielen unter Betrachtung der hohen Ressourcenbedarfe und der Herausforderungen der hohen Transformationsanforderungen eine zentrale Rolle und sollten als Teil der Lösung mitbetrachtet werden.**

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

## Kontakt:

[Charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de](mailto:Charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de)

[Estelle.gervais@ise.fraunhofer.de](mailto:Estelle.gervais@ise.fraunhofer.de)

[p.zapp@fz-juelich.de](mailto:p.zapp@fz-juelich.de)