

# Weiterführende Informationen zum ESD Policy Brief „Die Energiewende integrativ denken“

Witold-Roger Poganietz (KIT), Patrick Jochem (DLR), Jürgen Kopfmüller (KIT), Felix Kullmann (FZJ), Tobias Naegler (DLR), Andrew Ross (FZJ), Volker Stelzer (KIT), Stefan Vögele (FZJ)

Kontakt: [s.voegele@fz-juelich.de](mailto:s.voegele@fz-juelich.de)



- In dieser Datei sind weiterführende Informationen zum ESD Policy Brief „Die Energiewende integrativ denken“ zu finden.  
Der Policy Brief und der Anhang können hier heruntergeladen werden:  
<https://energy.helmholtz.de/forschungshighlights/die-energiewende-integrativ-denken/>
- In diesen weiterführenden Informationen werden stichwortartig
  - die gewählte Vorgehensweise, sowie
  - die vorgestellten Ergebnisse detaillierter dargestellt.
- Die Folien basieren auf Vorträgen, die im Rahmen des „Helmholtz Energy Workshops: Energieszenarios weitergedacht“ am 13.10.2023 vorgestellt wurden. Für den Policy Brief wurden diese aktualisiert.

1. Integrative Szenarienanalyse im Helmholtz Programm Energiesystemdesign:  
Motivation und Vorgehensweise  
*Witold-Roger Pogonietz, Jürgen Kopfmüller*  
*Folien 5-13*
2. Kontextszenarien zur Rahmung sozio-technischer Szenarien  
*Witold-Roger Pogonietz, Stefan Vögele*  
*Folien 14-26*
3. Kopplung von Kontextszenarien mit Energiesystemmodellen  
*Tobias Naegler, Felix Kullmann*  
*Folien 27-37*
4. Beschreibung der sozio-ökonomischen Kontexte  
*Stefan Vögele, Witold-Roger Pogonietz*  
*Folien 38-55*

5. Ergebnisse der Energiesystemmodellierung

*Felix Kullmann, Tobias Naegler*

*Folien 56-67*

6. Wirkungsabschätzung auf Grundlage der techno-ökonomischen Szenarien

*Tobias Naegler, Stefan Vögele*

*Folien 68-82*

7. Wirkungsabschätzung auf Basis der Kontextszenarien

*Jürgen Kopfmüller, Witold-Roger Poganietz, Volker Stelzer*

*Folien 83-94*

8. Zusammenfassung und Ausblick

*Folien 95-98*

# Integrative Szenarienanalyse im Helmholtz Programm Energiesystemdesign: Motivation und Vorgehensweise

Witold-Roger Pogonietz, Jürgen Kopfmüller (beide KIT-ITAS)

# Motivation – Integrative Szenarienanalyse

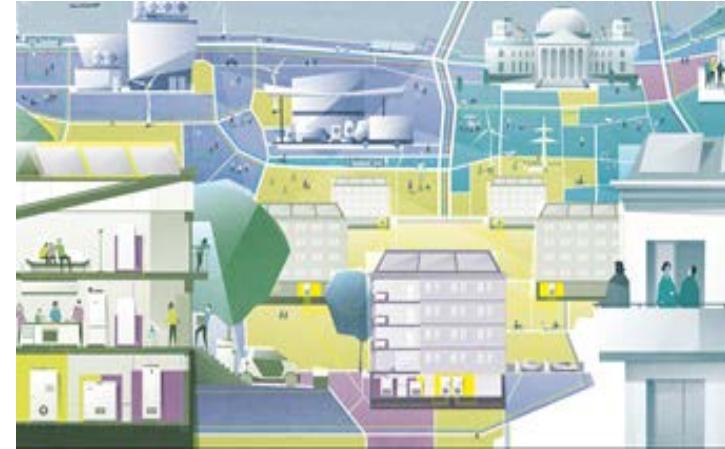
- Das Energiesystem
  - ist ein sozio-technisches System, und
  - soll einen essenziellen Beitrag zur „Großen Transformation“ in Richtung Nachhaltigkeit leisten

➔ Notwendigkeit von wissenschaftlichem Orientierungswissen

➔ Szenarienanalyse und -bewertung als ein Kernelement

➔ Adressierung technischer, ökonomischer, gesellschaftlicher, umweltbezogener Aspekte:

- zur Analyse: Erstellung sozio-technischer Szenarien,
- zur Bewertung: Durchführung von Wirkungsabschätzungen und darauf aufbauend eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbetrachtung



<https://www.kopernikus-projekte.de/vision>

# Sozio-technische Szenarienanalyse – zentrale Begrifflichkeiten

## Kontextszenarien

Konsistente, primär qualitative, Beschreibung des politischen, ökonomischen und sozialen Umfeldes, in dem sich die Transformation des Energiesystems abspielt

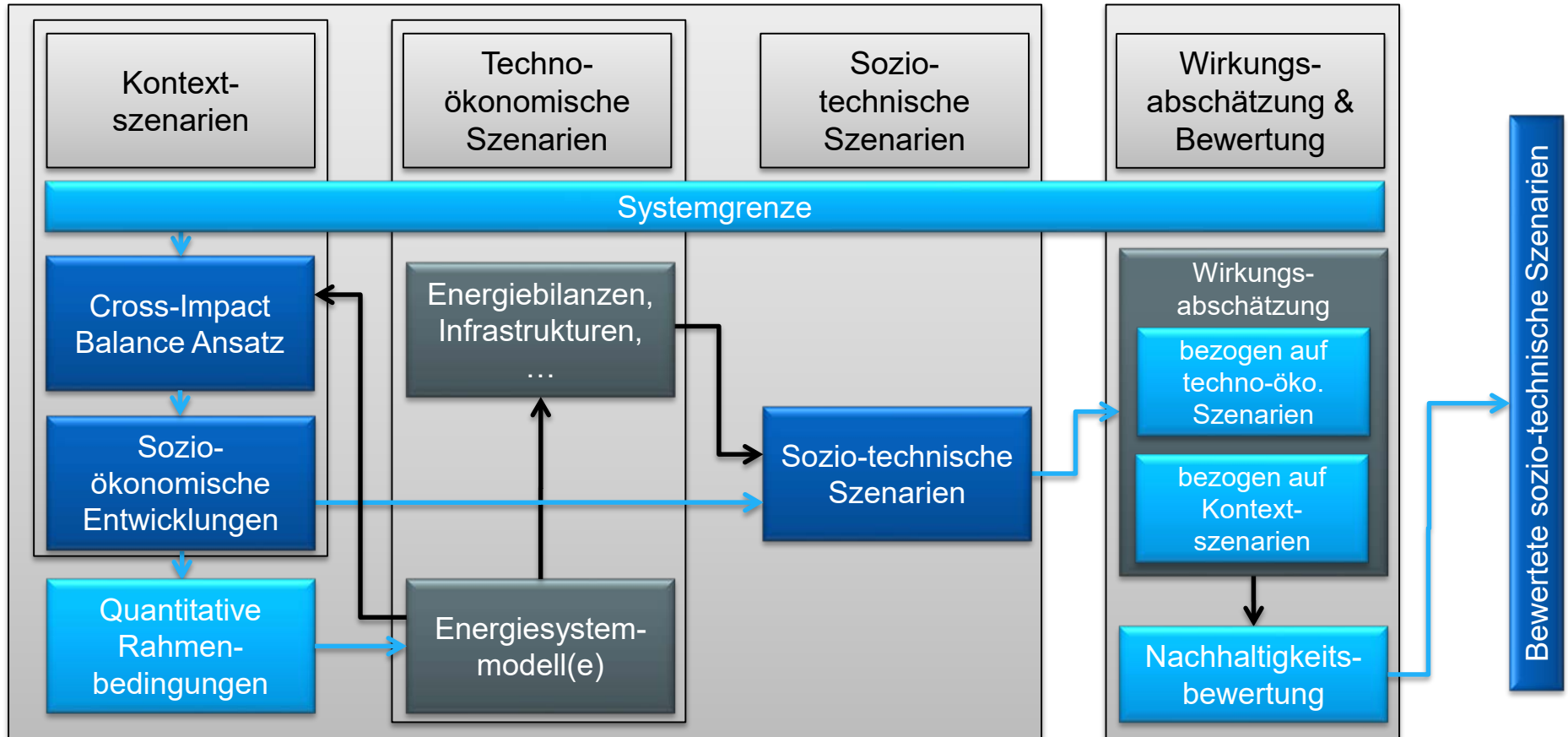
## Techno-ökonomische Szenarien

Konsistente, quantitative Beschreibung der techno-ökonomischen Transformation des Energiesystems

## Sozio-technische Szenarien

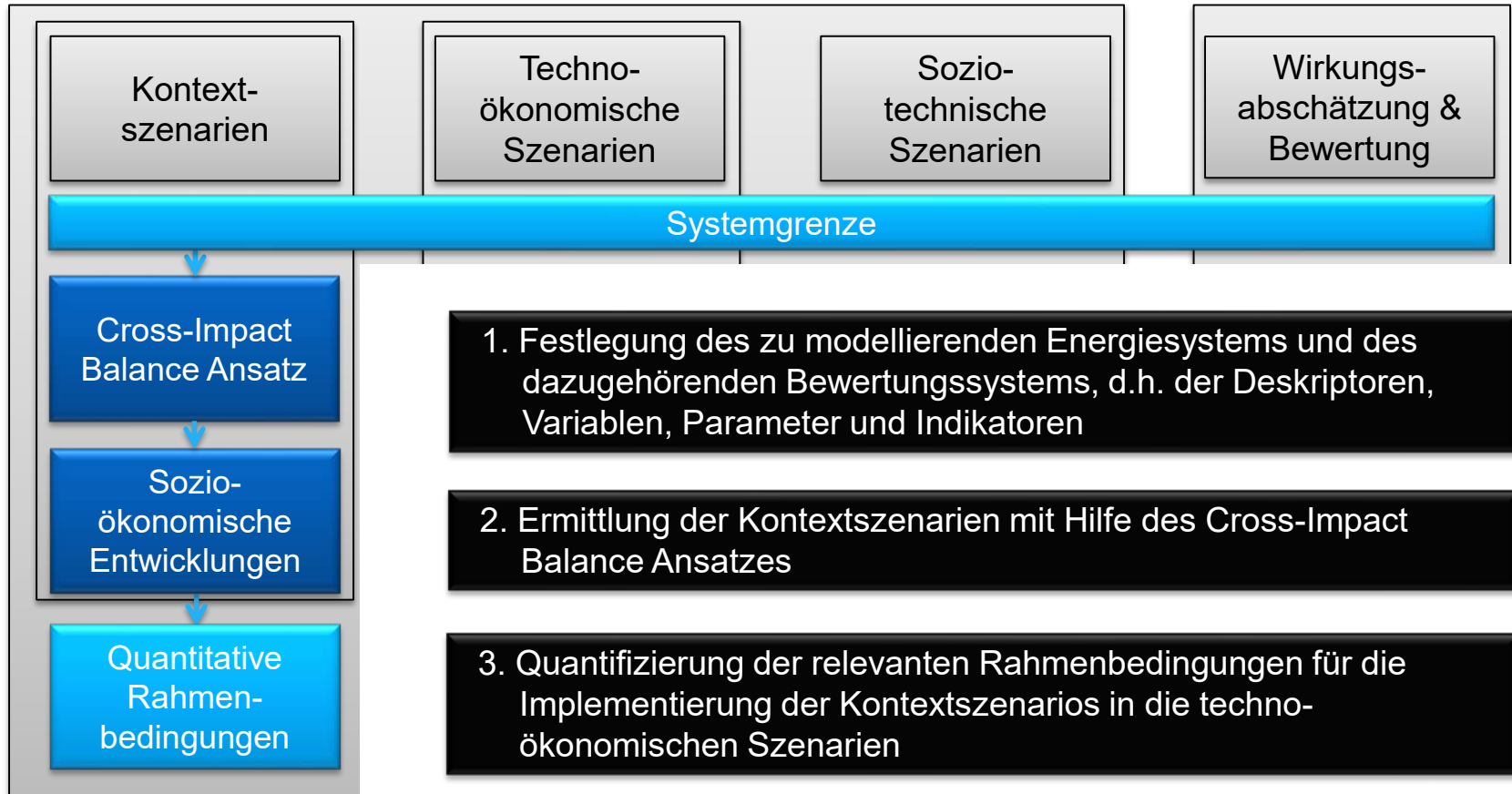
Plausible, in sich konsistente Beschreibung des Energiesystems als ein sozio-technisches System, d.h. die Interdependenzen zwischen Technik, Ökonomie und Gesellschaft werden explizit beachtet

# Überblick über den gewählten Ansatz – Entwicklung, Analyse und Bewertung von sozio-technischen Szenarien

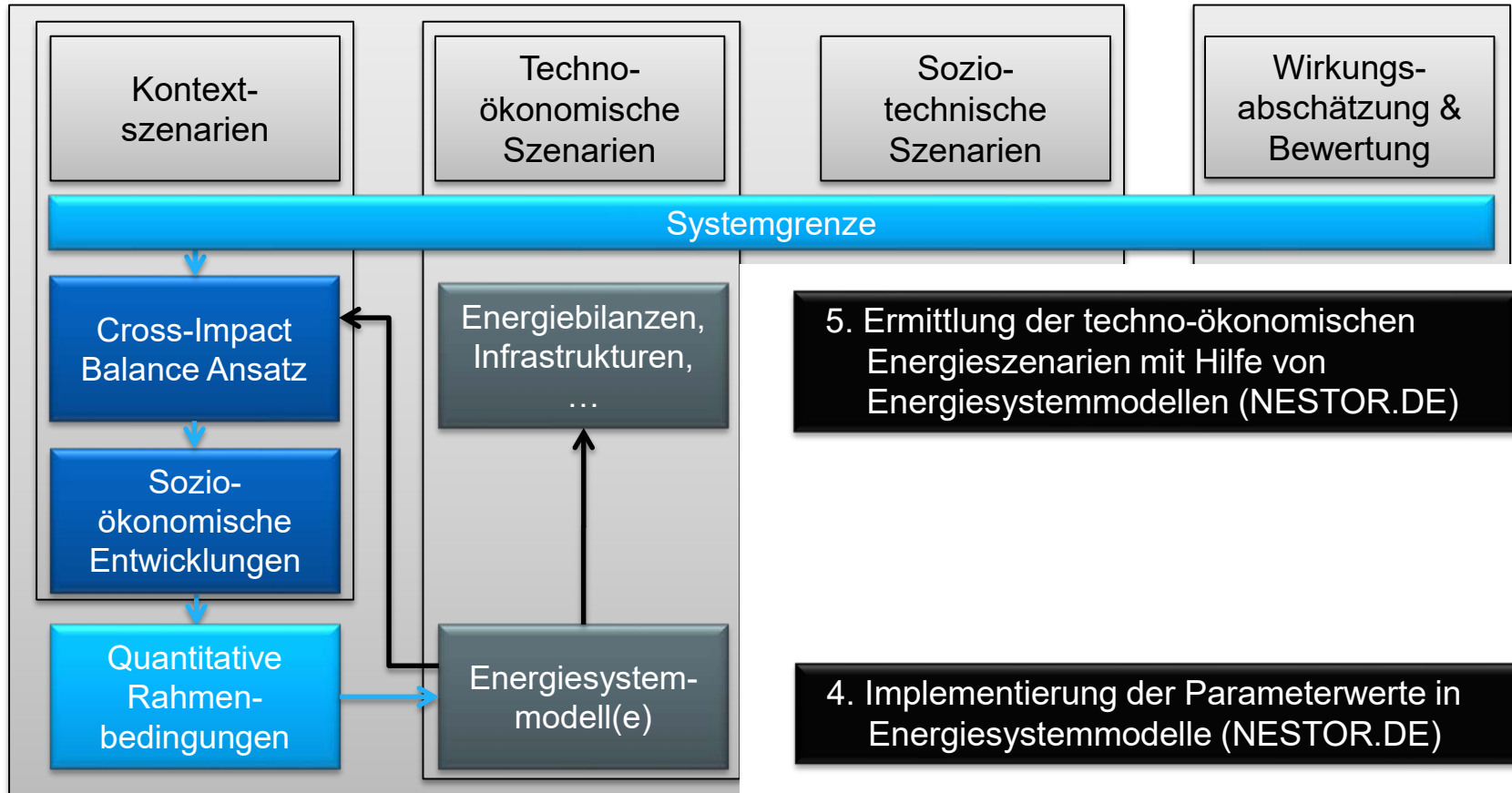




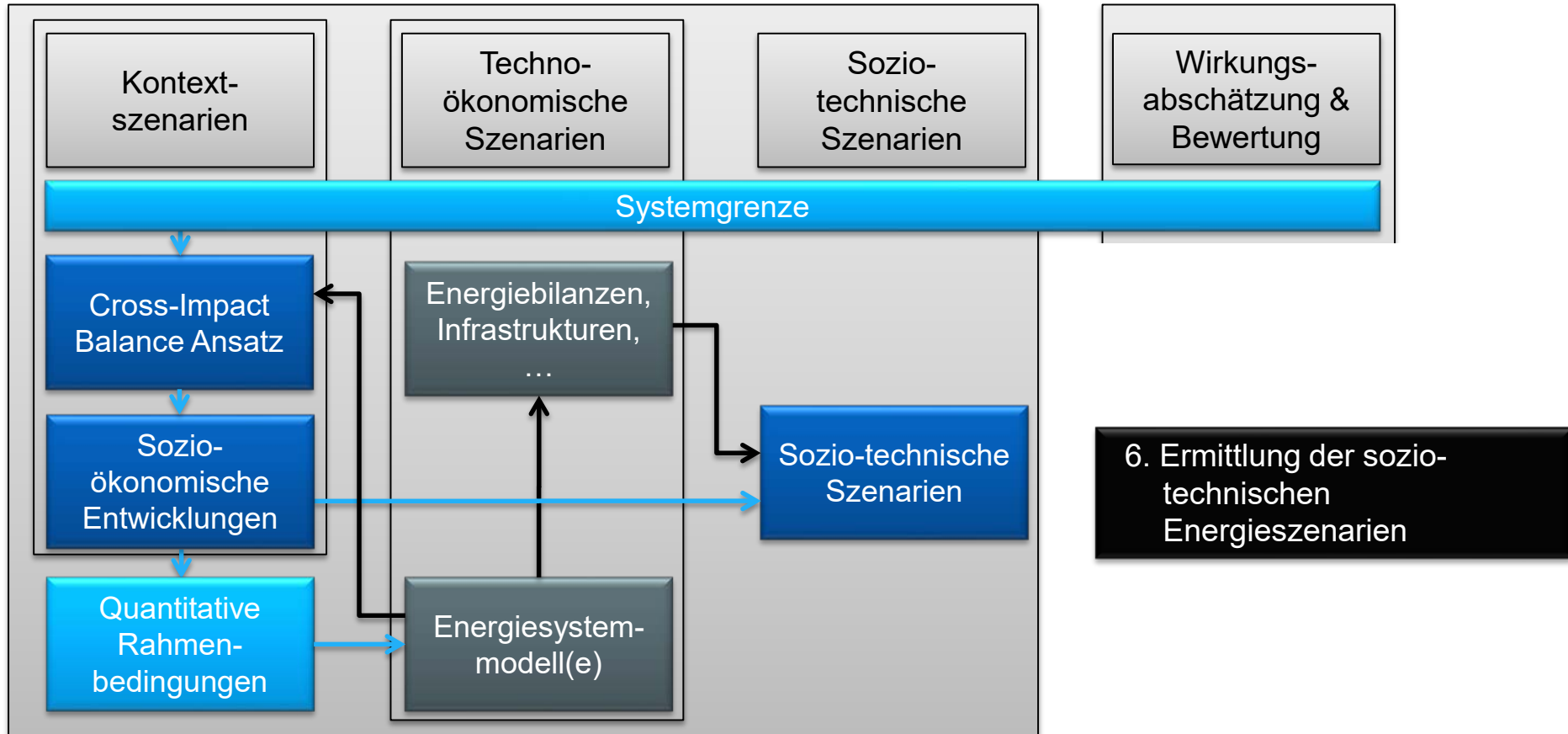
# Vorgehen (I)



# Vorgehen (II)



# Vorgehen (III)



# Vorgehen (IV)



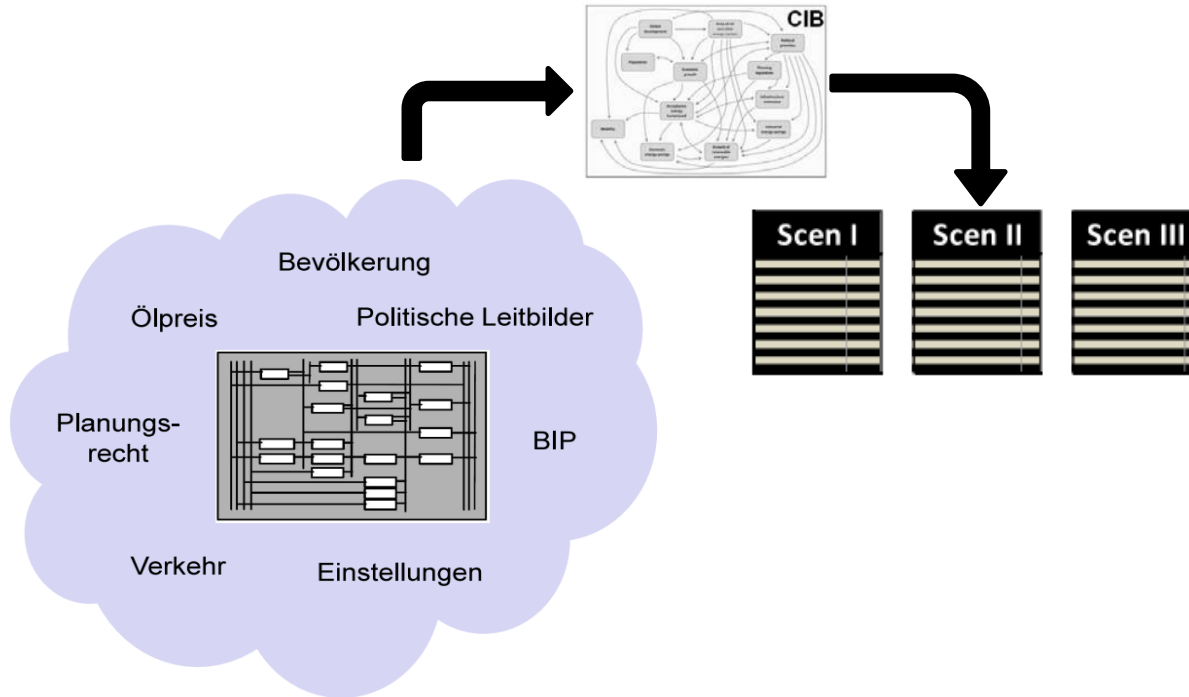
- Ganzheitliche Darstellung und Analyse des transformierenden Energiesystems
    - Nationale und globale sozio-ökonomische Dynamiken (Werthaltungen, Politiklinien, Bildung, geopolitische Entwicklungen, ...) einschließlich deren Unsicherheiten
    - Interdependente und konsistente Einbettung des „techno-ökonomischen Energiesystems“ in die sozio-ökonomische Rahmung
  - Ganzheitliche Wirkungsabschätzung und Nachhaltigkeitsbewertung
    - Umfassende Wirkungsabschätzung, die neben techno-ökonomischen und umweltbezogenen auch soziale Wirkungen berücksichtigt
    - Ganzheitliche Bewertung möglicher zukünftiger sozio-technischer Energiesysteme
- ➡ Angemessen(er)e Breite der Darstellung und Bewertung (möglicher) zukünftiger Transformationsprozesse des Energiesystems und ihrer Wirkungen

# Kontextszenarien zur Rahmung sozio-technischer Szenarien

Witold-Roger Pogonietz (KIT-ITAS), Stefan Vögele (FZJ-ICE-2)

- Technologische Entwicklung:  
Nicht nur das Ergebnis einer rein betriebswirtschaftlichen Optimierung
  - Entwicklungen sind in einem Kontext einzuordnen
  - Das Verstehen und Modellieren von Transformationsprozesse erfordert die Berücksichtigung schwer quantifizierbarer Faktoren inkl. ihrer Interaktion
- ➔ Einsatz Cross-Impact Balance (CIB) Analyse

# Vorgehensweise – Cross-Impact Balance Analyse (I)



Quelle: nach Weimer-Jehle (2017)



# Vorgehensweise – Cross-Impact Balance Analyse (II)

## 1. Festlegung Systemgrenze und Auswahl relevanter Deskriptoren



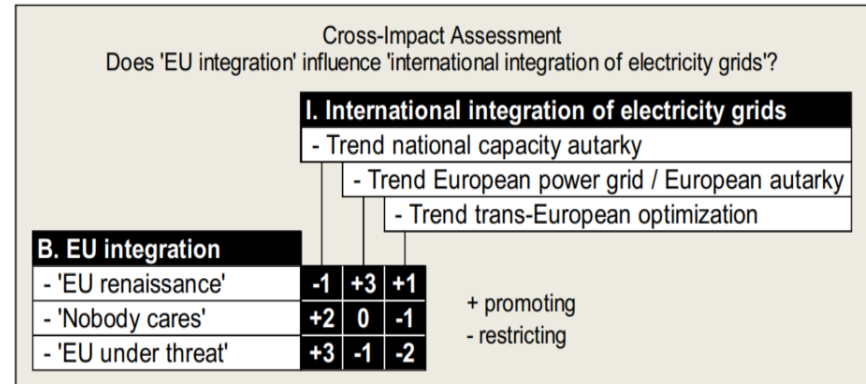
## 2. Festlegung möglicher Ausprägungen (Varianten)

A. Globale Entwicklung	A1 Konvergenz und Prosperität	A2 Divergenz
B. Ölpreis	B1 moderat steigend	B2 stark ansteigend
C. Bevölkerung	C1 schwach sinkend	C2 stark sinkend
D. Wirtschaftliche Entwicklung	D1 schwach	D2 stark
E. Politische Priorität	E1 Energiewende	E2 Energiesicherheit
F. Akzeptanz Energiewende	F1 Skeptizismus	F2 Zustimmung
G. Planungsrecht	G1 inkohärent	G2 Förderung Umbau

## 3. Konkretisierung der Wechselbeziehung

- Förderung bzw. Hinderung von Ausprägung eines Deskriptors durch andere Ausprägung eines anderen Deskriptors
- Bewertung des Einflusses aus einer ganzzahligen Skala (-3, ..., +3)

Beispiel:



## 4. Identifizierung konsistenter (widerspruchsfreier) Szenarien

**Ein Set an Deskriptor-Varianten ist konsistent, wenn es keine Deskriptor-Variante gibt, die eher bevorzugt wird.**

	A		B2		C	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
<b>A. Umweltschutz</b>						
A1 schwach			0	0	3	-3
A2 stark			0	0	-3	3
<b>B. Tourismus</b>						
B1 niedrig	0	0			-1	1
B2 hoch	0	0			1	-1
<b>C.Zustand Umwelt</b>						
C1 schlecht	-1	1	3	-3		
C2 gut	0	0	-3	3		
	0	0	-3	3	-3	4

Gewähltes Set (A2, B1, C2)

==> Es spricht mehr für B2 als für B1  
(Auftreten von Variante B2 wird stärker  
unterstützt als das Auftreten von B1)

==> **Set (A2, B1, C2) ist inkonsistent**

	A		B2		C	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
<b>A. Umweltschutz</b>						
A1 schwach			0	0	3	-3
A2 stark			0	0	-3	3
<b>B. Tourismus</b>						
B1 niedrig	0	0			-1	1
B2 hoch	0	0			1	-1
<b>C.Zustand Umwelt</b>						
C1 schlecht	-1	1	3	-3		
C2 gut	0	0	-3	3		
	0	0	-3	3	-3	4

Gewähltes Set (A2, B2, C2):

==> **Set (A2, B2, C2) ist konsistent**

# Auswahl relevanter Deskriptoren

- Ausgangspunkt: Deskriptoren aus Helmholtz-Projekt ENERGY-TRANS (2011-2016)
  - Befragung von Experten aus verschiedenen Bereichen und mit verschiedenen fachlichen Hintergründen
  - 67 Experteninterviews (Delphi)
- Aktualisierung möglicher Deskriptor-Ausprägungen (Varianten), um neuere Entwicklungen (z.B. im Bereich Demographie, klimapolitische Ziele) berücksichtigen zu können
- Systemgrenze: Deutschland im europäischen Kontext

Quelle: Pregger et al. (2019). Moving towards socio-technical scenarios of the German energy transition—lessons learned from integrated energy scenario building. *Climatic Change* (2020) 162:1743–1762. doi.org/10.1007/s10584-019-02598-0

---

# Konkretisierung

## **Internationale Faktoren**

A(I). Globale Entwicklung – Allgemeine Entwicklung

A(II). Globale Entwicklung – Weltmarktpreise für fossile Energieträger

A(III). Globale Entwicklung – Realer Zinssatz

B. EU-Integration

## **Nationale Faktoren / Allgemeine Entwicklung**

C. Bevölkerungsentwicklung

### **Nationale Faktoren / Sektor „Wirtschaft“**

D. BIP Entwicklung

E. Arbeitsmarktentwicklung

F. Tertiärisierung der Wirtschaft

G. Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft

H. Transnationale Handelsströme

I. Internationale Verflechtung der Stromnetze

J. Infrastrukturentwicklung der Stromnetze

K. Ausbau Erneuerbarer Energien (Strom)

L. Tendenz Zentralität/Dezentralität der Stromerzeugung und -speicherung

M. Marktordnung Strommarkt

### **Nationale Faktoren / Sektor „Politik“**

N. Politikstabilität im Bereich Energie

O. Steuerungsinstrumente im Bereich Energie

P. Governance im Infrastrukturausbau

Q. Planungsrecht / Öffentliche Infrastrukturplanung

R. Staatliche Gestaltungsziele

S. Sozialstaatliche Entwicklung



### **Nationale Faktoren / Sektor „Gesellschaft“**

T. Wohlstandsentwicklung

U. Technikakzeptanz gegenüber Energietechnologien

V. Individuelles Energieverbrauchsverhalten

W. Bildungsentwicklung

### **Nationale Faktoren / Sektor „Kultur“**

X. Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende / NIMBY

Y. Werteorientierung und Zielvorstellungen zum Wirtschaftsdesign

Z. Medialer Diskurs

## 11 weitere „passive“ Deskriptoren

Passive Deskriptoren dienen zur Kopplung der Kontextszenarien mit der techno-ökonomischen Modellierung

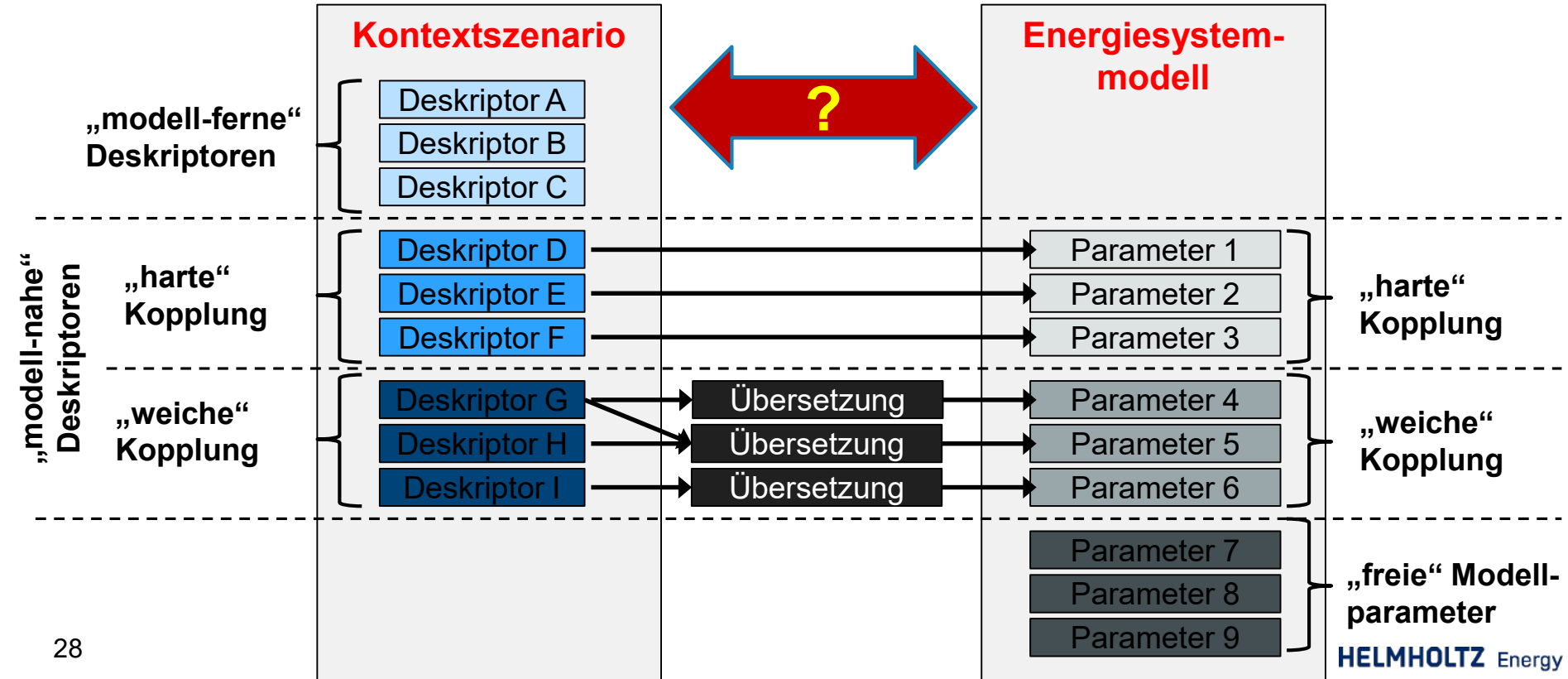
### Deskriptoren

- a. Verbrauchsentwicklung – Haushaltsgeräte
- b. Effizienzentwicklung – Elektrische Fahrzeuge
- c. Effizienzentwicklung – Verbrennungsmotoren
- d. Renovierungsrate/ -tiefe
- e. Effizienzentwicklung – Industrie
- f. Effizienzentwicklung – Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
- g. Netzgebundene Wärmeversorgung
- h. Investitionen in neue Fahrzeugkonzepte und Infrastrukturen
- i. Wohnfläche
- j. Ausbau von erneuerbaren Energien (Wärme)
- k. Energienachfragebezogener Reboundeffekt privater Haushalte

# Kopplung von Kontextszenarien mit Energiesystemmodellen

Tobias Naegler (DLR-VE), Felix Kullmann (FZJ-ICE-2)

# Kopplung von Kontextszenarien mit ESMs: Prinzip



- 1) Identifikation von exogen vorzugebenden Parameter für das Energiesystemmodell
- 2) Diskursive Festlegung „modell-naher“ Kontextdeskriptoren: Auswahl-Kriterien (u.a.)
  - Deskriptor beschreibt zentrale Eingangsgröße des Modells („harte Kopplung“)
  - Aus Deskriptor(en) können zentrale Eingangsgrößen des Modells abgeleitet werden („weiche Kopplung“)

Zu berücksichtigende Randbedingungen:

- Limitierte Anzahl von Deskriptoren insgesamt („modell-nah“ + „modell-fern“)
- Ausreichende Anzahl wohl überlegter Deskriptoren für den „modell-fernen“ Kontext als „Kleister“ für die „Geschichte“ des Kontextszenarios

**Auswahl der CIB-Deskriptoren unter Berücksichtigung der Bedürfnisse des Modells → Konsistenz zwischen Kontextszenario und techno-ökonomischer Modellierung**

# „Modell-nahe“ Deskriptoren (→ Randbedingungen Modell)

		Deskriptor	Einheit
Internationale Faktoren		A(I) Globale Entwicklung – Allgemeine Entwicklung	
		A(II) Globale Entwicklung – Weltmarktpreise für fossile Energieträger	\$/bbl.
		A(III) Globale Entwicklung – Zinsentwicklung	%
Nationale Faktoren	General	B EU-Integration	
		C Bevölkerungsentwicklung	Million
		D BIP Entwicklung	%/p.a.
		E Arbeitsmarktentwicklung	
	Ökonomie	F Tertiärisierung der Wirtschaft	
		G Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft	
		H Transnationale Handelsströme	
		I Internationale Verflechtung der Stromnetze	
		J Infrastrukturentwicklung der Stromnetze	
		K Ausbau Erneuerbarer Energien (Strom)	TWh/a
		L Tendenz Zentralität/Dezentralität der Stromerzeugung und -speicherung	
		M Marktordnung Strommarkt	
	Politik	N Politikstabilität im Bereich Energie	
		O Steuerungsinstrumente im Bereich Energie	
		P Governance im Infrastrukturausbau	
		Q Planungsrecht / Öffentliche Infrastrukturplanung	
		R Staatliche Gestaltungsziele	
	Gesellschaft	S Sozialstaatliche Entwicklung	
		T Wohlstandsentwicklung	
		U Technikakzeptanz gegenüber Energietechnologien	
V Individuelles Energieverhaltensverhalten			
Kultur	W Bildungsentwicklung		
	X Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende / NIMBY		
	Y Werteorientierung und Zielvorstellungen zum Wirtschaftsdesign		
	Z Mediäler Diskurs		
Passive Deskriptoren für das Energiesystem	a Effizienzentwicklung – Haushaltsgeräte	%/a	
	b Effizienzentwicklung – Elektrische Fahrzeuge	%/a	
	c Effizienzentwicklung – Verbrennungsmotoren	%/a	
	d(I) Renovierungsrate – Wohngebäude	%/a	
	d(II) Renovierungstiefe – Wohngebäude	%	
	e Effizienzentwicklung – Industrie	%/a	
	f Effizienzentwicklung – Gewerbe, Handel und Dienstleistungen	%/a	
	g Netzgebundene Wärmeversorgung	%/a	
	h Investitionen in neue Fahrzeugkonzepte und Infrastrukturen	%/a	
	i Wohnfläche	m <sup>2</sup> /Person	
	j Ausbau von erneuerbaren Energien (Wärme)	TWh/a	
k Energienachfragebezogener Reboundeffekt privater Haushalte			

## • „Modell-nahe“ Deskriptoren:

- Energieträgerpreise, Zinsen
- Bevölkerung, Bruttoinlandsprodukt (BIP)
- Verbrauchsverhalten, Werteorientierung, Medialer Diskurs
- „passive“ Deskriptoren (Fokus Energiebedarf):
  - Sanierung Gebäudebestand
  - Effizienzentwicklung Haushaltsgeräte, Industrie, GHD, Fahrzeuge


## • Daraus ableitbare Randbedingungen für Modellierung:

- Wohnfläche, Energieverbrauch pro Wohnfläche
- Güterproduktion, Bruttowertschöpfung (BWS) einzelner Branchen
- Güter- und Personenverkehrsleistung / Modal Split



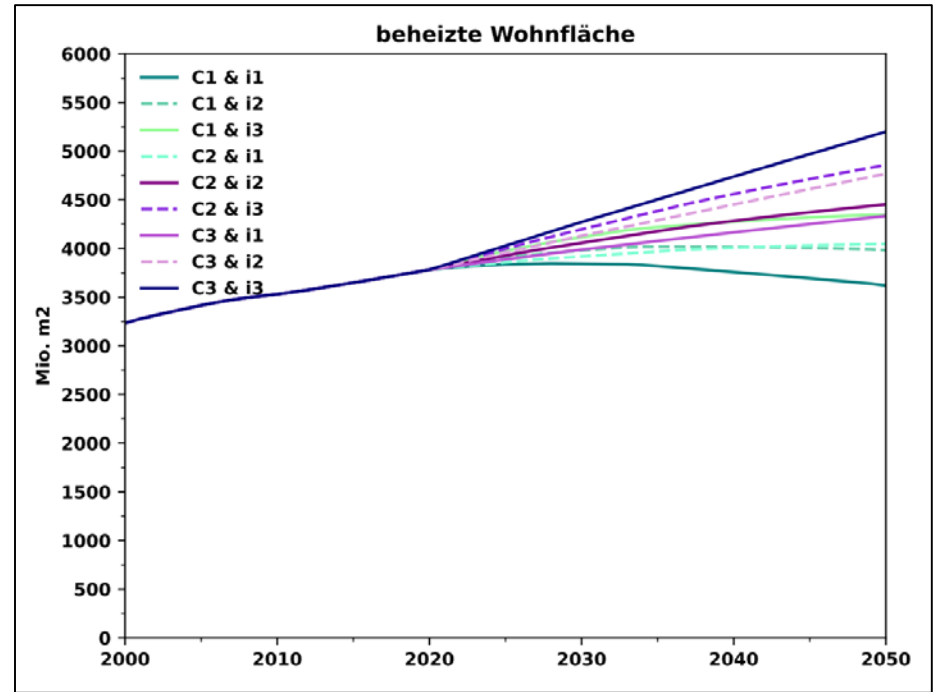
- **Energiebedarf** weitgehend durch Kontextszenario vorgegeben
- **Technologiemix** wird modellendogen **optimiert**

# Exogene Modellparameter, die von Kontext bestimmt werden

- Bevölkerung, BIP
  - Gebäude:
    - Wohnfläche
    - Raumwärmebedarf pro m<sup>2</sup>
  - Industrie:
    - Produktionsmengen ausgewählter Güter
    - BWS für ausgewählte Branchen
  - Verkehr:
    - Güter- und Personenverkehrsleistung
    - Modal Split
  - Kostenfaktoren:
    - Energieträgerpreise
    - Zinsen
- 
- Bedarf Energiedienstleistungen stark durch Kontextszenario vorgegeben
  - Technologiemicx wird modellendogen optimiert
  - Perspektivisch auch Vorgaben aus Kontextszenario bzgl. Technologiemicx bzw. Ausbaupotenzialen angedacht

# Beispiel: Beheizte Wohnfläche

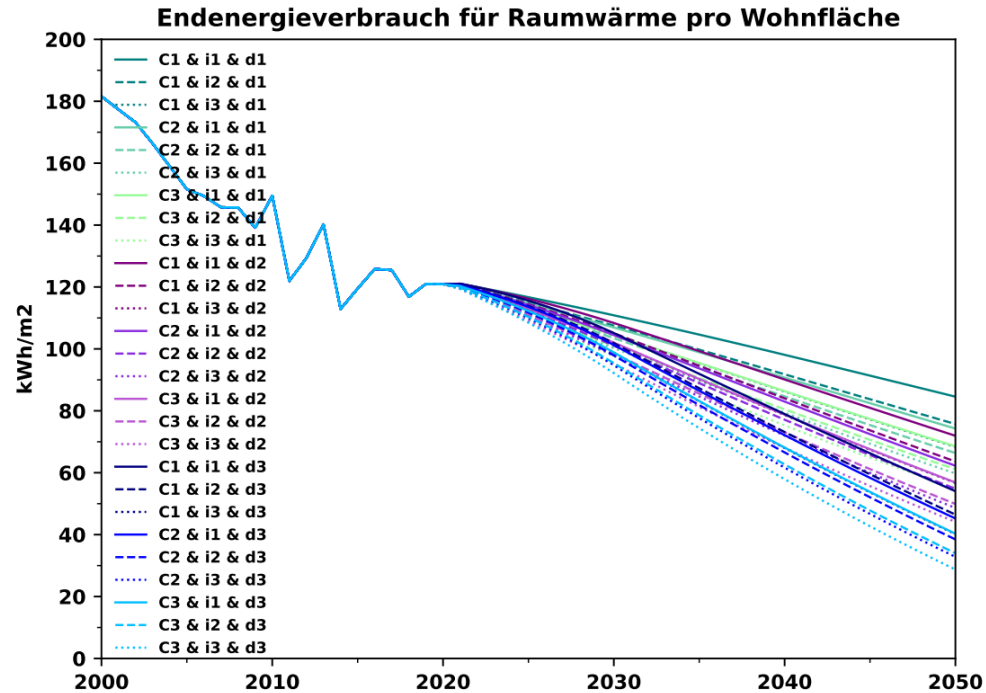
- Relevante Kontextdeskriptoren:
  - C. Bevölkerungsentwicklung
  - i. Wohnfläche (pro Kopf; Wohntrends)
- Quellen für zeitliche Entwicklung der Deskriptoren:
  - Bevölkerung: BMWK Energiedaten, Statistisches Bundesamt (12. und 14. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung)
  - Wohntrends: lineare Entwicklung heute (aus BMWK Energiedaten) bis Zieljahr angenommen





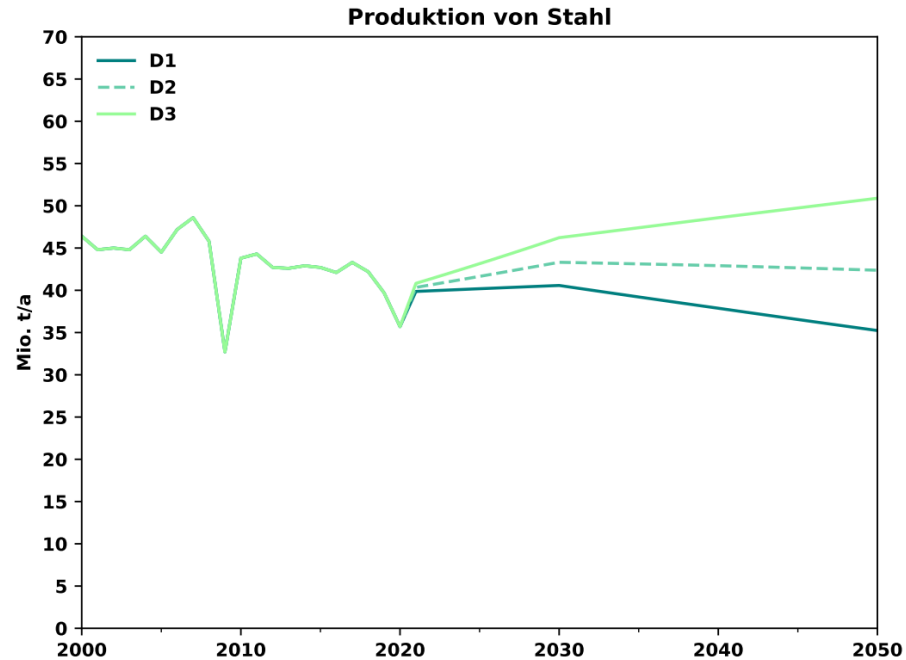
# Beispiel: Endenergieverbrauch Raumwärme pro Wohnfläche

- Relevante Kontextdeskriptoren:
    - C. Bevölkerungsentwicklung
    - i. Wohnfläche (pro Kopf; Wohntrends)
    - d. Sanierung Gebäudebestand
  - Quellen für zeitliche Entwicklung
    - Wohnfläche: siehe vorherige Folie
    - Sanierung Gebäudebestand: eigene Annahmen
- fließt in ein einfaches Gebäudemodell ein



# Beispiel: Produktion von Stahl

- Relevanter Kontextdeskriptor:
  - D. BIP-Entwicklung
- Zeitliche Entwicklung bis Zieljahr
  - BIP: Berechnung über Deskriptor-annahmen (Wachstum pro Jahr)
  - Weitere Annahmen:
    - Fortschreibung Trend Verhältnis BWS-BIP (aus BMWK Energiedaten)
    - Anteile einzelner Branchen an BWS (Verarbeitendes Gewerbe) aus BMWK Langfristszenarien 2021
    - Verhältnis Stahlproduktion zu BWS Stahlbranche aus BMWK Langfristszenarien 2021

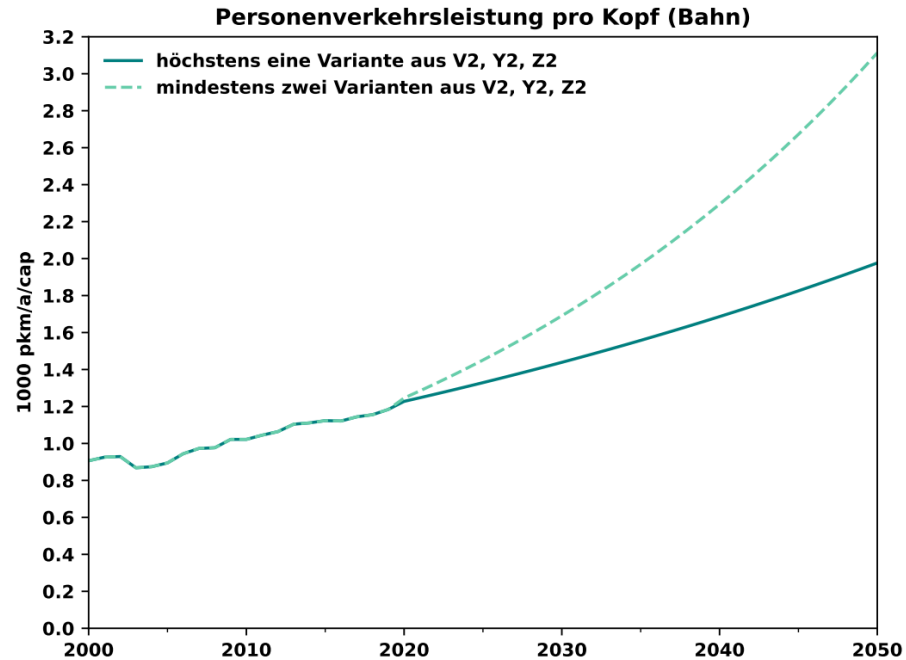


BMWK Energiedaten: [Energiedaten – Gesamtausgabe \(Stand 20.1.2022\)](#)

BMWK Langfristszenarien 2021: [Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland](#)

# Beispiel: Pro-Kopf-Verkehrsleistung Bahn

- Relevante Kontextdeskriptoren:
  - V. Individuelles Energieverhaltensverhalten
  - Y. Werteorientierung und Zielvorstellungen zum Wirtschaftsdesign
  - Z. Medialer Diskurs
- Zielwerte 2050 und zeitlicher Verlauf:  
Eigene Annahmen auf Basis von dena (2021), Agora Energiewende (2021), BMWK Langfristszenarien (2021)



Agora Energiewende 2021: [Klimaneutrales Deutschland 2045](#)

BMWK Langfristszenarien 2021: [Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland](#)

dena 2021: [dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität](#)

## Weitere mögliche Limitierungen durch Deskriptoren auf Modellparameter

- Importmengen und/oder Importkosten  $H_2$  könnten abhängen von:
  - A(I). Globale Entwicklung – Allgemeine Entwicklung
  - B. EU-Integration
  - H. Transnationale Handelsströme
  - ...
- Nationale Ausbaupotenziale Wind, Wärmepumpen könnten abhängen von:
  - U. Technikakzeptanz gegenüber Energietechnologien
  - X. Einstellung Bevölkerung zur Energiewende / NIMBY
  - ...

Oft keine einfache Lösung, wie Modellparameter aus den Kontextdeskriptoren abgeleitet werden können → ExpertInnenwissen gefragt!

- Auswahl Kontextdeskriptoren erfolgt idealerweise immer in Abstimmung mit zu koppelndem Energiesystemmodell
- Ziel: Kontextdeskriptoren bestimmen zentrale dem Modell exogen vorzugebene Größen  
→ techno-ökonomische Modellierung folgt „Geschichte“ des Kontextszenarios
- Kopplung kann „hart“ oder „weich“ erfolgen
  - „hart“: Deskriptor entspricht weitgehend Modellinputgröße
  - „weich“: Modellinput berechnet sich aus einem Deskriptor/ aus mehreren Deskriptoren („Übersetzung“)
- „Übersetzung“ kann unterschiedlich komplex sein, berücksichtigt ggf.
  - Weitere eigene Submodelle
  - Ergebnisse externer Studien
  - ExpertInneneinschätzungen

# Beschreibung der sozio-ökonomischen Kontexte

Stefan Vögele (FZJ-ICE-2), Witold-Roger Poganietz (KIT-ITAS)

- Über 1500 konsistente Kombination von Kontexten → Auswahl erforderlich
- Ziel: Aufzeigen von Bandbreiten
- Vorauswahl potenziell zielerfüllender Szenarien mittels eines einfachen Szenarientools

# Vorbemerkungen

- Clusterung nach Szenarien mit moderatem, niedrigem und hohem Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum
- Weiterer Auswahlschritt: Wahl möglichst unterschiedlicher Szenarien
- Zusätzlich Auswahl eines Szenario mit hohem Grad an Nachhaltigkeit

<b>Kontext-szenario</b>	<b>Allgemeine Beschreibung/Leitgedanke</b>
MEAN	Moderate Entwicklung von Wirtschaft und Bevölkerung
NH_max	Fokus: Hoher Grad an Nachhaltigkeit
LO	Niedriges Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum
HI	Starkes Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum



# Ausgewählte sozio-ökonomischen Kontexte

(Grün: direkter Link zu techno-ökonomischem Modell, Gelb: Änderung gegenüber MEAN)

	MEAN	NH_max	LO	HI
<b>Globale Entwicklung – Allgemeine Entwicklung</b>	Fortress World	Fortress World	Fortress World	Market Forces
<b>EU-Integration</b>	EU Renaissance	EU Renaissance	EU under threat	Nobody Cares
<b>Bevölkerungsentwicklung</b>	Geringer Rückgang	Moderater Zuwachs	Starker Rückgang	Moderater Zuwachs
<b>BIP-Entwicklung</b>	Moderate Entwicklung	Starke Entwicklung	Schwache Entwicklung	Starke Entwicklung
<b>Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft</b>	Gleichbleibend	Steigend	Fallend	Steigend
<b>Transnationale Handelsströme</b>	Europäisches Deutschland – Fokus Dienstleistungen	Europäisches Deutschland	Renationalisierung	Europäisches Deutschland – Fokus Dienstleistungen
<b>Internationale Verflechtung der Stromnetze</b>	Trend zu stärkerem europäischen Stromverbund	Trend zu stärkerem europäischen Stromverbund	Trend zu stärkerem europäischen Stromverbund	Trend zur nationalen Leistungsautarkie
<b>Individuelles Energieverhaltensverhalten</b>	Trend zur Technikaffinität	Trend zur Technikaffinität	Trend zur Sparsamkeit	Trend zur Technikaffinität
<b>Werteorientierung ...</b>	Trend zu Differenzierung	Trend zu Postmaterialismus	Trend zu Materialismus und Leistung	Trend zu Materialismus und Leistung

- **Globale Entwicklung – Allgemeine Entwicklung:** Wachsende Ungleichheiten, steigender Ressourcenbedarf, bewaffnete Konflikte werden häufiger
- **EU-Integration:** Europäische Integration schreitet voran
- **Relativ geringer Bevölkerungsrückgang** (-2,4 Mio. gegenüber 2022)
- **BIP-Entwicklung:** Moderate Entwicklung (+1,2 % p.a.)
- **Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft:** weiterhin gut, aber nicht herausragend, bleibt auf dem aktuellen Niveau
- **Transnationale Handelsströme:** Bedeutung der internationalen Handelsverflechtung steigt, vor allem durch Ausweitung der EU-internen Handelsverflechtungen, aber mit einem Schwerpunkt auf Dienstleistungen

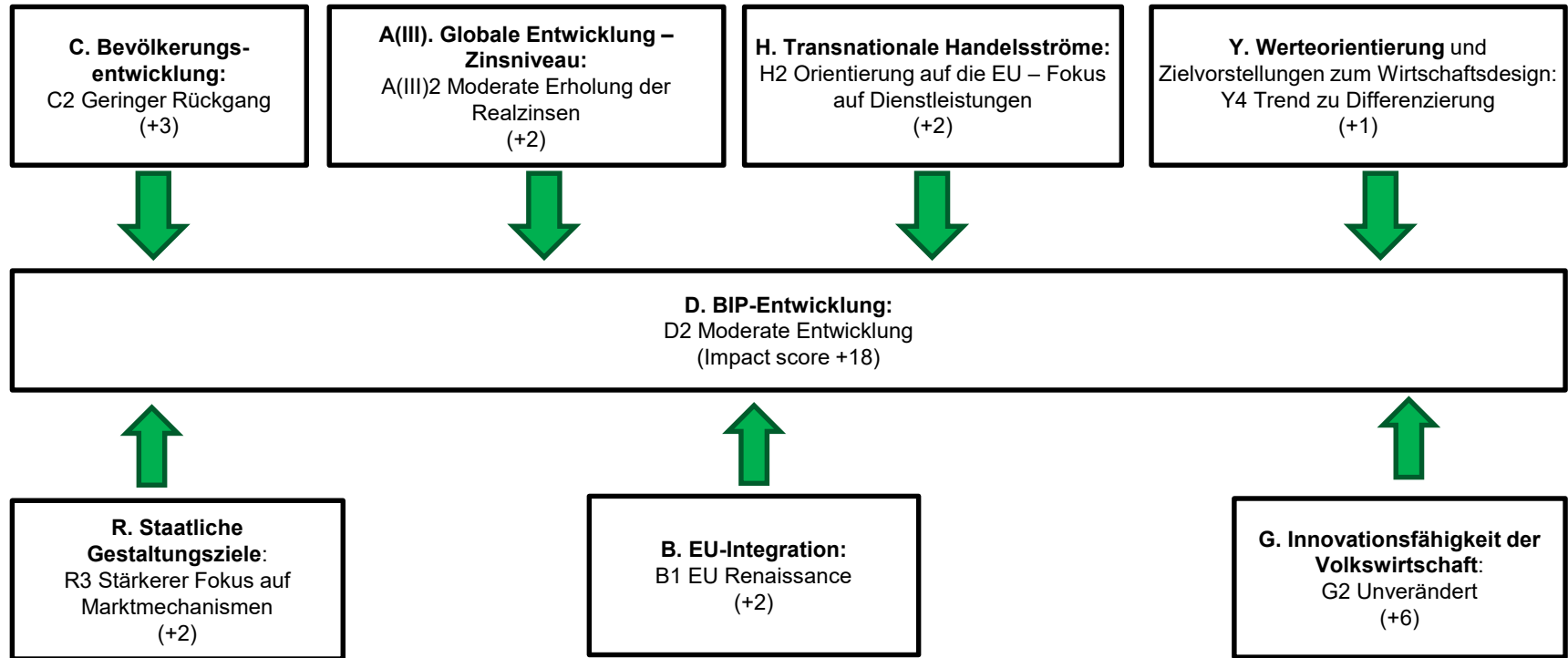
- **Internationale Verflechtung der Stromnetze:** Trend zu stärkerem europäischen Stromverbund
- **Individuelles Energieverbrauchsverhalten:** Trend zur Technikaffinität
- **Werteorientierung:** Trend zu Differenzierung, Werte wie Leistung, materielles Wachstum, Erlebnisorientierung, generelles Gemeinschaftsgefühl, etc. sind ebenbürtig in der Gesellschaft vertreten

# Sozio-ökonomischer Kontext „MEAN“ (Ausschnitt)

		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	T	U	V	W	X	Y	
		B1	C3	D2	E3	F2	G2	H2	I2	J1	K4	L3	M1	N3	O3	P1	Q4	R3	T3	U3	V3	W2	X1	Y4	
A(I). Globale Entwicklung – Allgemeine Entw.	A(I)3 Fortress World		Grün					Grün							Rot								Grün		
B. EU-Integration	B1 EU Renaissance		Grün						Grün														Rot		
C. Bevölkerungsentwicklung	C2 Geringer Rückgang			Grün																		Grün			
D. BIP-Entwicklung	D2 Moderate Entwicklung																						Rot		
E. Arbeitsmarktentwicklung	E3 Zweiteilung Arbeitsmarkt																			Grün	Rot		Rot		Grün
F. Tertiärisierung der Wirtschaft	F2 Starke Tertiärisierung		Grün		Grün			Grün															Grün		Rot
G. Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft	G2 Unverändert			Grün								Grün												Grün	
H. Transnationale Handelsströme	H2 Orientierung auf die EU			Grün																Grün					
I. Internationale Verflechtung der Stromnetze	I2 Trend zu stärkerem europäischen Stromverbund											Grün	Grün					Grün	Grün					Grün	
J. Infrastrukturentwicklung der Stromnetze	J1 Bedarfsgerechter Ausbau								Grün			Grün												Grün	
K. Ausbau von Erneuerbarer Energien (Strom)	K4 Hoher Ausbau								Grün	Grün				Rot				Grün	Grün					Grün	
L. Zentralität/Dezentralität Stromerzeugung	L3 Trend zum Umbau zur dez. Systemarchitektur								Rot						Rot									Grün	
M. Marktordnung Strommarkt	M1 Versorgungssicherheit durch Markt								Grün																
N. Politikstabilität im Bereich Energie	N3 Höhere Politikstabilität								Grün	Grün						Grün								Grün	
O. Steuerungsinstrumente im Bereich Energie	O3 Präferenz für technologiespez. Instrumente								Grün			Rot		Grün											
P. Governance im Infrastrukturausbau	P1 Trend zum koordinierten Ausbau								Grün	Grün						Grün								Grün	
Q. Planungsrecht / Öffentliche Infrastrukturplanung	Q4 Kompromiss								Grün	Grün											Grün				
R. Staatliche Gestaltungsziele	R3 Stärkerer Fokus auf Marktmechanismen			Grün							Rot		Grün		Grün			Grün			Rot			Grün	Grün
T. Wohlstandsentwicklung	T3 Zunehmende Ungleichheit		Rot			Grün						Grün	Rot		Rot				Grün			Grün			
U. Technikakzeptanz gegenüber Energietechno.	U3 Leicht zunehmend														Grün	Grün								Grün	Grün
V. Individuelles Energieverhaltensverhalten	V3 Trend zur Technikaffinität										Rot	Grün												Grün	
W. Bildungsentwicklung	W2 Fokus auf MINT				Grün																Grün				Grün
X. Einstellung zur Energiewende	X1 Trend zu positiver Einstellung								Grün	Grün					Grün	Rot			Grün			Grün			
Y. Werteorientierung	Y4 Trend zu Differenzierung			Grün			Grün																Rot		Grün

Legende: **Grün**: unterstützender Einfluss, **rot**: hemmender Einfluss

# Sozio-ökonomischer Kontext „MEAN“ – Beispiel BIP Entwicklung



Legende: **Grün:** unterstützender Einfluss, **rot:** hemmender Einfluss

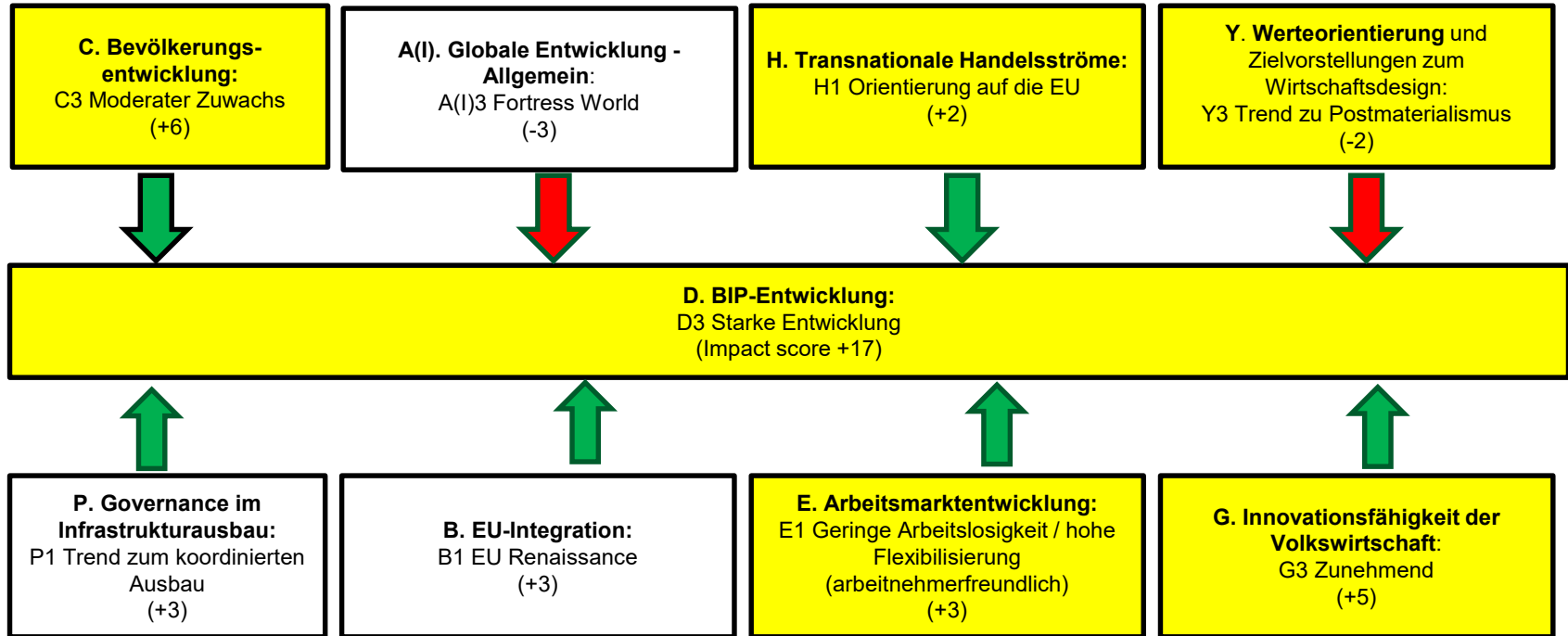
- Moderater **Bevölkerungszuwachs** (+ 2,0 Mio. gegenüber 2022)
- Starker Anstieg **BIP** (+1,8 % p.a.)
- Deutschland **verbessert** die **Innovationsfähigkeit** seiner Volkswirtschaft kontinuierlich und nimmt 2050 weltweit einen Spitzenplatz ein
- Bedeutung der **internationalen Handelsverflechtung steigt**, vor allem durch Ausweitung der EU-internen Handelsverflechtungen
- **Entkopplung** des Wohlstands vom materiellen Verbrauch, sorgsamere Nutzung von Ressourcen
- Stärkerer Fokus **auf Bürgerbeteiligung und Transparenz**

# Sozio-ökonomischer Kontext „NH\_max“ (Ausschnitt)

		C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	T	U	V	W	X	Y	
		C4	D3	E1	F2	G3	H2	I2	J1	K4	L3	M1	N3	O3	P1	Q2	R2	T4	U3	V3	W1	X1	Y3	
A(I). Globale Entwicklung – Allgemeine Entw.	A(I)3 Fortress World	■	■			■	■							■							■		■	
B. EU-Integration	B1 EU Renaissance	■				■	■	■				■	■	■	■		■							■
C. Bevölkerungsentwicklung	C3 Moderater Zuwachs		■	■		■	■													■	■			
D. BIP-Entwicklung	D3 Starke Entwicklung				■	■	■											■	■	■		■		
E. Arbeitsmarktentwicklung	E1 Geringe Arbeitslosigkeit	■	■																■	■		■	■	■
F. Tertiärisierung der Wirtschaft	F2 Starke Tertiärisierung					■	■															■		■
G. Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft	G3 Zunehmend		■								■											■	■	
H. Transnationale Handelsströme	H2 Orientierung auf die EU		■											■				■						
I. Internationale Verflechtung der Stromnetze	I2 Trend zu stärkerem europä. Stromverbund					■				■	■	■		■		■						■		■
J. Infrastrukturentwicklung der Stromnetze	J1 Bedarfsgerechter Ausbau							■		■			■										■	■
K. Ausbau von Erneuerbarer Energien (Strom)	K4 Hoher Ausbau							■	■		■	■		■		■	■					■	■	■
L. Zentralität/Dezentralität Stromerzeugung	L3 Trend zum Umbau zur dez. Systemarchitektur					■		■	■			■		■						■	■		■	■
M. Marktordnung Strommarkt	M1 Versorgungssicherheit durch Markt							■			■			■										
N. Politikstabilität im Bereich Energie	N3 Höhere Politikstabilität					■				■					■					■			■	■
O. Steuerungsinstrumente im Bereich Energie	O3 Präferenz für technologieoffene Instrumente										■										■			
P. Governance im Infrastrukturausbau	P1 Trend zum koordinierten Ausbau		■					■	■						■		■						■	■
Q. Planungsrecht / Öffentliche Infrastrukturplanung	Q2 Schwerpunkt Legitimierung und Akzeptanz							■		■										■	■		■	■
R. Staatliche Gestaltungsziele	R2 Stärkerer Fokus auf Bürgerbeteiligung							■	■					■			■				■	■	■	■
T. Wohlstandsentwicklung	T4 Unveränderte Ungleichheit	■			■	■				■	■			■			■				■	■	■	■
U. Technikakzeptanz gegenüber Energietechno.	U3 Leicht zunehmend										■		■	■								■	■	■
V. Individuelles Energieverhaltensverhalten	V3 Trend zur Technikaffinität									■	■												■	■
W. Bildungsentwicklung	W1 Fokus auf MINT			■	■	■													■					■
X. Einstellung zur Energiewende	X1 Trend zu positiver Einstellung							■	■	■	■		■	■		■				■	■			■
Y. Werteorientierung	Y4 Trend zu Postmaterialismus	■	■		■					■											■	■	■	■

Legende: **Grün**: unterstützender Einfluss, **rot**: hemmender Einfluss

# Sozio-ökonomischer Kontext „NH\_max“ – Beispiel BIP Entwicklung



**Legende:** **Grün:** unterstützender Einfluss, **rot:** hemmender Einfluss, gelbe Kästen: Abweichung vom Szenario MEAN



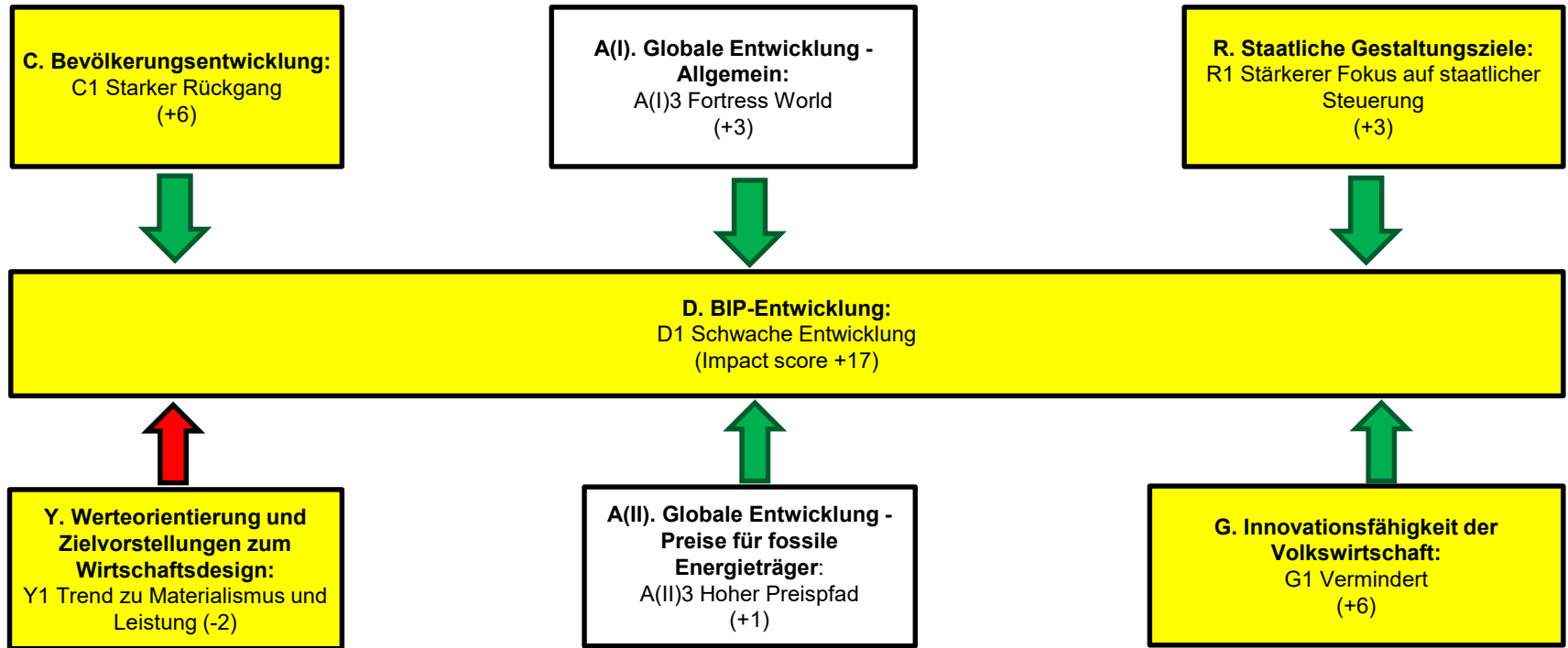
- **Nationale Ziele treten in den Vordergrund**, keine einheitliche Energie- und Klimapolitik, Austritt von Staaten aus der EU
- **Starker Bevölkerungsrückgang** (- 9,3 Mio. gegenüber 2022)
- **Schwacher Anstieg des BIP** (+0,6 % p.a.)
- Voraussetzungen der **Innovationsfähigkeit verschlechtern** sich.  
Deutschlands Innovationsfähigkeit sinkt unter die anderer Wirtschaftsnationen
- **Reintegration von Wertschöpfungsketten** in die einzelnen Länder
- **Individuelles Energieverbrauchsverhalten: Rückhaltung beim Kauf effizienter Geräte**
- **Materieller Konsum** spielt als Zielgröße eine große Rolle

# Sozio-ökonomischer Kontext „LO“ (Ausschnitt)

		C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
		C1	D1	E1	F1	G1	H1	I1	J1	K1	L1	M1	N1	O1	P1	Q1	R1	S1	T1	U1	V1	W1	X1	Y1
A(l). Globale Entwicklung – Allgemeine Entw.	A(l)1 Fortress World	Grün	Grün			Grün								Grün			Grün	Grün						Grün
B. EU-Integration	B1 EU under threat	Rot					Grün	Rot	Rot			Grün					Grün	Grün					Rot	Grün
C. Bevölkerungsentwicklung	C1 Starker Rückgang		Grün		Rot																	Grün	Rot	
D. BIP-Entwicklung	D1 Schwache Entwicklung			Grün		Grün												Grün		Grün			Grün	
E. Arbeitsmarktentwicklung	E1 Zweiteilung Arbeitsmarkt																		Grün	Grün	Rot		Rot	
F. Tertiärisierung der Wirtschaft	F1 Schwache Tertiärisierung					Grün	Rot																	Grün
G. Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft	G1 Vermindert		Grün				Grün				Rot												Grün	Rot
H. Transnationale Handelsströme	H1 Renationalisierung			Rot	Grün														Grün					
I. Internationale Verflechtung der Stromnetze	I1 Trend zu stärkerem europä. Stromverbund									Grün	Grün	Grün		Rot			Grün							Grün
J. Infrastrukturentwicklung der Stromnetze	J1 Bedarfsgerechter Ausbau							Grün		Grün		Rot		Grün										Grün
K. Ausbau von Erneuerbarer Energien (Strom)	K1 Hoher Ausbau					Rot		Grün	Grün	Grün	Grün			Rot			Grün						Grün	Grün
L. Zentralität/Dezentralität Stromerzeugung	L1 Trend zur Mischstruktur							Grün	Grün								Grün				Grün			
M. Marktordnung Strommarkt	M1 Versorgungssicherheit durch Staat					Grün		Rot		Grün	Grün				Grün									Grün
N. Politikstabilität im Bereich Energie	N1 Höhere Politikstabilität					Rot		Grün	Grün	Grün					Grün					Grün				Grün
O. Steuerungsinstrumente im Bereich Energie	O1 Präferenz für technologiespez. Instrumente									Grün	Rot													Grün
P. Governance im Infrastrukturausbau	P1 Trend zum koordinierten Ausbau							Grün	Grün		Grün			Rot			Grün							Grün
Q. Planungsrecht / Öffentliche Infrastrukturplanung	Q1 Kompromiss							Grün	Grün		Grün				Rot		Grün							Grün
R. Staatliche Gestaltungsziele	R1 Stärkerer Fokus auf staatliche Steuerung		Grün						Rot	Grün	Grün			Grün	Grün	Grün		Grün		Rot		Grün	Grün	Grün
T. Wohlstandsentwicklung	T1 Zunehmende Ungleichheit	Grün			Grün	Grün				Rot	Rot			Rot			Grün	Grün		Rot	Grün	Grün		Grün
U. Technikakzeptanz gegenüber Energietechno.	U1 Leicht zunehmend										Grün		Grün											Grün
V. Individuelles Energieverhaltensverhalten	V1 Trend zur Sparsamkeit									Rot	Grün											Grün		Grün
W. Bildungsentwicklung	W1 Fokus auf MINT			Grün	Grün	Grün	Rot												Grün					Grün
X. Einstellung zur Energiewende	X1 Trend zu positiver Einstellung							Grün	Grün	Grün	Grün		Grün	Grün			Grün	Grün		Grün	Grün			Grün
Y. Werteorientierung	Y1 Trend zu Materialismus und Leistung	Rot			Grün														Grün		Grün	Rot	Grün	Rot

Legende: **Grün**: unterstützender Einfluss, **rot**: hemmender Einfluss

# Sozio-ökonomischer Kontext „LO“ – Beispiel BIP Entwicklung



**Legende:** **Grün:** unterstützender Einfluss, **rot:** hemmender Einfluss, gelbe Kästen: Abweichung vom Szenario MEAN

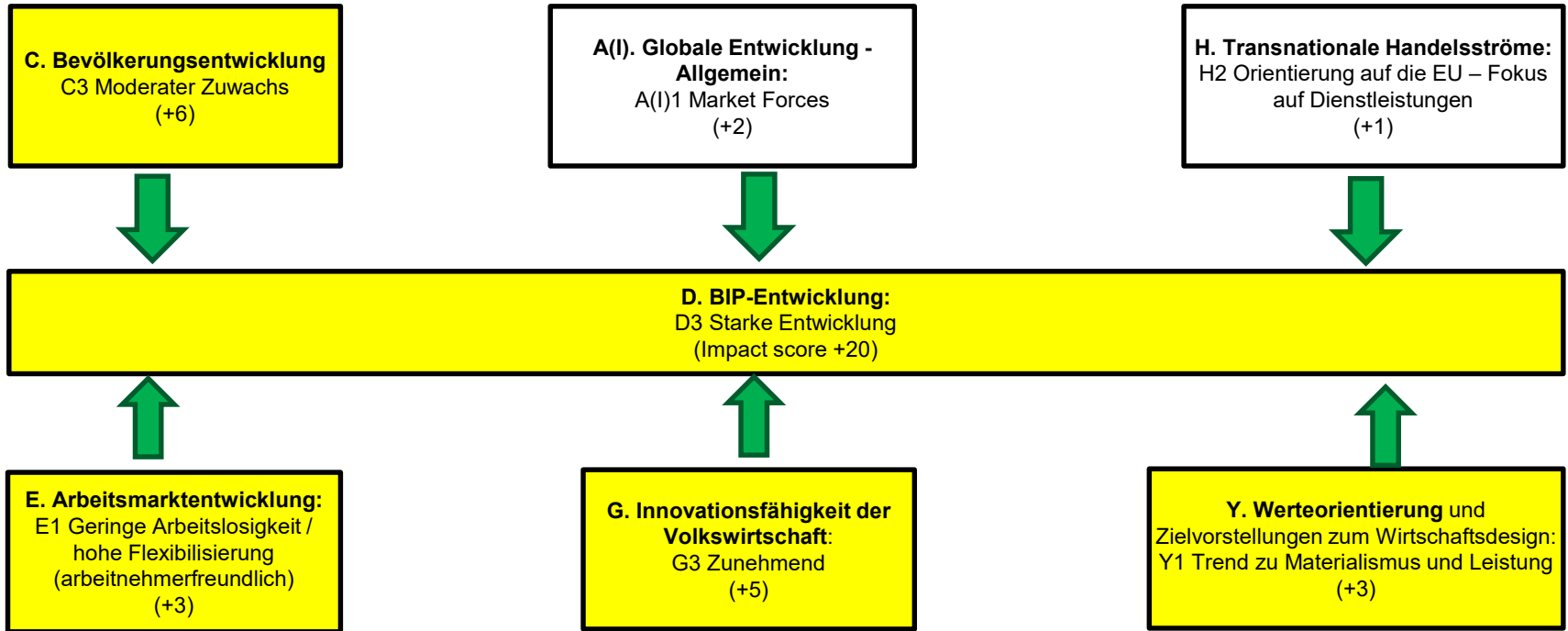
- **Handelsbarrieren** werden **weiterhin abgebaut**
- **Stillstand der europäischen Integration**
- **Moderater Bevölkerungszuwachs** (+ 2,0 Mio. gegenüber 2022)
- **Starkes wirtschaftliches Wachstum** (+1,8% p.a.)
- Deutschland **verbessert die Innovationsfähigkeit** seiner Volkswirtschaft kontinuierlich und nimmt 2050 weltweit einen Spitzenplatz ein.
- **Internationale Verflechtung der Stromnetze wird nicht weiter vorangetrieben**, Versorgungssicherheit wird über eine nationale Leistungsautarkie gesichert
- **Materieller Konsum** spielt als Zielgröße eine große Rolle

# Sozio-ökonomischer Kontext „HI“ (Ausschnitt)

		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	T	U	V	W	Y
		B2	C4	D3	E1	F2	G3	H2	I1	J1	K4	L3	M3	N3	O2	P2	Q2	R2	T4	U3	V3	W1	Y1
A(I). Globale Entwicklung – Allgemeine Entw.	A(I)1 Market Forces		Grün	Grün			Rot								Rot								Grün
B. EU-Integration	B2 Nobody Cares		Grün		Rot		Grün		Grün			Rot			Grün		Rot						Grün
C. Bevölkerungsentwicklung	C3 Moderater Zuwachs			Grün	Rot																Grün	Rot	
D. BIP-Entwicklung	D3 Starke Entwicklung				Grün	Grün		Grün										Grün	Grün				Grün
E. Arbeitsmarktentwicklung	E1 Geringe Arbeitslosigkeit		Grün	Grün																Grün	Grün		Grün
F. Tertiärisierung der Wirtschaft	F2 Starke Tertiärisierung						Grün	Grün															Rot
G. Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft	G3 Zunehmend			Grün								Grün											Grün
H. Transnationale Handelsströme	H2 Orientierung auf die EU			Grün		Grün									Rot				Rot				
I. Internationale Verflechtung der Stromnetze	I1 Trend zur nationalen Leistungsautarkie									Grün	Rot		Grün		Grün			Grün					
J. Infrastrukturentwicklung der Stromnetze	J1 Bedarfsgerechter Ausbau						Grün		Grün		Grün		Rot	Grün			Grün						
K. Ausbau von Erneuerbarer Energien (Strom)	K4 Hoher Ausbau						Grün		Rot	Grün		Grün			Rot		Grün	Grün					Grün
L. Zentralität/Dezentralität Stromerzeugung	L3 Trend zum Umbau zur dez. Systemarchitektur						Grün		Grün	Grün			Rot		Grün					Grün	Grün		
M. Marktordnung Strommarkt	M3 Versorgungssicherheit durch Staat						Grün		Grün	Grün	Grün				Grün						Grün	Grün	
N. Politikstabilität im Bereich Energie	N3 Höhere Politikstabilität						Grün		Grün	Grün	Grün	Grün								Grün			
O. Steuerungsinstrumente im Bereich Energie	O2 Präferenz für technologiespez. Instrumente						Grün		Grün	Rot		Grün	Rot								Grün		
P. Governance im Infrastrukturausbau	P2 Trend zum unkoordinierten Ausbau						Grün		Grün	Rot		Grün	Grün		Grün								
Q. Planungsrecht / Öffentliche Infrastrukturplanung	Q2 Schwerpunkt Legitimierung und Akzeptanz								Grün	Grün						Grün		Grün		Grün			
R. Staatliche Gestaltungsziele	R2 Stärkerer Fokus Bürgerbeteiligung								Grün	Grün					Grün	Grün	Grün			Grün		Grün	Rot
T. Wohstandsentwicklung	T4 Unveränderte Ungleichheit		Grün			Grün					Grün	Grün			Grün			Grün		Grün	Grün	Grün	
U. Technikakzeptanz gegenüber Energietechno.	U3 Leicht zunehmend													Grün								Grün	
V. Individuelles Energieverhaltensverhalten	V3 Trend zur Technikaffinität						Grün				Rot	Grün									Grün		
W. Bildungsentwicklung	W1 Fokus auf MINT				Grün	Grün														Grün			Grün
X. Einstellung zur Energiewende	Y1 Trend zu Materialismus und Leistung		Grün	Grün		Rot															Grün	Rot	Grün

Legende: **Grün**: unterstützender Einfluss, **rot**: hemmender Einfluss

# Sozio-ökonomischer Kontext „HI“ – Beispiel BIP Entwicklung



**Legende:** **Grün:** unterstützender Einfluss, **rot:** hemmender Einfluss, gelbe Kästen: Abweichung vom Szenario MEAN

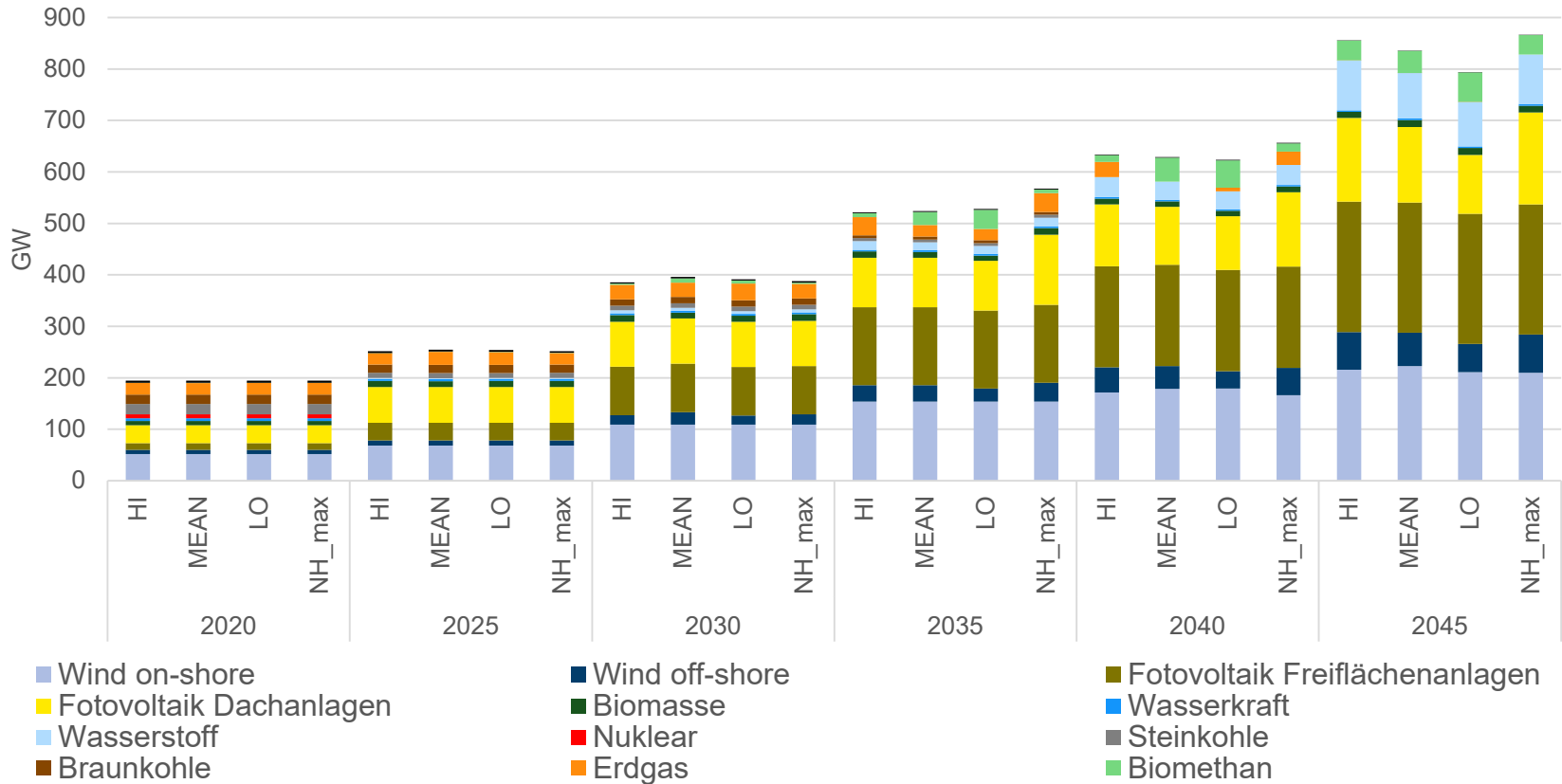
- Derzeit Fokus auf vier ausgewählte Kontexte
- Informationen zu „Out of the box“ Kontextszenarien liegen grundsätzlich vor
- Deskriptorenliste bzw. Liste der Deskriptorvarianten grundsätzlich erweiterbar

# Ergebnisse der Energiesystem- modellierung

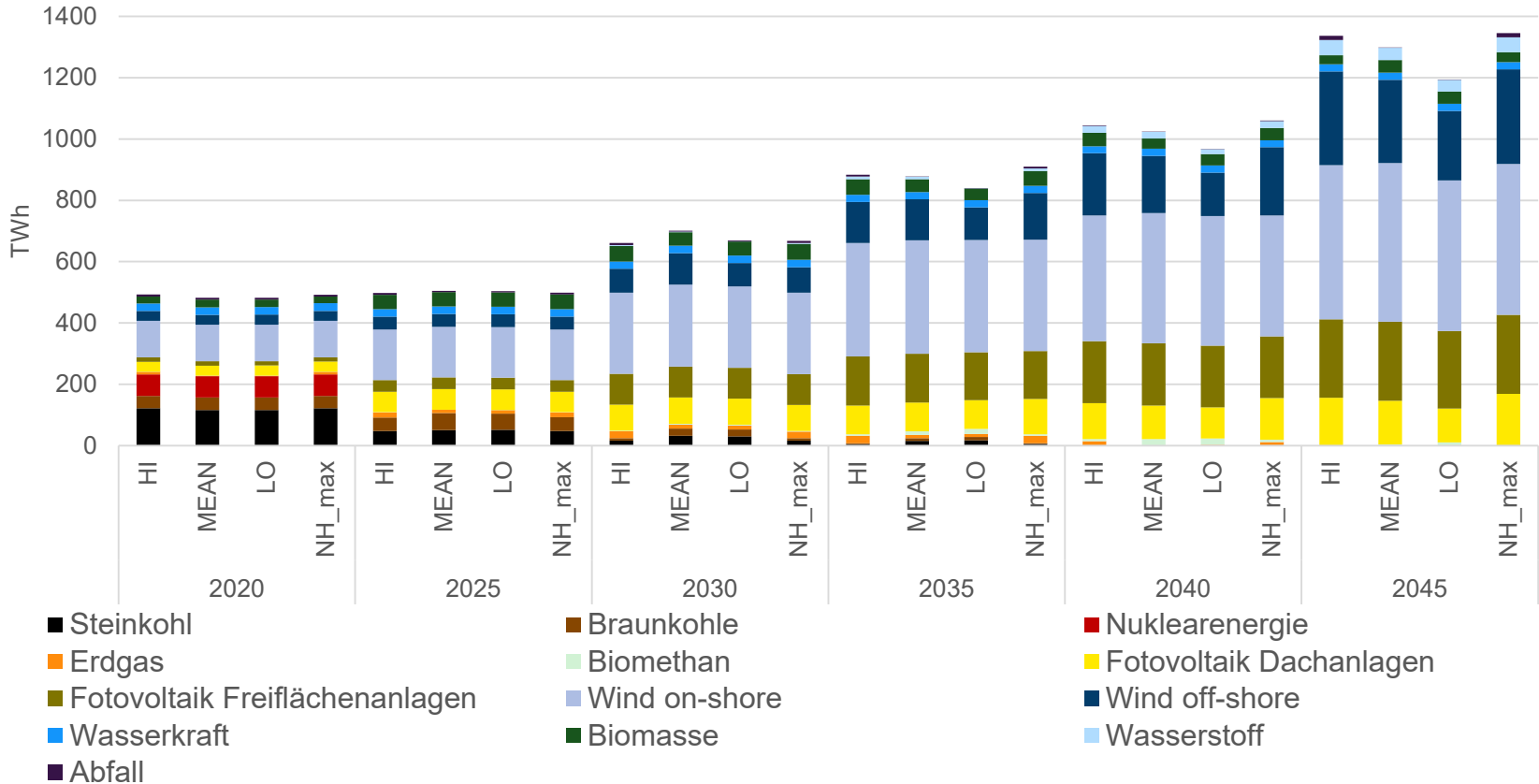
Felix Kullmann (FZJ-ICE-2), Tobias Naegler (DLR-VE)



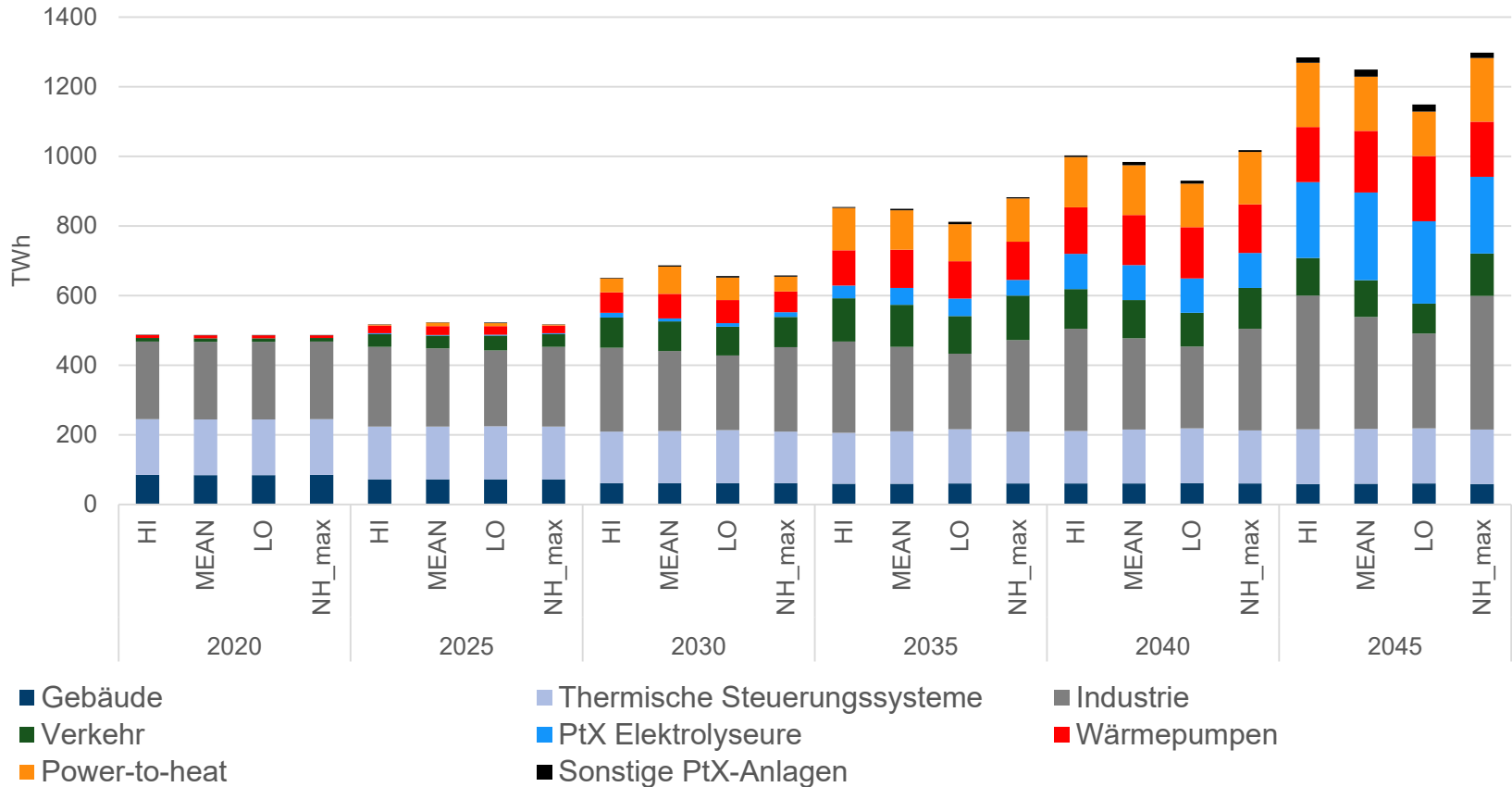
# Installierte Stromerzeugungsleistungen



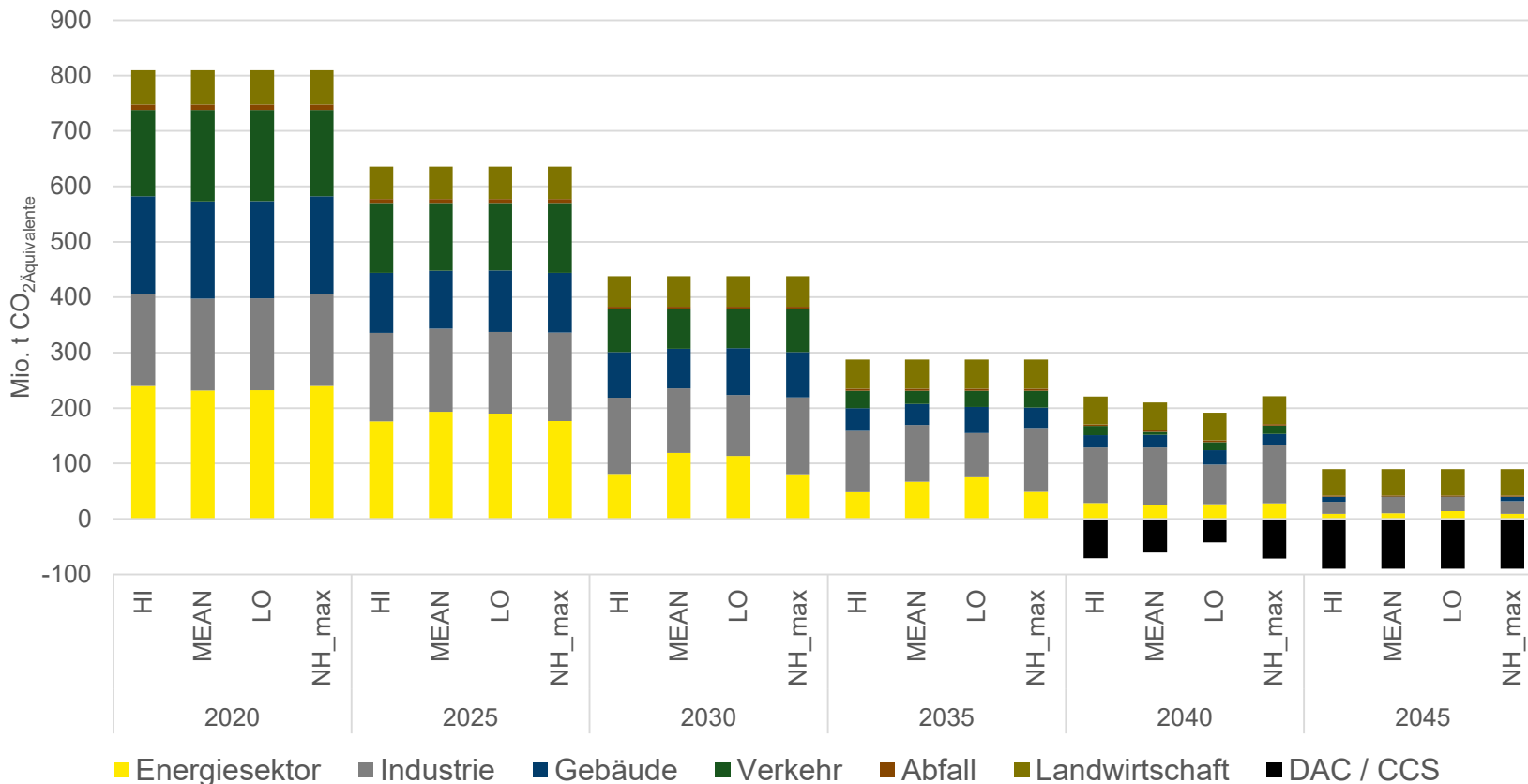
# Herstellung von Elektrizität



# Strombedarf

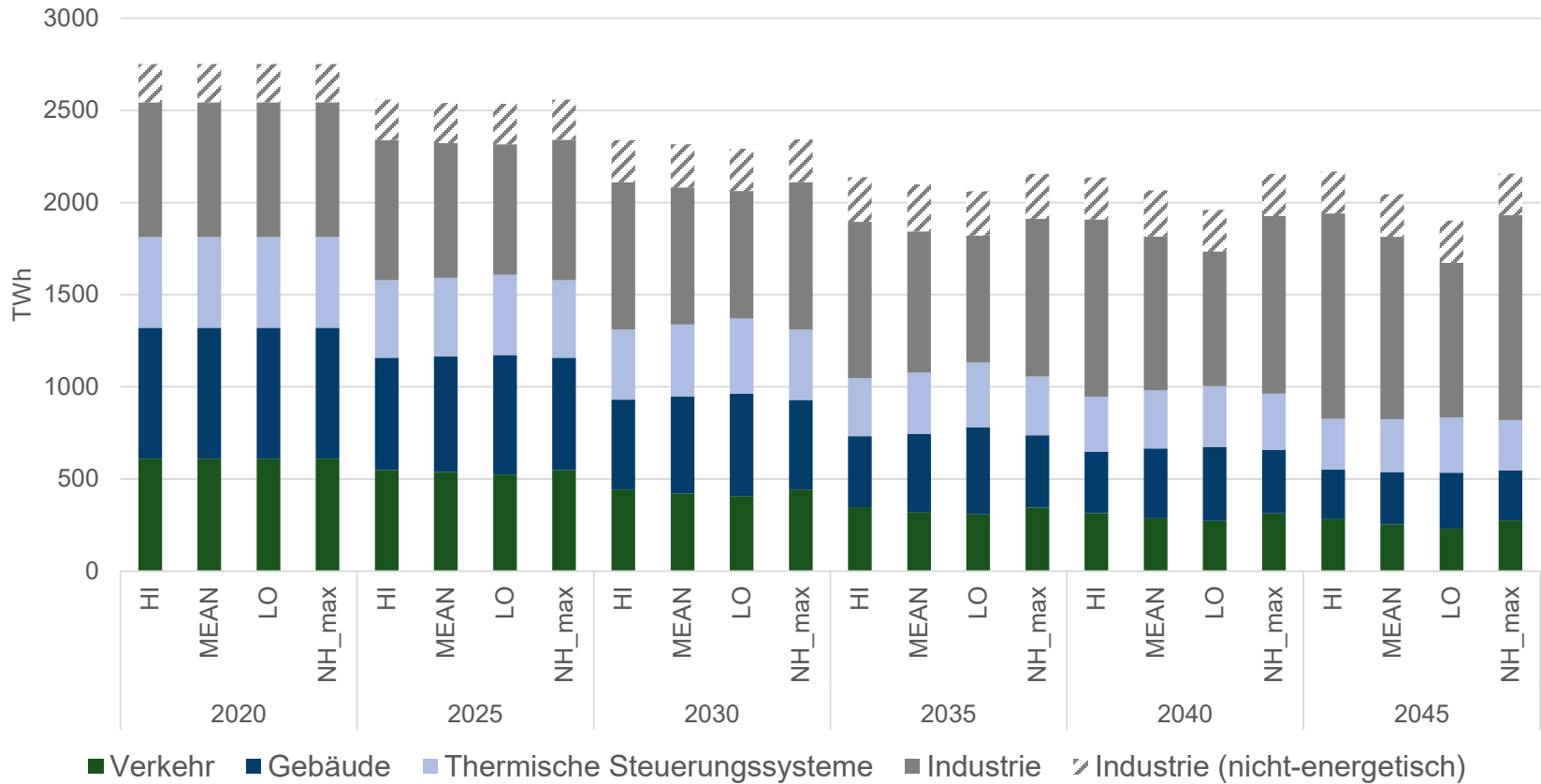


# Treibhausgasemissionen

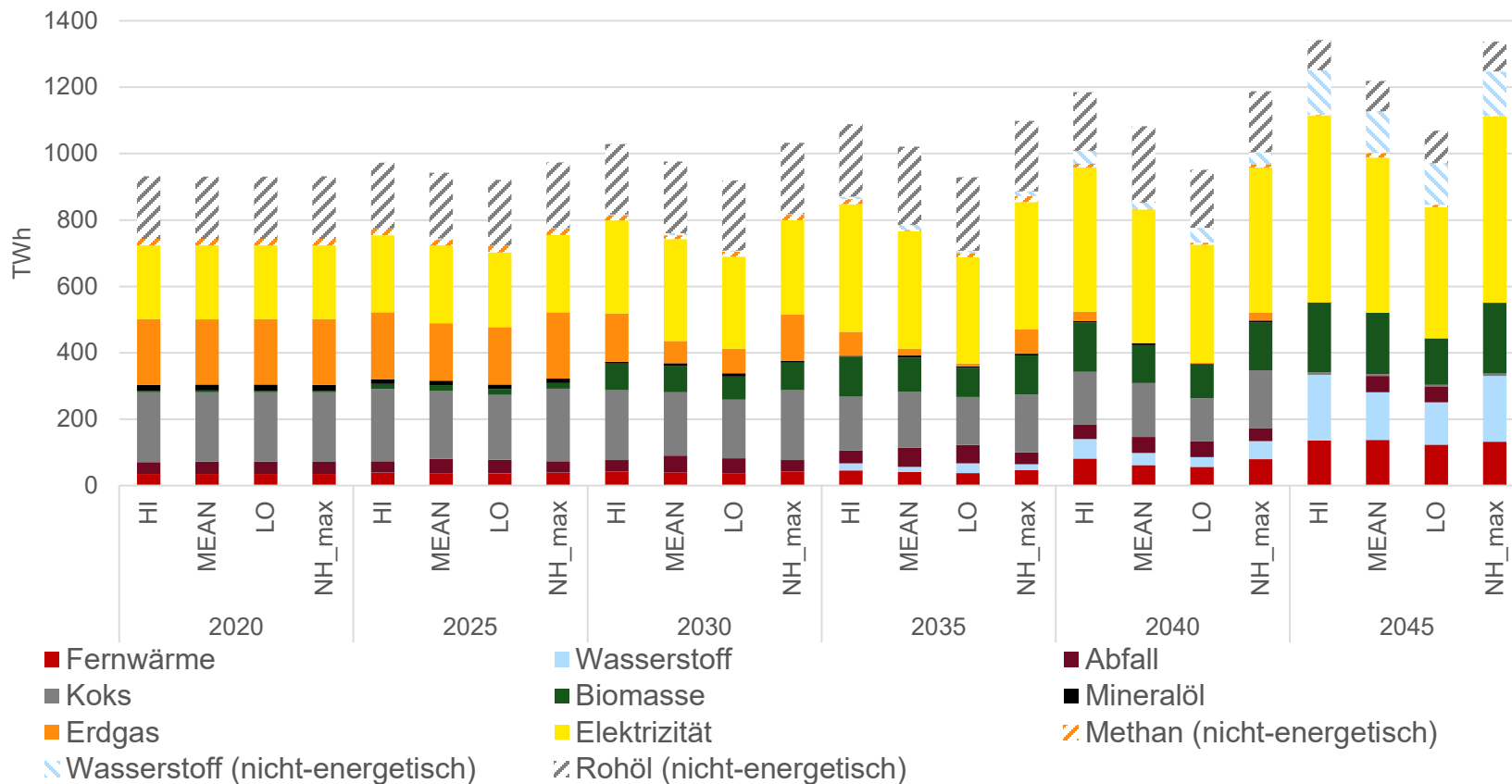


DAC: Direct Air Capture; CCS: Carbon Capture and Storage

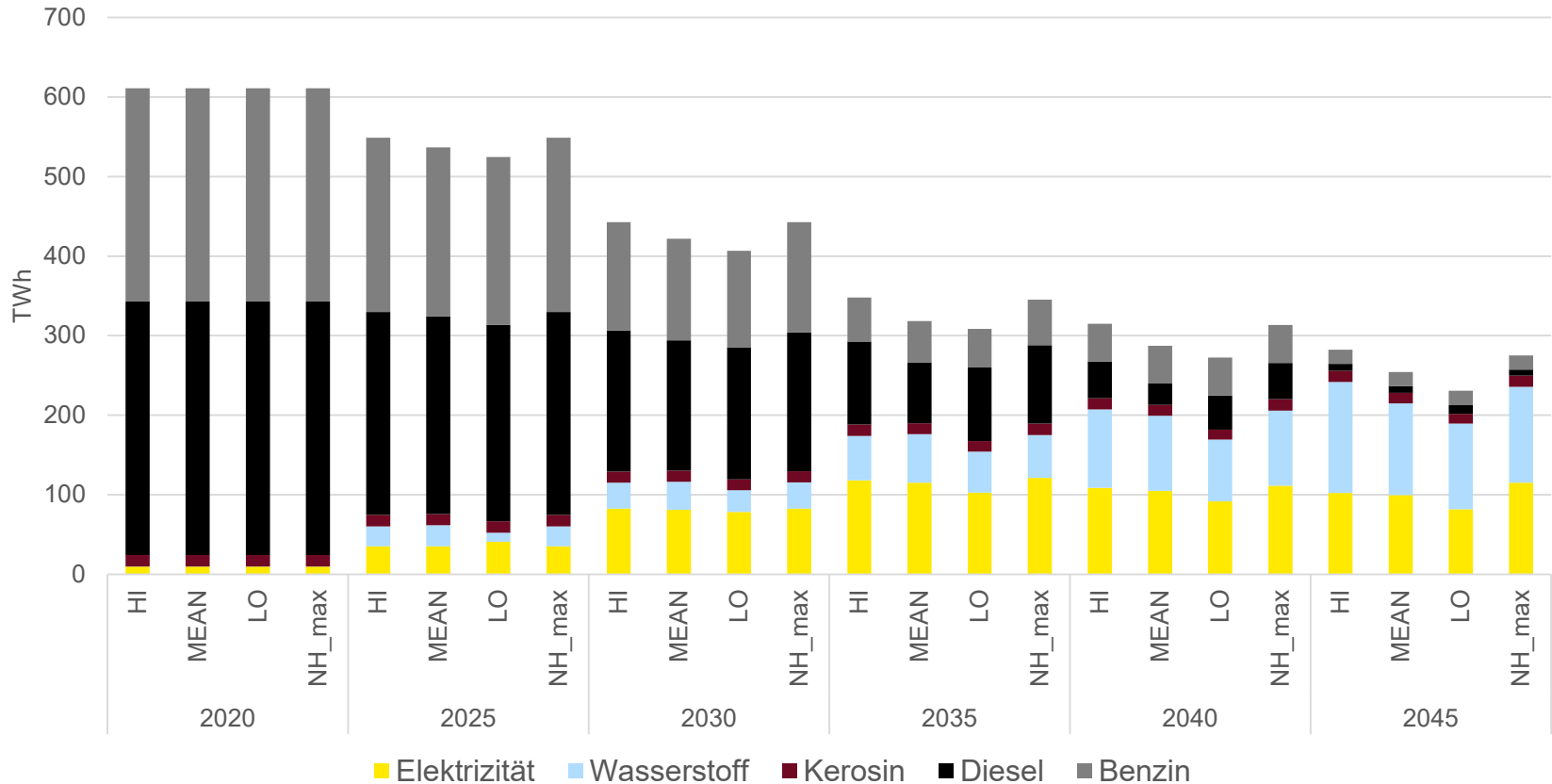
# Endenergienachfrage



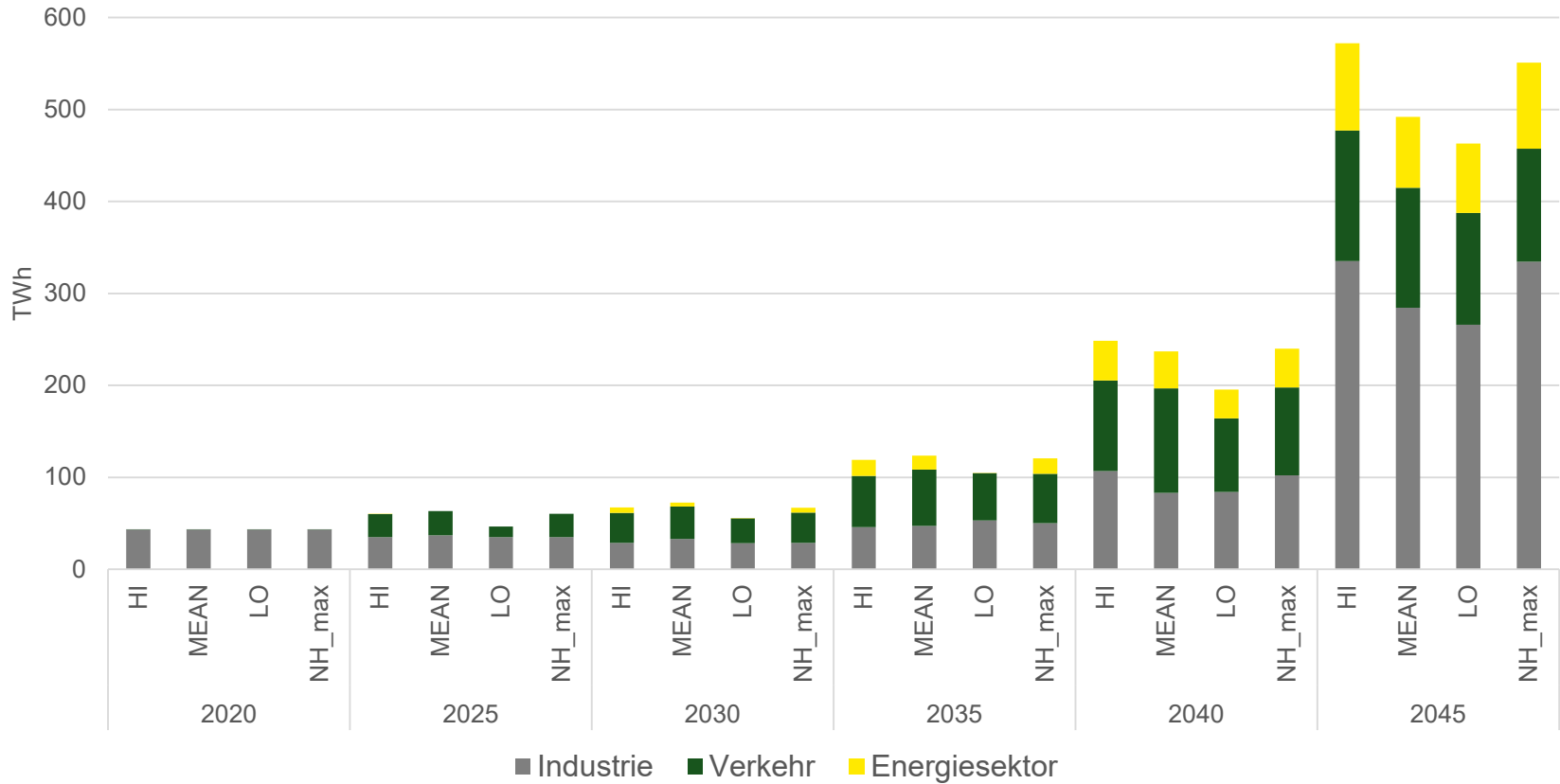
# Endenergienachfrage – Industrie



# Endenergienachfrage – Verkehrssektor

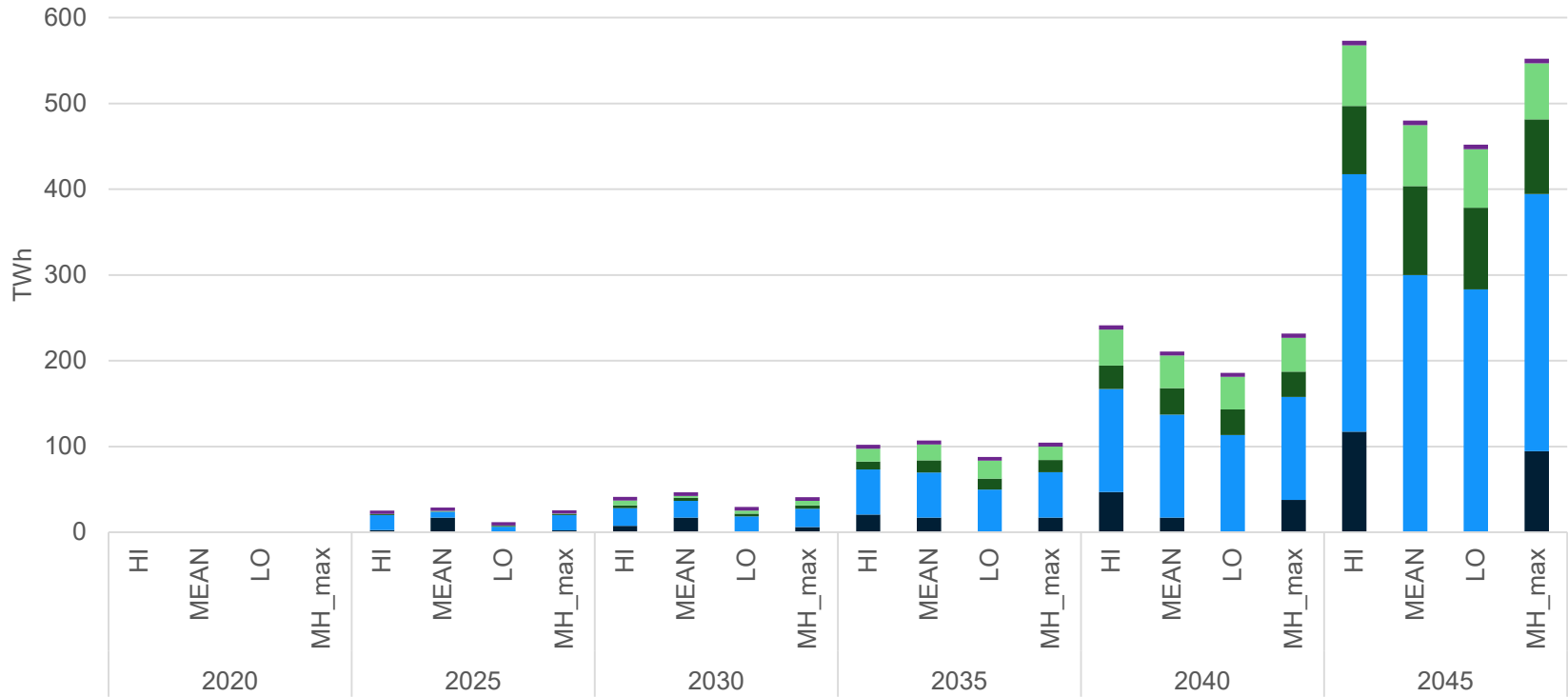


# Wasserstoffbedarf





# Wasserstoffproduktion

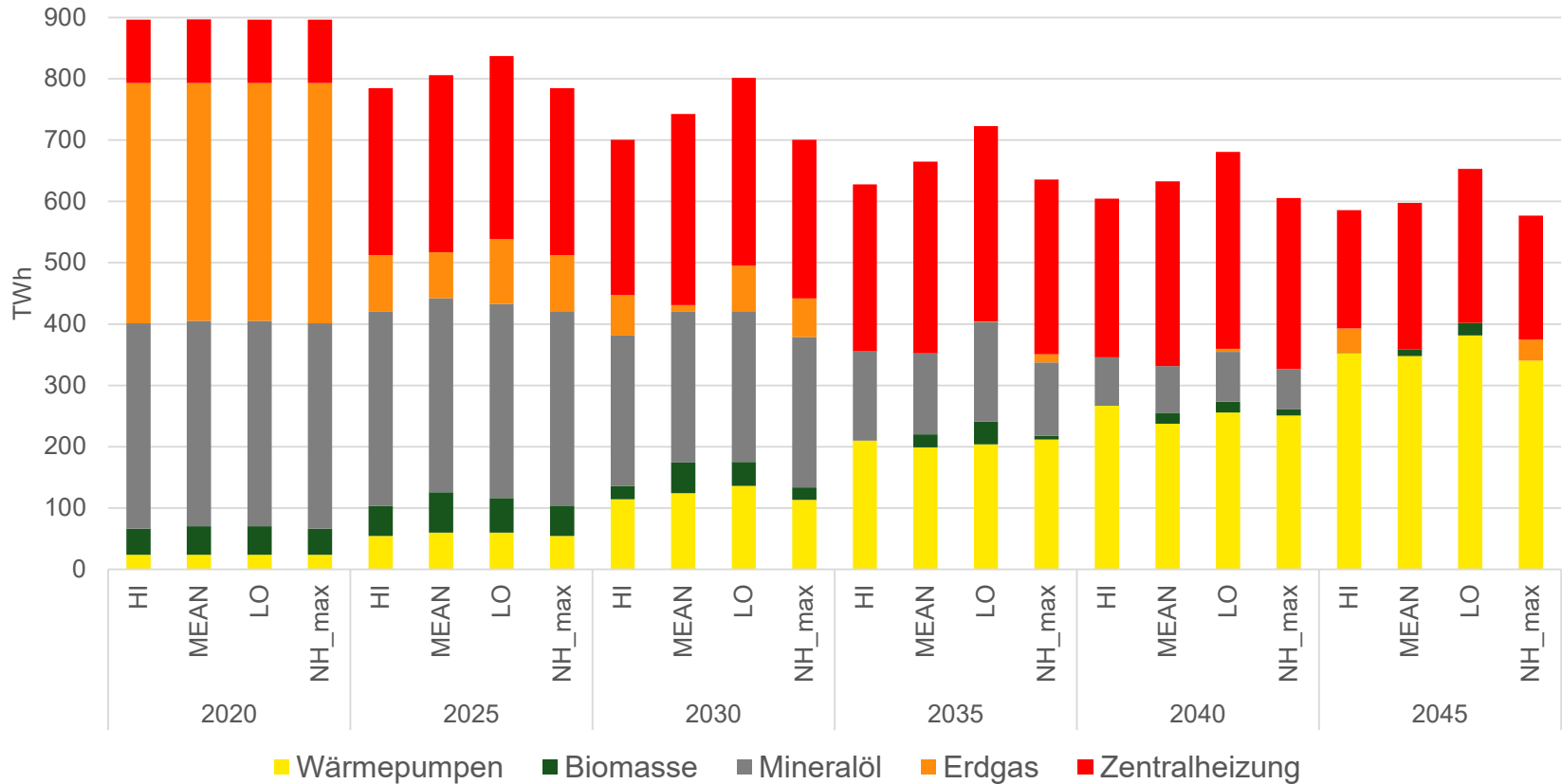


■ Import Wasserstoff per Schiff  
■ Elektroyse (kleinskalig)

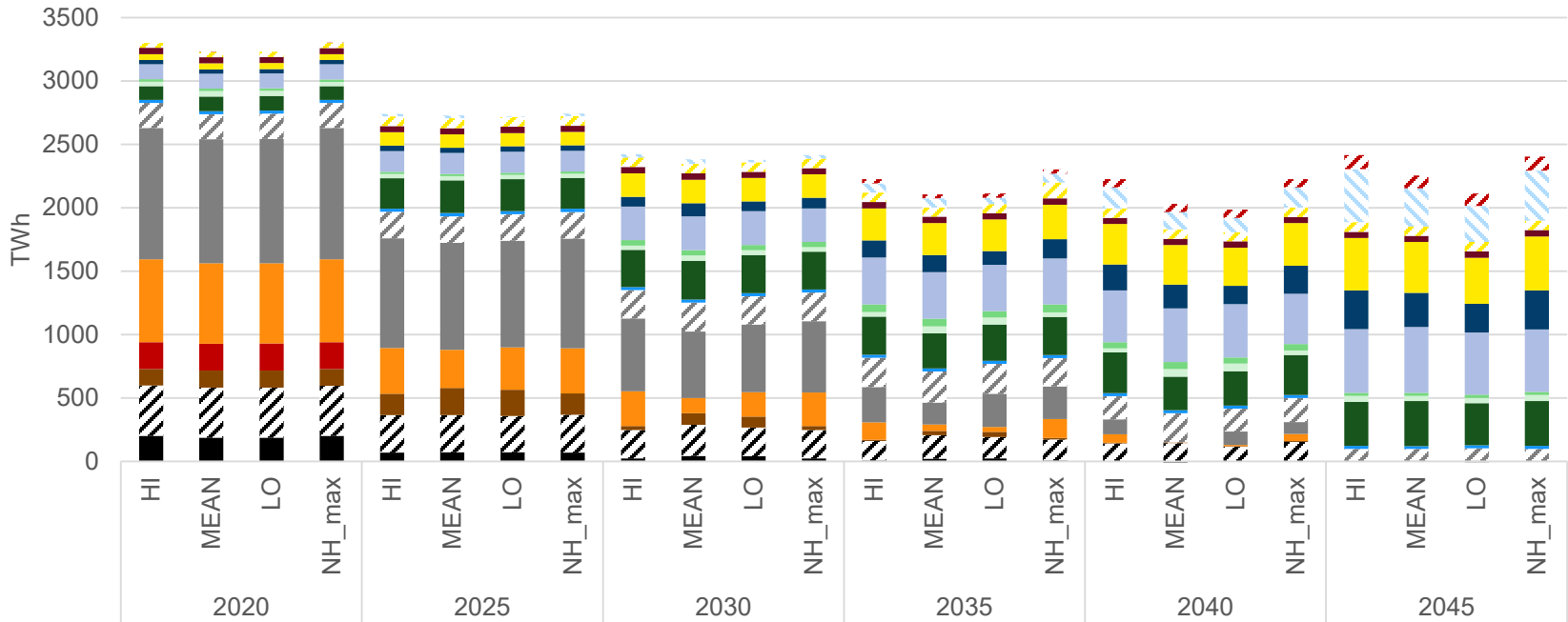
■ Import Wasserstoff per Pipeline  
■ Chlorproduktion

■ Elektroyse (großskalig)

# Wärmeangebot in Gebäuden



# Primärenergienachfrage



■ Steinkohle für Elektrizität

■ Uran

▨ Mineralöl (nicht-energetisch)

■ Gasförmige Biomasse

■ Wind off-shore

▨ Steinkohle für Wärme

■ Erdgas

■ Wasserkraft

■ Flüssige Biomasse

■ Fotovoltaik

■ Braunkohle

■ Mineralöl

■ Feste Biomasse

■ Wind on-shore

■ Abfall

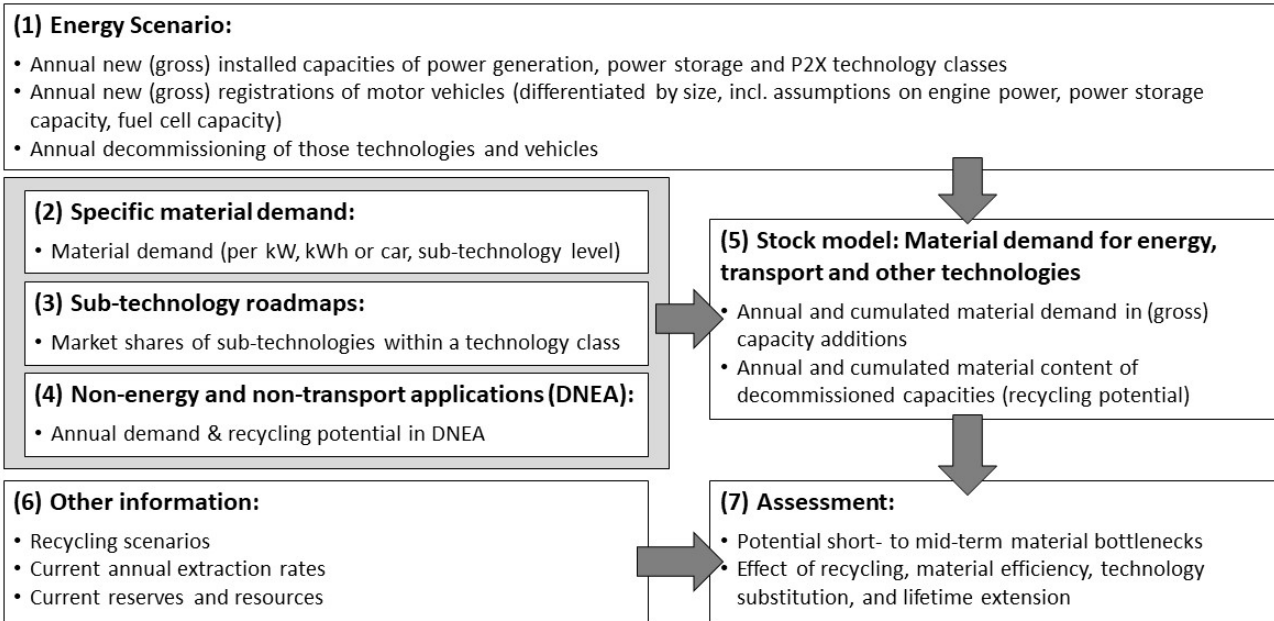
# Wirkungsabschätzung auf Grundlage der techno- ökonomischen Szenarien

Tobias Naegler (DLR-VE), Stefan Vögele (FZJ-ICE-2)

## Untersuchte Themenkomplexe

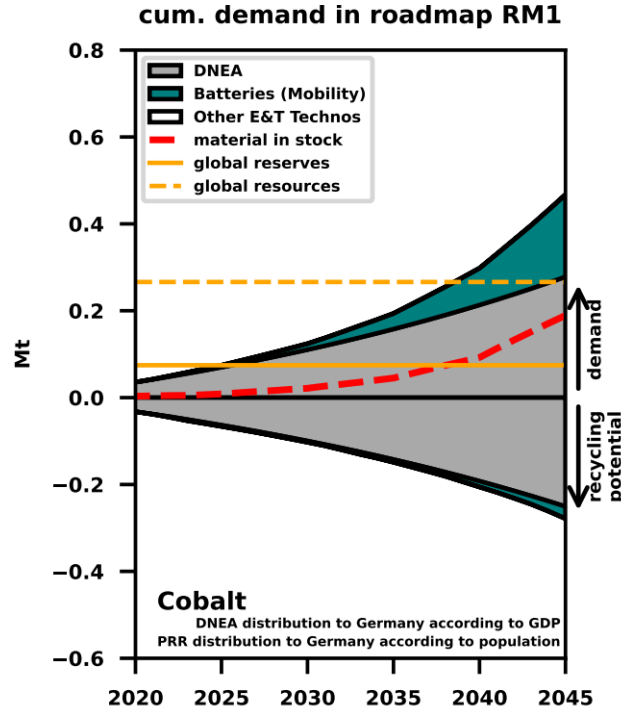
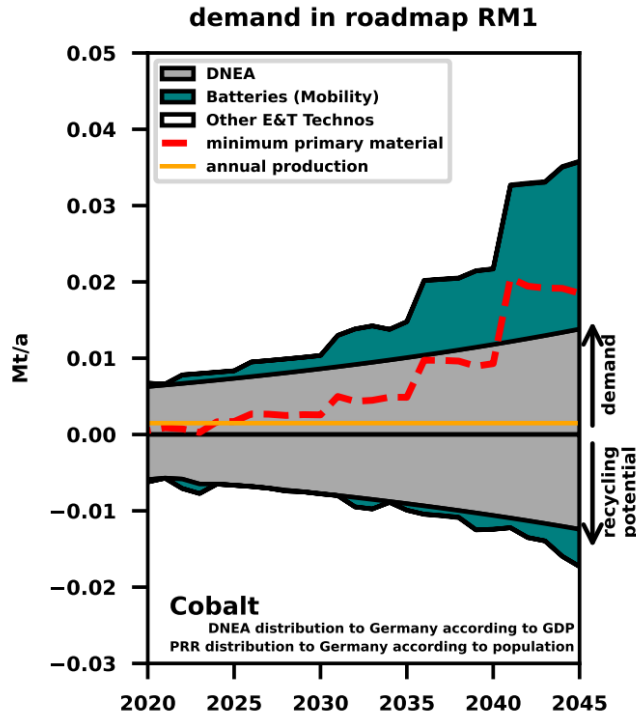
- **Mineralische Rohstoffe:**
  - Rohstoffbedarf
  - Risiko marktbedingter kurz- bis mittelfristiger Rohstoffengpässe
  - geopolitische Risiken Rohstoffversorgung
- **Lebenszyklusbasierte Umweltauswirkungen**
  - Klimawandel
  - Ökosystemqualität
  - Menschliche Gesundheit
  - Ressourcennutzung
- **Beschäftigungseffekte**

# Rohstoffbedarf – Prinzipielle Vorgehensweise



- Kopplung Output Energiesystemmodell mit Datenbanken:
  - Spez. Rohstoffbedarf Energie- und Verkehrstechnologien
  - Zukünftige Marktanteile Sub-Technologien
- Bestandsmodell (Stock model) rechnet Bedarf und Recyclingpotenzial
- Anschließende Identifikation potenzieller Engpässe und geopolitischer Risiken

# Rohstoffbedarf – Beispiel Kobalt

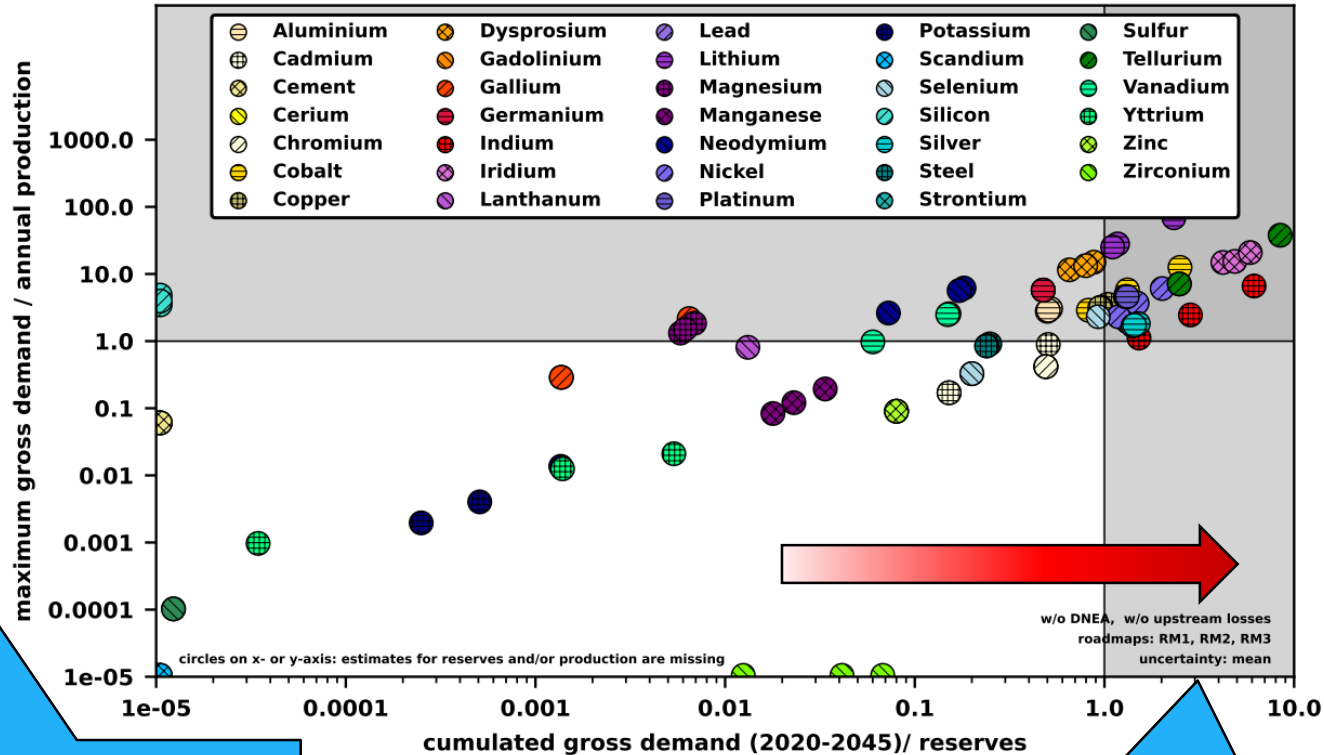


Kurz- und mittelfristige  
Versorgungsengpässe  
möglich, falls:

- Produktion muss schnell stark ausgeweitet werden
- Kumulierter Bedarf übersteigt in näherer Zukunft Reserven

→ Risiko von Preisanstiegen

# Potenzielle Engpässe aufgrund des stark steigenden Bedarfs



## Batterien

- Lithium
- Cobalt
- Nickel

## Permanentmagnete (Windturbinen, Elektromotoren):

- Neodym
- Dysprosium

## Elektrolyseure

- Iridium

## PV-Module

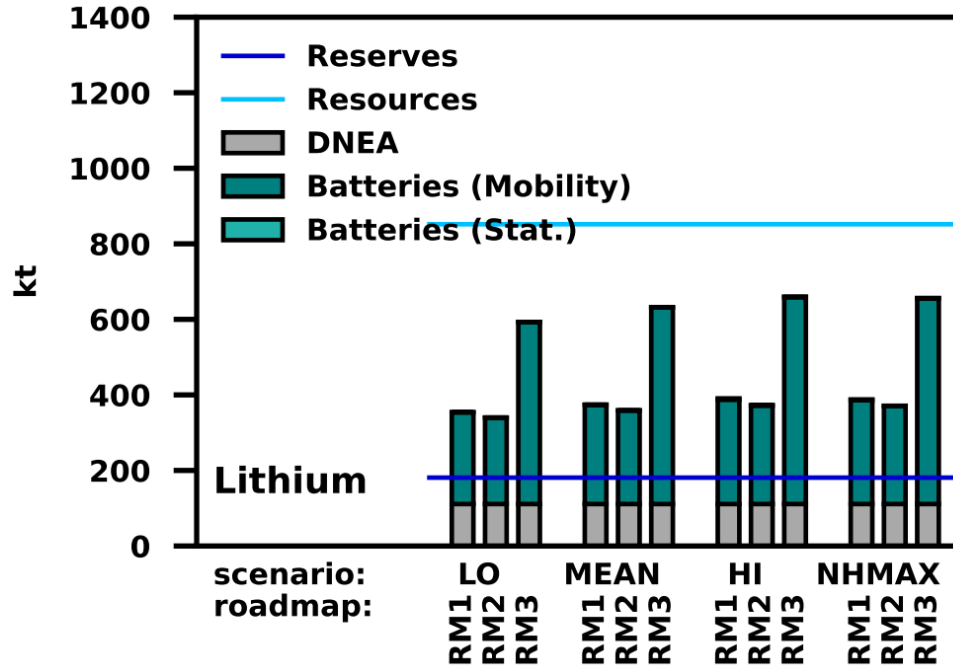
- Tellur
- Indium

Signifikante Ausweitung der Produktion nötig

Abbau von heute noch nicht wirtschaftlichen Lagerstätten nötig



# Rohstoffbedarf – Vergleich der Szenarien

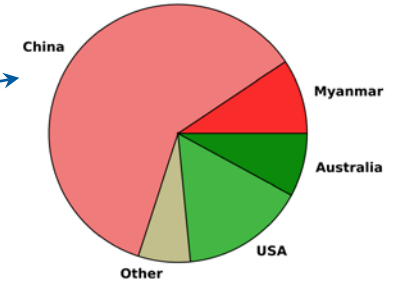
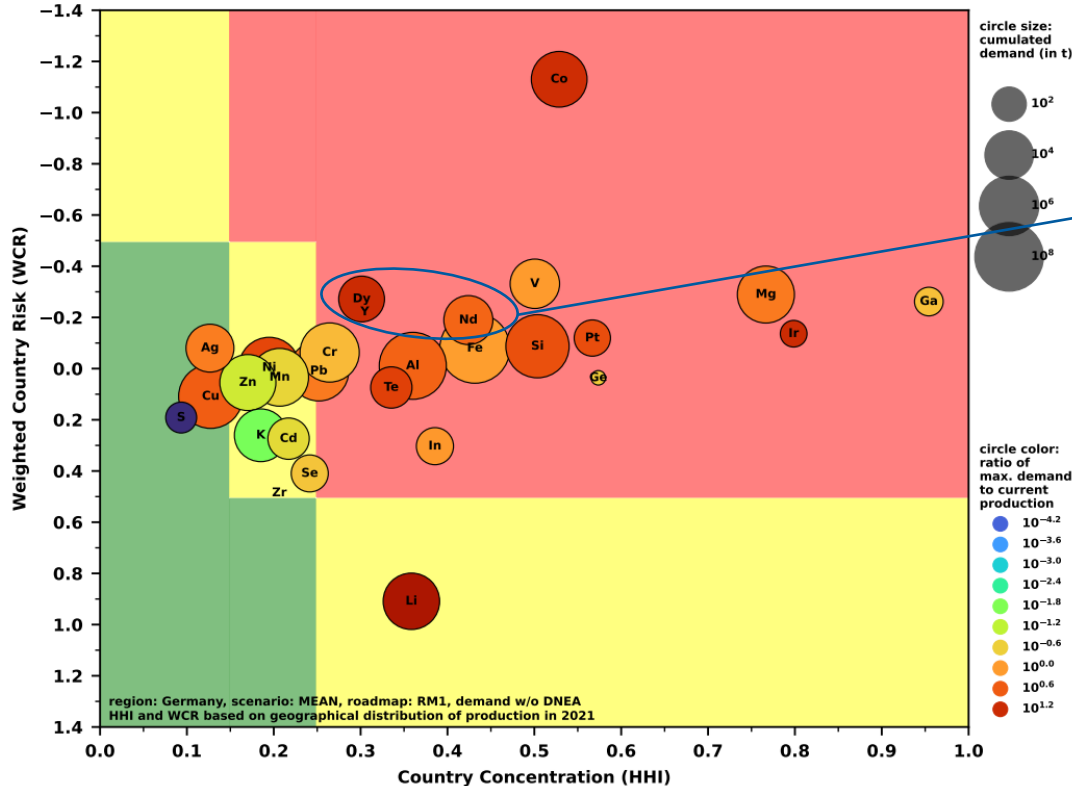


- Bestand an batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) + Plug-In-Hybriden (PHEV) in Szenario HI größer als in MEAN und LO  
→ spiegelt sich in Rohstoffbedarf wider

Aber:

- Annahmen bzgl. zukünftiger Marktanteile von Batterietypen beeinflussen Rohstoffbedarf deutlich mehr als eigentliche Szenarien  
→ Unterschiede Rohstoffbedarf zwischen „Roadmaps“ RM1, RM2, RM3 höher als zwischen Szenarien

# Rohstoffbedarf – Geopolitische Risiken: Seltene Erden



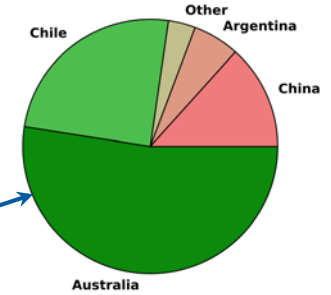
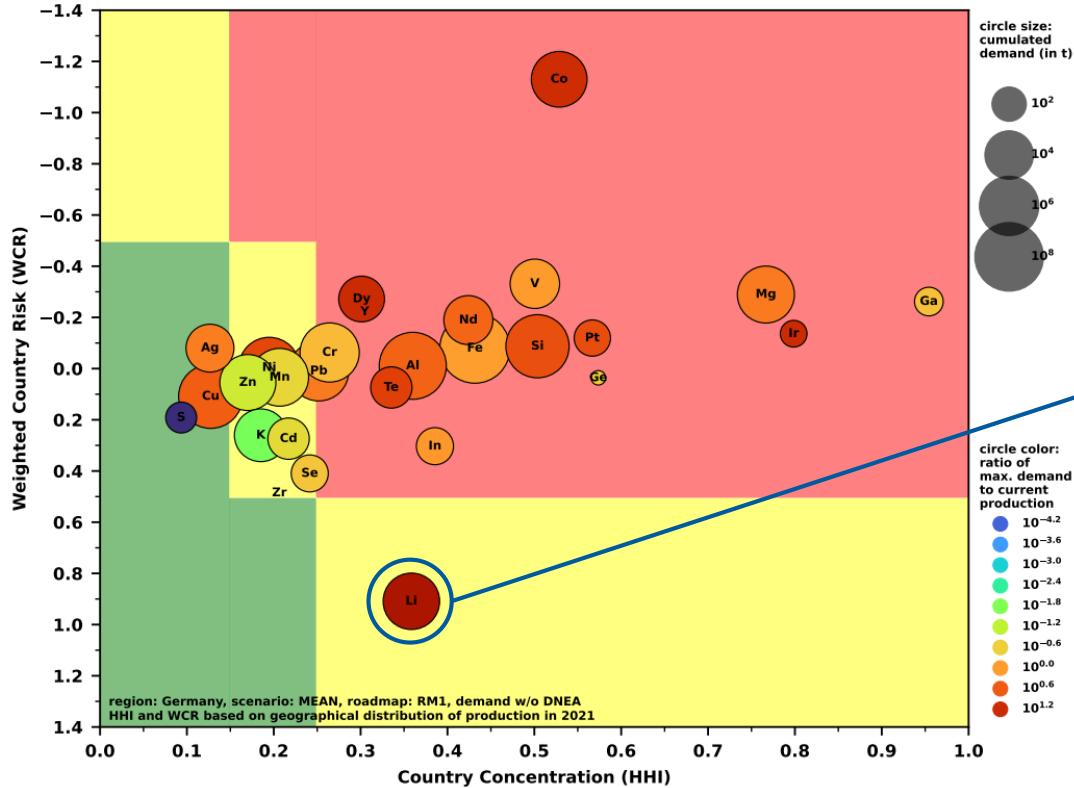
## Seltene Erden (REE), z.B. Neodym & Dysprosium:

- Permanentmagneten in
  - manchen Typen von Windkraftanlagen,
  - Elektromotoren

## Yttrium:

- Manche Brennstoffzellen- und Elektrolyseurtypen

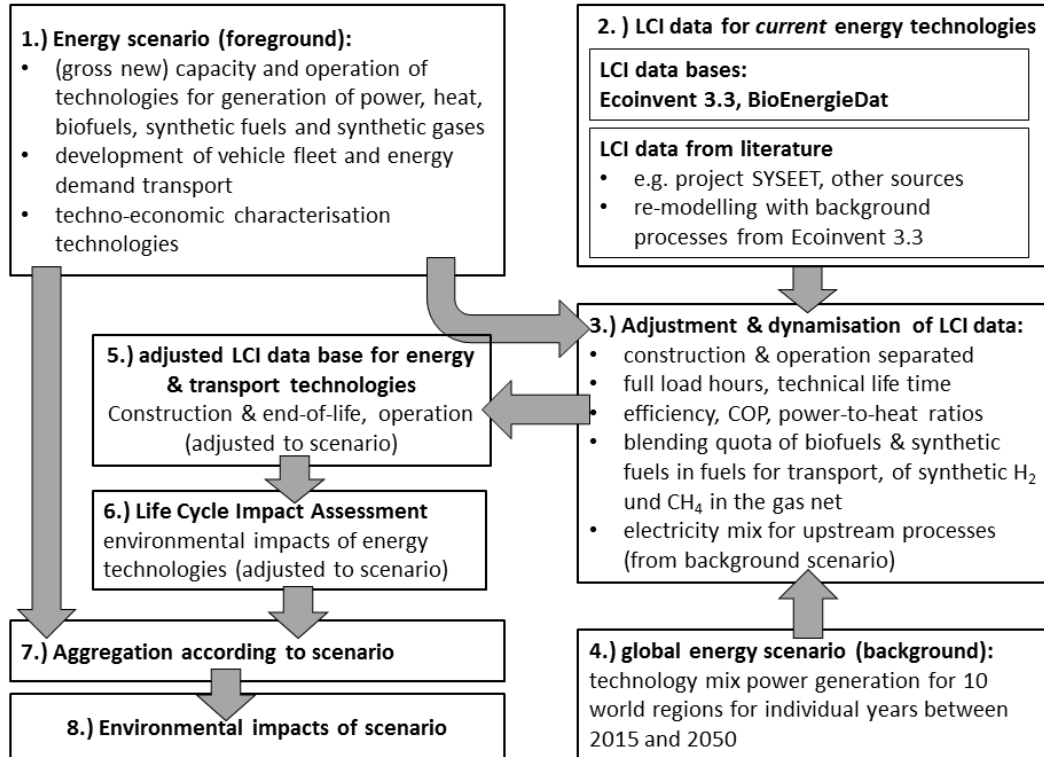
# Rohstoffbedarf – Geopolitische Risiken: Lithium



## Lithium:

- Viele Batterietypen (mobile & stationäre Anwendung)

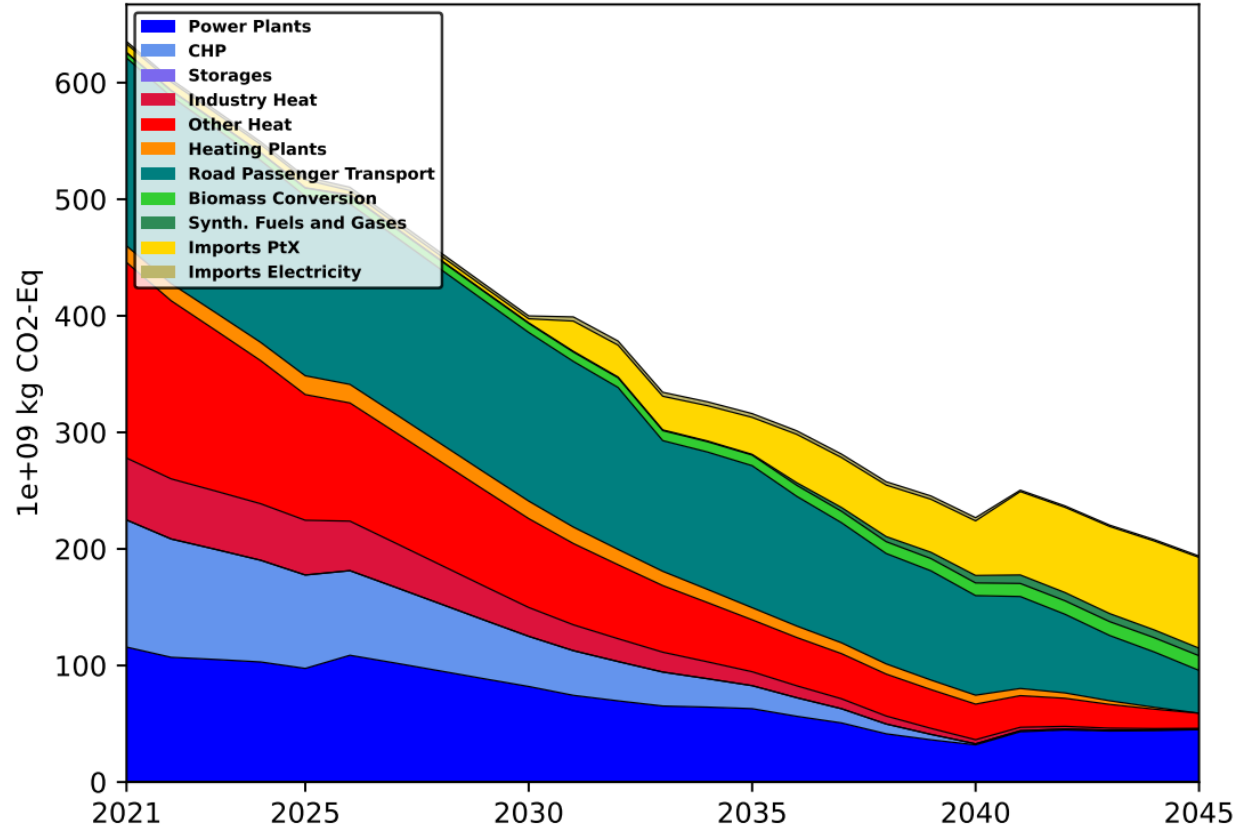
# Lebenszyklusbasierte Umweltauswirkungen – Ansatz



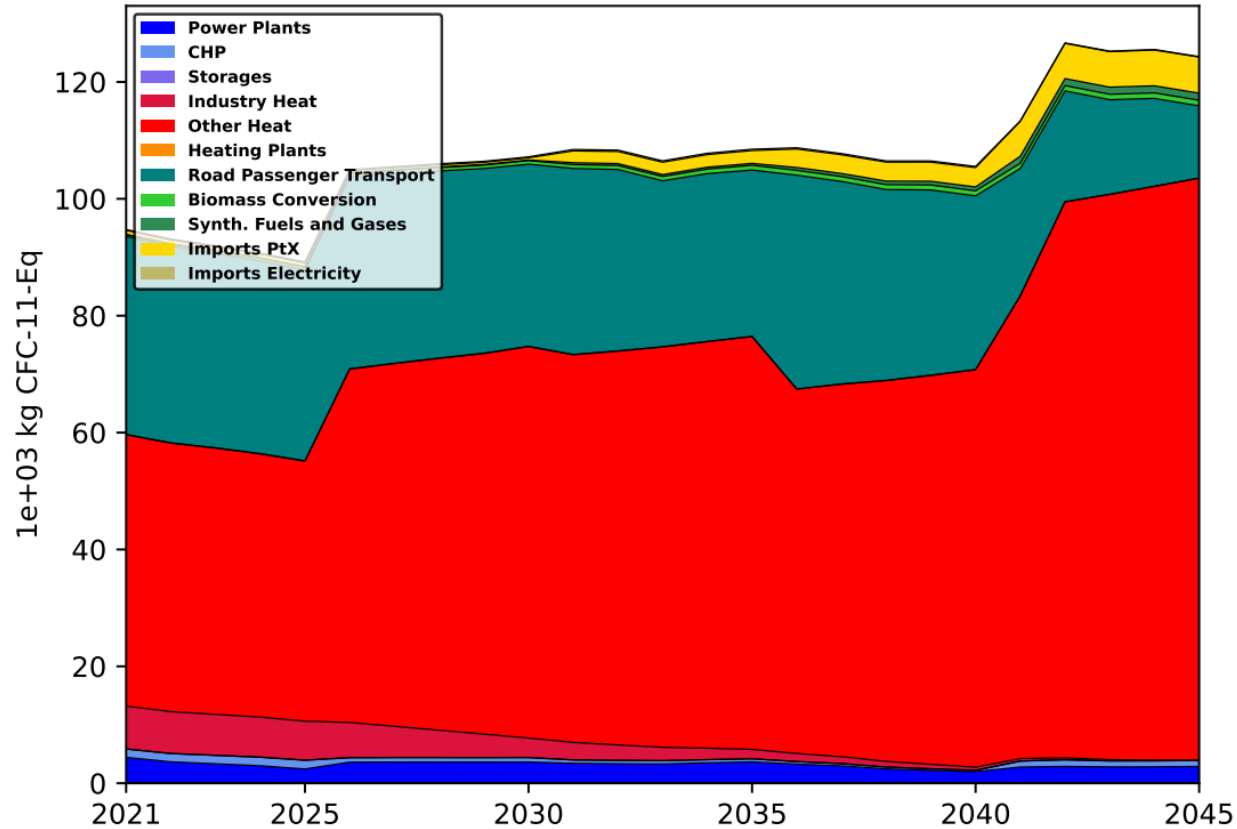
- Kopplung Output ESM mit LCA-Datenbank
- Zahlreiche prospektive Anpassungen und Harmonisierungen
- Lebenszyklusbasierte Umweltwirkungen Bau und Betrieb für alle relevanten Energie- und Verkehrstechnologien
- Aggregation der Umweltwirkungen der Technologien entsprechend des jeweiligen Szenarios

Quelle: Naegler et al. Life cycle-based environmental impacts of energy system transformation strategies for Germany. Are climate and environmental protection conflicting goals? *Energy Reports* 8 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.143>

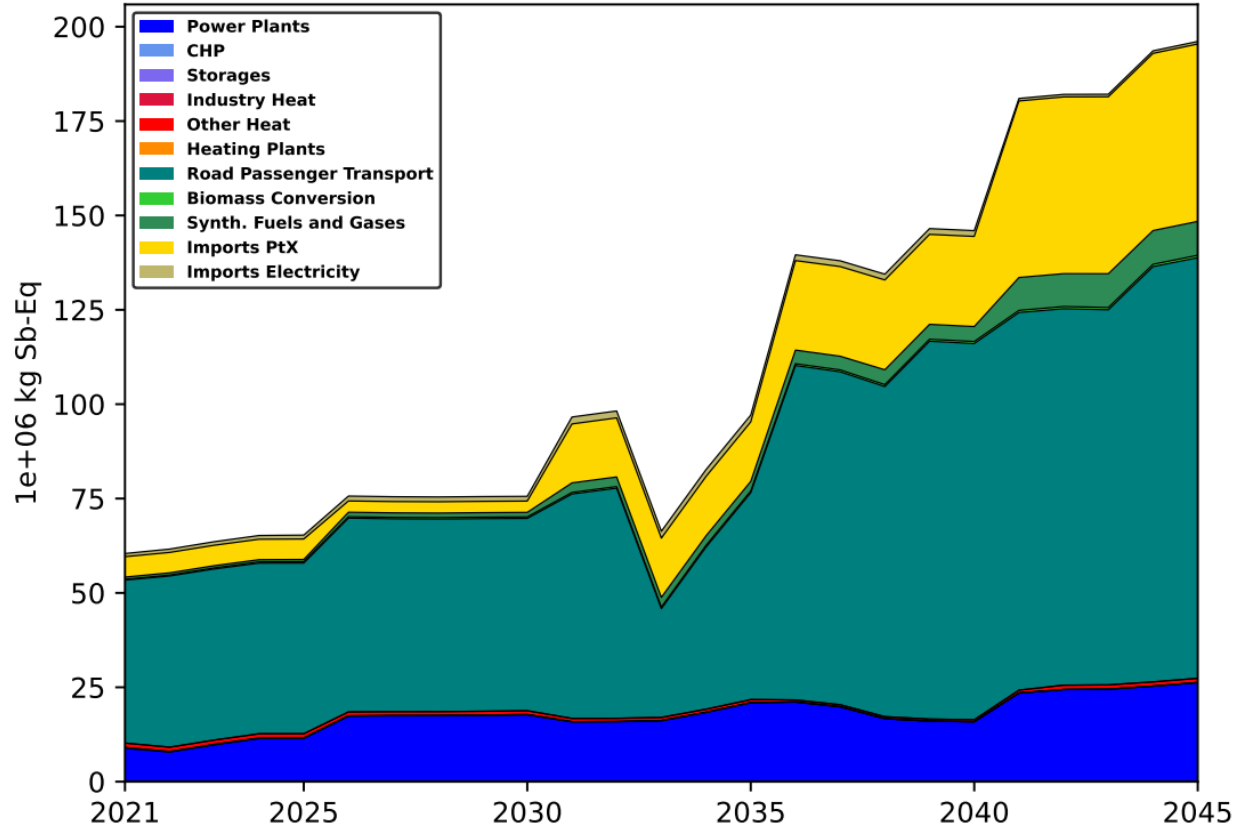
# Lebenszyklusbasierte Umweltwirkungen – Treibhausgasemissionen



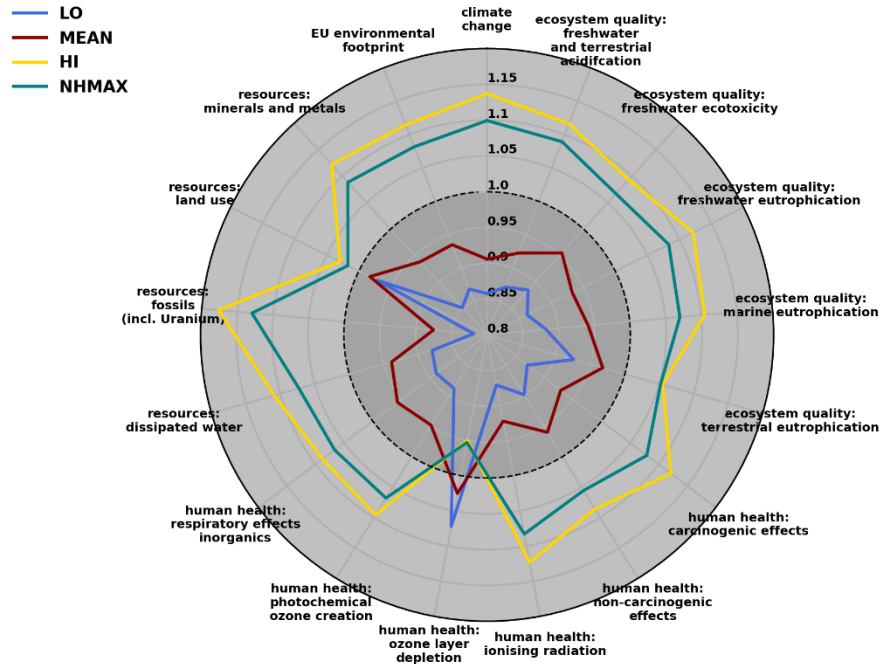
# Lebenszyklusbasierte Umweltwirkungen – Ozonbildung



# Lebenszyklusbasierte Umweltwirkungen – Rohstoffbedarf (aggregiert)



# Lebenszyklusbasierte Umweltwirkungen – Szenarienvergleich

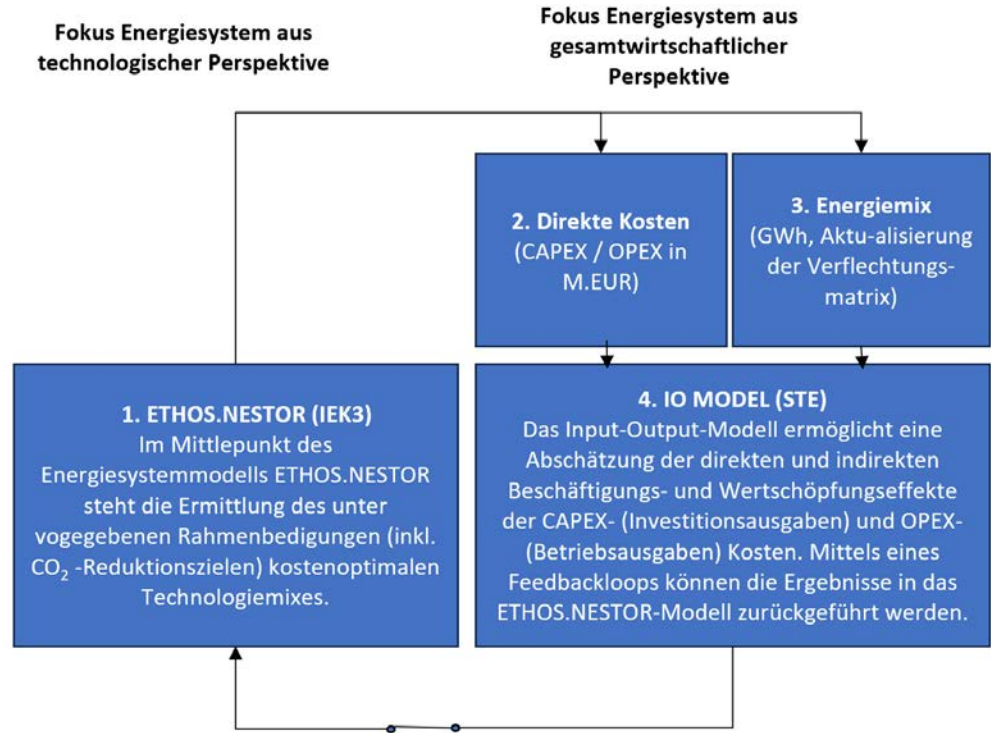


- Je nach Wirkungskategorie können Umweltwirkungen durch Transformation sinken oder steigen
- Lebenszyklusperspektive berücksichtigt z.T. signifikante Umweltwirkungen in der Vorkette
- Unterschiede Umweltwirkungen in aktuellen Szenarien zurückzuführen auf:
  - Quantitative Unterschiede Energiebedarf & Verkehrsleistungen
  - Quantitative Unterschiede Entwicklung Energieinfrastruktur und Fahrzeugflotte



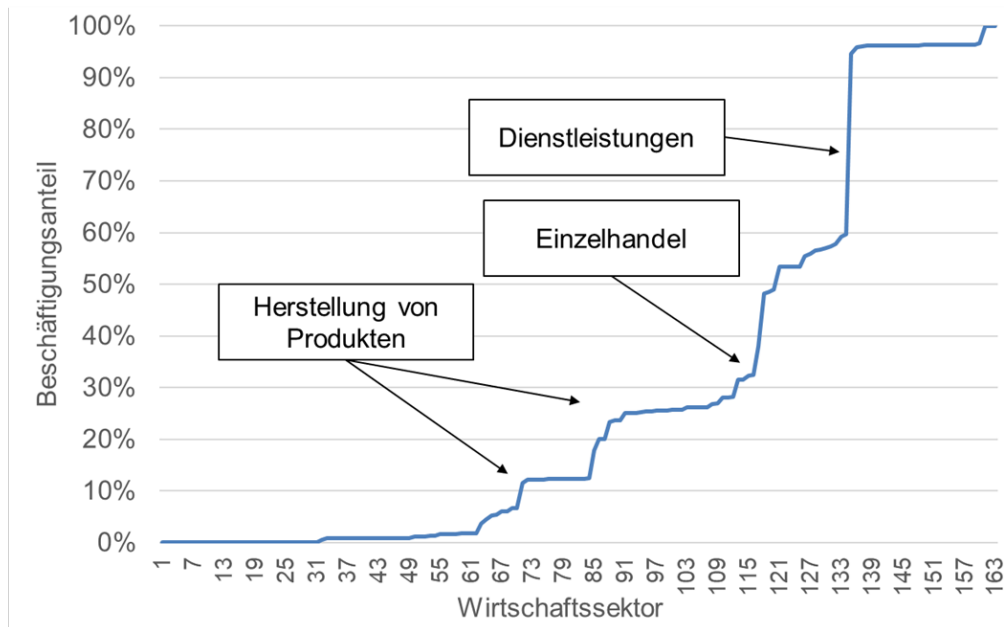
## Modell IEK3STE

- Kopplung Energiesystemmodell mit Input-Output Modell
- **Output:** Entwicklung auf sektoraler Ebene (Beschäftigung, Wertschöpfung)



# Arbeitskräftebedarf – Ergebnisse

**Auswirkungen von CAPEX- und OPEX-Effekten auf den Arbeitskräftebedarf im Zusammenhang mit der Entwicklung von Energietechnologien auf Wirtschaftssektoren Ebene (direkte und indirekte Effekte) (Szenario MEAN)**



Nur wenige Wirtschaftssektoren sind direkt von den CAPEX und OPEX-Ausgaben betroffen (31 von 163).

Insbesondere die Herstellung und Produktion von Gütern, wie z.B. Metallprodukten, Maschinenbau und Fahrzeugbau, verzeichnen eine starke Nachfrage nach Arbeitskräften.

Indirekt profitieren jedoch alle Wirtschaftssektoren von einem erhöhten Arbeitskräftebedarf.

Indirekt sind vor allem der Einzelhandel und die Dienstleistungssektoren gefragt.

# Wirkungsabschätzung auf Basis der Kontextszenarien

Jürgen Kopfmüller, Witold-Roger Poganietz, Volker Stelzer (alle KIT-ITAS)

# Vorgehensweise

## Liste der aktiven Deskriptoren

A(I)	Globale Entwicklung – Allgemeine Entwicklung
A(II)	Globale Entwicklung – Weltmarktpreise für fossile Energieträger
A(III)	Globale Entwicklung – Zinsentwicklung
B	EU-Integration
C	Bevölkerungsentwicklung
D	BIP Entwicklung
E	Arbeitsmarktentwicklung
F	Tertiärisierung der Wirtschaft
G	Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft
H	Transnationale Handelsströme
I	Internationale Verflechtung der Stromnetze
J	Infrastrukturentwicklung der Stromnetze
K	Ausbau Erneuerbarer Energien (Strom)
L	Tendenz Zentralität/Dezentralität der Stromerzeugung und -speicherung
M	Marktordnung Strommarkt
N	Politikstabilität im Bereich Energie
O	Steuerungsinstrumente im Bereich Energie
P	Governance im Infrastrukturausbau
Q	Planungsrecht / Öffentliche Infrastrukturplanung
R	Staatliche Gestaltungsziele
S	Sozialstaatliche Entwicklung
T	Wohlstandsentwicklung
U	Technikakzeptanz gegenüber Energietechnologien
V	Individuelles Energieverbrauchsverhalten
W	Bildungsentwicklung
X	Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende / NIMBY
Y	Werteorientierung und Zielvorstellungen zum Wirtschaftsdesign
Z	Medialer Diskurs

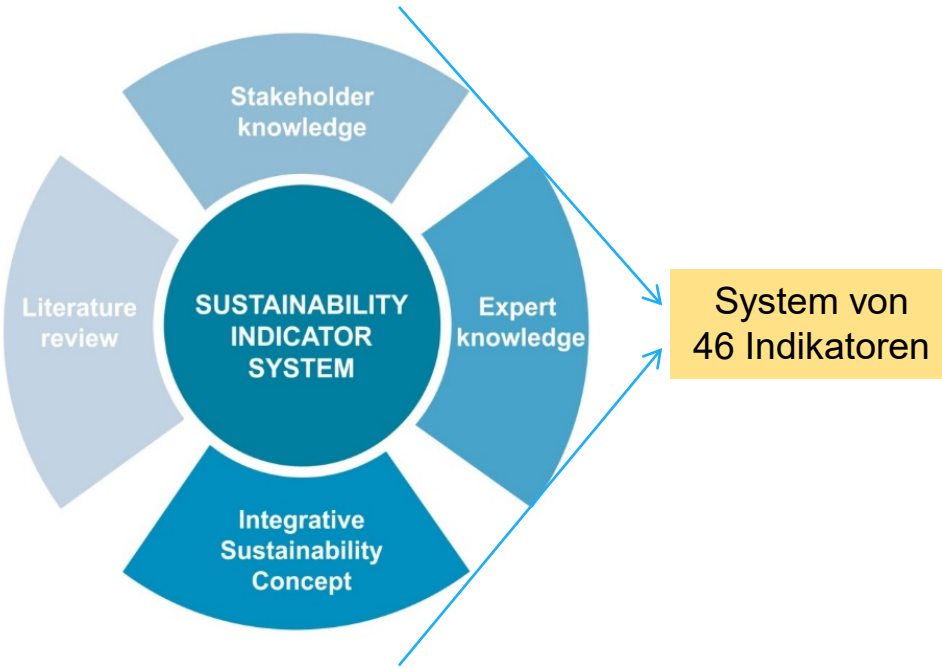
## Abschätzung der Wirkungen von Deskriptoren auf Nachhaltigkeitsindikatoren

- Nutzung von ExpertInnenwissen
- Evidenz-, Plausibilitätsüberlegungen
- Literatur

# Nachhaltigkeitsindikatoren: Ausgangspunkt

## Indikatorensystem aus dem Helmholtz Allianz-Projekt „Energy-Trans“

### Auswahl von Indikatoren



<b>Anteil der Ausgaben für Energie am verfügbaren Einkommen in Haushalten mit verfügbarem Einkommen &lt; 1.300 Euro</b>
Öffentliche Ausgaben für Energieforschung
Anzahl der Beschäftigten im EE-Sektor
Anzahl von Start-ups im EE und im Effizienz-Sektor
“Gender pay gap” in höchsten Gehaltsgruppen im Energiesektor
Akzeptanz von EE-Anlagen in der Nachbarschaft
Akzeptanz von Netzausbau für 100 % EE-Versorgung
<b>Grad der Internalisierung der energiebedingten externen Kosten</b>
<b>Anteil der privaten Haushalte, die erneuerbare Energie produzieren</b>
Anzahl der Energiekooperativen im EE-Sektor
Marktanteil der vier größten Stromanbieter in Deutschland

In rot: ausgewählte Indikatoren  
zur Darstellung des Vorgehens

EE: erneuerbare Energien

# Wirkungsabschätzung Schritt 1

## Deskriptoren mit direktem Einfluss ...

A(I)	Globale Entwicklung – Allgemeine Entwicklung
A(II)	Globale Entwicklung – Weltmarktpreise für fossile Energieträger
A(III)	Globale Entwicklung – Zinsentwicklung
B	EU-Integration
C	Bevölkerungsentwicklung
D	BIP Entwicklung
<b>E</b>	<b>Arbeitsmarktentwicklung</b>
<b>F</b>	<b>Tertiärisierung der Wirtschaft</b>
G	Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft
H	Transnationale Handelsströme
I	Internationale Verflechtung der Stromnetze
J	Infrastrukturentwicklung der Stromnetze
K	Ausbau Erneuerbarer Energien (Strom)
L	Tendenz Zentralität/Dezentralität der Stromerzeugung und -speicherung
M	Marktordnung Strommarkt
N	Politikstabilität im Bereich Energie
O	Steuerungsinstrumente im Bereich Energie
P	Governance im Infrastrukturausbau
Q	Planungsrecht / Öffentliche Infrastrukturplanung
R	Staatliche Gestaltungsziele
<b>S</b>	<b>Sozialstaatliche Entwicklung</b>
<b>T</b>	<b>Wohlstandsentwicklung</b>
U	Technikakzeptanz gegenüber Energietechnologien
V	Individuelles Energieverbrauchsverhalten
W	Bildungsentwicklung
X	Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende / NIMBY
<b>Y</b>	<b>Werteorientierung und Zielvorstellungen zum Wirtschaftsdesign</b>
Z	Medialer Diskurs

... auf den Indikator

Anteil der Ausgaben für Energie  
am verfügbaren Einkommen in Haushalten  
mit verfügbarem Einkommen < 1.300 Euro

# Wirkungsabschätzung Schritt 1

## Deskriptoren mit direktem Einfluss ...

A(I)	Globale Entwicklung – Allgemeine Entwicklung
A(II)	Globale Entwicklung – Weltmarktpreise für fossile Energieträger
A(III)	Globale Entwicklung – Zinsentwicklung
B	EU-Integration
C	Bevölkerungsentwicklung
D	BIP Entwicklung
E	Arbeitsmarktentwicklung
F	Tertiärisierung der Wirtschaft
G	Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft
H	Transnationale Handelsströme
I	Internationale Verflechtung der Stromnetze
<b>J</b>	<b>Infrastrukturentwicklung der Stromnetze</b>
K	Ausbau Erneuerbarer Energien (Strom)
<b>L</b>	<b>Tendenz Zentralität/Dezentralität der Stromerzeugung und -speicherung</b>
M	Marktordnung Strommarkt
<b>N</b>	<b>Politikstabilität im Bereich Energie</b>
O	Steuerungsinstrumente im Bereich Energie
P	Governance im Infrastrukturausbau
Q	Planungsrecht / Öffentliche Infrastrukturplanung
R	Staatliche Gestaltungsziele
S	Sozialstaatliche Entwicklung
<b>T</b>	<b>Wohstandsentwicklung</b>
<b>U</b>	<b>Technikakzeptanz gegenüber Energietechnologien</b>
<b>V</b>	<b>Individuelles Energieverbrauchsverhalten</b>
<b>W</b>	<b>Bildungsentwicklung</b>
<b>X</b>	<b>Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende / NIMBY</b>
<b>Y</b>	<b>Werteorientierung und Zielvorstellungen zum Wirtschaftsdesign</b>
<b>Z</b>	<b>Medialer Diskurs</b>

... auf den Indikator

Anteil der privaten Haushalte,  
die erneuerbare Energie produzieren

Anmerkung: Das Ergebnis dieser Bewertung wurde  
aus Platzgründen nicht in den Policy Brief  
aufgenommen

# Wirkungsabschätzung Schritt 1

## Deskriptoren mit direktem Einfluss ...

<b>A(I)</b>	<b>Globale Entwicklung – Allgemeine Entwicklung</b>
A(II)	Globale Entwicklung – Weltmarktpreise für fossile Energieträger
A(III)	Globale Entwicklung – Zinsentwicklung
<b>B</b>	<b>EU-Integration</b>
C	Bevölkerungsentwicklung
<b>D</b>	<b>BIP Entwicklung</b>
E	Arbeitsmarktentwicklung
F	Tertiärisierung der Wirtschaft
<b>G</b>	<b>Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft</b>
H	Transnationale Handelsströme
I	Internationale Verflechtung der Stromnetze
J	Infrastrukturentwicklung der Stromnetze
K	Ausbau Erneuerbarer Energien (Strom)
L	Tendenz Zentralität/Dezentralität der Stromerzeugung und -speicherung
M	Marktordnung Strommarkt
N	Politikstabilität im Bereich Energie
<b>O</b>	<b>Steuerungsinstrumente im Bereich Energie</b>
P	Governance im Infrastrukturausbau
Q	Planungsrecht / Öffentliche Infrastrukturplanung
<b>R</b>	<b>Staatliche Gestaltungsziele</b>
S	Sozialstaatliche Entwicklung
<b>T</b>	<b>Wohlstandsentwicklung</b>
U	Technikakzeptanz gegenüber Energietechnologien
<b>V</b>	<b>Individuelles Energieverbrauchsverhalten</b>
W	Bildungsentwicklung
<b>X</b>	<b>Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende / NIMBY</b>
<b>Y</b>	<b>Werteorientierung und Zielvorstellungen zum Wirtschaftsdesign</b>
<b>Z</b>	<b>Medialer Diskurs</b>

... auf den Indikator

Grad der Internalisierung der energiebedingten externen Kosten



# Wirkungsabschätzung Schritt 2

Anteil der Ausgaben für Energie am verfügbaren Einkommen in Haushalten mit verfügbarem Einkommen < 1.300 Euro

Deskriptor	Szenario LO Deskriptor-Ausprägung	Szenario HI Deskriptor-Ausprägung	Szenario MEAN Deskriptor-Ausprägung	Szenario NH_max Deskriptor-Ausprägung
<b>E. Arbeitsmarktentwicklung</b>	Zweiteilung Arbeitsmarkt	Geringe Arbeitslosigkeit / hohe Flexibilisierung	Zweiteilung Arbeitsmarkt	Geringe Arbeitslosigkeit / hohe Flexibilisierung
<b>Wirkungsabschätzung</b>	- 3	+ 3	- 3	+ 3
<b>F. Tertiärisierung der Wirtschaft</b>	Schwach	Stark	Stark	Stark
<b>Wirkungsabschätzung</b>	- 1	- 3	- 3	- 3
<b>S. Sozialstaatliche Entwicklung</b>	Stärkere Betonung liberaler Wohlfahrtselemente	Stärkere Betonung konservativ-korporatistischer Wohlfahrtselemente	Stärkere Betonung liberaler Wohlfahrtselemente	Stärkere Betonung konservativ-korporatistischer Wohlfahrtselemente
<b>Wirkungsabschätzung</b>	- 2	0	- 2	0
<b>T. Wohlstandsentwicklung</b>	Zunehmende Ungleichheit / schwaches Einkommenswachstum	Unveränderte Ungleichheit / stärkeres Einkommenswachstum	Zunehmende Ungleichheit / stärkeres Einkommenswachstum	Unveränderte Ungleichheit / stärkeres Einkommenswachstum
<b>Wirkungsabschätzung</b>	0	+ 3	+ 3	+ 3
<b>Y. Werteorientierung und Zielvorstellungen zum Wirtschaftsdesign</b>	Trend zu Materialismus und Leistung	Trend zu Materialismus und Leistung	Trend zu Differenzierung	Trend zu Postmaterialismus
<b>Wirkungsabschätzung</b>	- 2	- 2	0	+ 2
<b>Wirkungsabschätzung gesamt (Gleichgewichtung der Deskriptoren)</b>	- 2	0	- 1	+ 1

# Wirkungsabschätzung Schritt 2

Anteil der privaten Haushalte, die erneuerbare Energie produzieren (I)

Deskriptor	Szenario LO Deskriptor-Ausprägung	Szenario HI Deskriptor-Ausprägung	Szenario MEAN Deskriptor-Ausprägung	Szenario NH_max Deskriptor-Ausprägung
<b>J. Infrastrukturentwicklung der Stromnetze</b>	Bedarfsgerechter Ausbau	Bedarfsgerechter Ausbau	Bedarfsgerechter Ausbau	Bedarfsgerechter Ausbau
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 3	+ 3	+ 3	+ 3
<b>L. Tendenz Zentralität/Dezentralität der Stromerzeugung und -speicherung</b>	Trend zur Mischstruktur	Trend zum Umbau zur dezentralen Systemarchitektur	Trend zur Mischstruktur	Trend zum Umbau zur dezentralen Systemarchitektur
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 2	+ 4	+ 2	+ 4
<b>N. Politikstabilität im Bereich Energie</b>	Höhere Politikstabilität	Höhere Politikstabilität	Höhere Politikstabilität	Höhere Politikstabilität
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 3	+ 3	+ 3	+ 3
<b>T. Wohstandsentwicklung</b>	Zunehmende Ungleichheit / schwaches Einkommenswachstum	Unveränderte Ungleichheit / stärkeres Einkommenswachstum	Zunehmende Ungleichheit / stärkeres Einkommenswachstum	Unveränderte Ungleichheit / stärkeres Einkommenswachstum
<b>Wirkungsabschätzung</b>	0	+ 3	+ 3	+ 3
<b>U. Technikakzeptanz gegenüber Energietechnologien</b>	Leicht zunehmend	Leicht zunehmend	Leicht zunehmend	Leicht zunehmend
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 1	+ 1	+ 1	+ 1

# Wirkungsabschätzung Schritt 2

Anteil der privaten Haushalte, die erneuerbare Energie produzieren (II)

Deskriptor	Szenario LO Deskriptor-Ausprägung	Szenario HI Deskriptor-Ausprägung	Szenario MEAN Deskriptor-Ausprägung	Szenario NH_max Deskriptor-Ausprägung
<b>V. Individuelles Energieverbrauchsverhalten</b>	Trend zu Sparsamkeit	Trend zu Technikaffinität	Trend zu Technikaffinität	Trend zu Technikaffinität
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 1	+ 3	+ 3	+ 3
<b>W. Bildungsentwicklung</b>	Fokus auf MINT / starke Zugangsbeschränkung	Fokus auf MINT / geringe Zugangsbeschränkung	Fokus auf MINT / starke Zugangsbeschränkung	Fokus auf MINT / geringe Zugangsbeschränkung
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 1	+ 3	+ 1	+ 3
<b>X. Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende / NIMBY</b>	Trend zu positiven Einstellung	Trend zu positiven Einstellung	Trend zu positiven Einstellung	Trend zu positiven Einstellung
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 3	+ 3	+ 3	+ 3
<b>Y. Werteorientierung und Zielvorstellungen zum Wirtschaftsdesign</b>	Trend zu Materialismus und Leistung	Trend zu Materialismus und Leistung	Trend zu Differenzierung	Trend zu Postmaterialismus
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 2	+ 2	+ 1	- 2
<b>Z. Medialer Diskurs</b>	Hohe Meinungsvielfalt / starke Boulevardisierung	Hohe Meinungsvielfalt / geringe Boulevardisierung	Hohe Meinungsvielfalt / geringe Boulevardisierung	Hohe Meinungsvielfalt / geringe Boulevardisierung
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 2	+ 3	+ 3	+ 3
<b>Wirkungsabschätzung gesamt (Gleichgewichtung der Deskriptoren)</b>	+ 2	+ 3	+ 2	+ 3

Deskriptor	Szenario LO Deskriptor-Ausprägung	Szenario HI Deskriptor-Ausprägung	Szenario MEAN Deskriptor-Ausprägung	Szenario NH_max Deskriptor-Ausprägung
<b>A(I). Globale Entwicklung – Allgemeine Entwicklung</b>	Fortress world	Market forces	Fortress world	Fortress world
<b>Wirkungsabschätzung</b>	- 3	+ 3	- 3	- 3
<b>B. EU-Integration</b>	EU under threat	Nobody Cares	EU Renaissance	EU Renaissance
<b>Wirkungsabschätzung</b>	- 3	- 2	+ 3	+ 3
<b>D. BIP-Entwicklung</b>	Schwache Entwicklung	Starke Entwicklung	Moderate Entwicklung	Starke Entwicklung
<b>Wirkungsabschätzung</b>	- 2	+ 3	+ 1	+ 3
<b>G. Innovationsfähigkeit der Volkswirtschaft</b>	Vermindert	Zunehmend	Unverändert	Zunehmend
<b>Wirkungsabschätzung</b>	- 3	+ 3	0	+ 3
<b>O. Steuerungsinstrumente im Bereich Energie</b>	Präferenz für technologie- spezifische ökonomische Instrumente	Präferenz für technologie- spezifische ökonomische Instrumente	Präferenz für technologieoffene ökonomische Instrumente	Präferenz für technologieoffene ökonomische Instrumente
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 1	+ 1	+ 3	+ 3
<b>R. Staatliche Gestaltungsziele</b>	Stärkerer Fokus auf staatlicher Steuerung	Stärkerer Fokus auf Bürgerbeteiligung und Transparenz	Stärkerer Fokus auf Marktmechanismen	Stärkerer Fokus auf Bürgerbeteiligung und Transparenz
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 3	+ 1	+ 2	+ 1

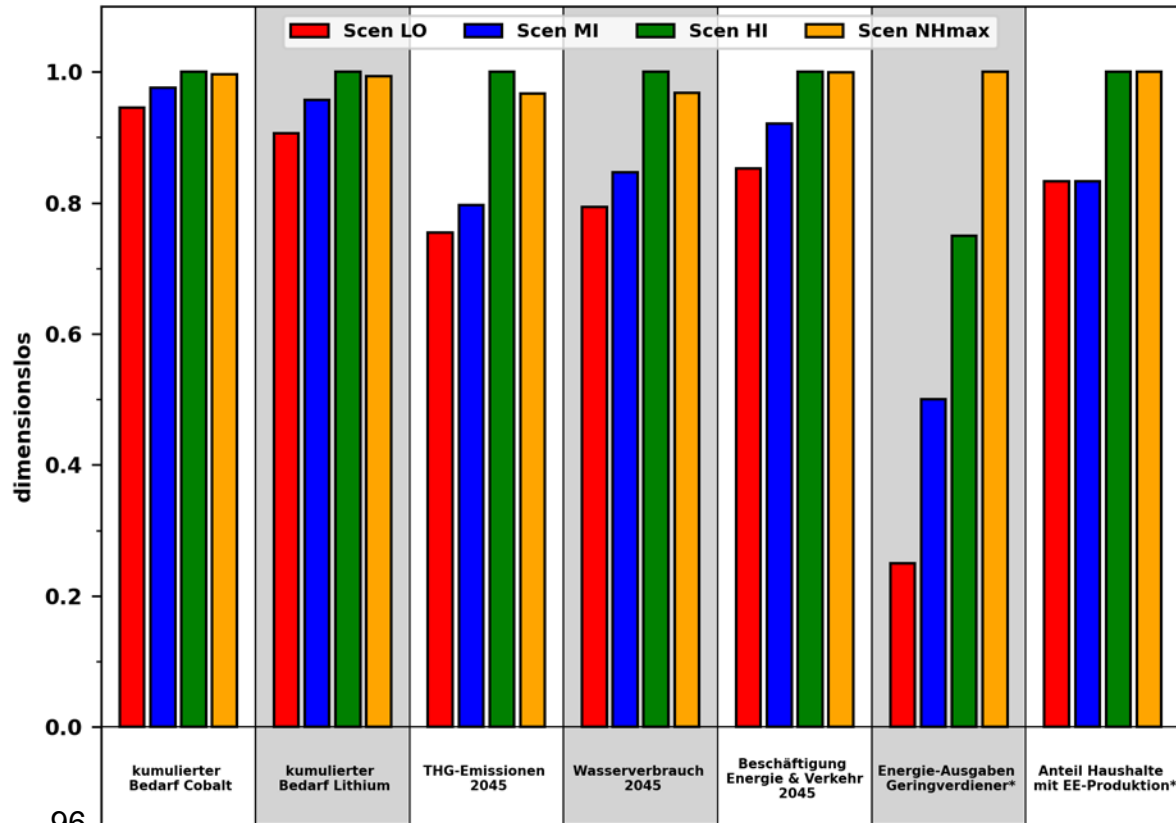
Deskriptor	Szenario LO Deskriptor-Ausprägung	Szenario HI Deskriptor-Ausprägung	Szenario MEAN Deskriptor-Ausprägung	Szenario NH_max Deskriptor-Ausprägung
<b>T. Wohstandsentwicklung</b>	steigende Ungleichheit / Einkommenswachstum schwach	konstante Ungleichheit / Einkommenswachstum stärker	steigende Ungleichheit / Einkommenswachstum stärker	konstante Ungleichheit / Einkommenswachstum stärker
<b>Wirkungsabschätzung</b>	- 3	+ 3	+ 2	+ 3
<b>V. Individuelles Energieverhaltensverhalten</b>	Trend zu Sparsamkeit	Trend zu Technikaffinität	Trend zu Technikaffinität	Trend zu Technikaffinität
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 3	+ 2	+ 2	+ 2
<b>X. Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende</b>	Trend zu positiver Einstellung	Trend zu positiver Einstellung	Trend zu positiver Einstellung	Trend zu positiver Einstellung
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 3	+ 3	+ 3	+ 3
<b>Y. Werteorientierung und Zielvor- stellungen zum Wirtschaftsdesign</b>	Trend zu Materialismus und Leistung	Trend zu Materialismus und Leistung	Trend zu Differenzierung	Trend zu Postmaterialismus
<b>Wirkungsabschätzung</b>	- 3	- 3	+ 2	+ 4
<b>Z. Medialer Diskurs</b>	Hohe Meinungsvielfalt / starke Boulevardisierung	Hohe Meinungsvielfalt / geringe Boulevardisierung	Hohe Meinungsvielfalt / geringe Boulevardisierung	Hohe Meinungsvielfalt / geringe Boulevardisierung
<b>Wirkungsabschätzung</b>	+ 1	+ 2	+ 2	+ 2
<b>Wirkungsabschätzung gesamt (Gleichgewichtung der Deskriptoren)</b>	- 0,5	+ 1,5	+ 1,5	+ 2

- Zwei unterschiedliche Quellen, Entstehungsprozesse und Formen von Informationen  
→ notwendig: einheitliche Bewertung(smaßstäbe)
- Voraussetzung für Bewertung: Referenzierung der Wirkungsabschätzungsergebnisse mögliche Ansätze:
  - Verbesserung / Verschlechterung in der Zeit
  - Festlegung von Zielwerten
  - Vergleichende Bewertung ( → Kriterien notwendig für „besser / schlechter als“)→ notwendig: Zielfähigkeit, Richtungssicherheit von Indikatoren
- Möglichkeiten der Gesamtbetrachtung von Wirkungsabschätzungsergebnissen
  - für ein Szenario oder im Szenarienvergleich
  - differenziertes Stärken / Schwächen-Muster oder/und aggregiertes Gesamtergebnis

# Zusammenfassung und Ausblick

# Vergleich der Szenarien hinsichtlich ausgewählter Indikatoren

normalisierte Werte für ausgewählte Indikatoren



## Normalisierung der Indikatorwerte

Für jeden Indikator werden die absoluten Indikatorwerte aller Szenarien durch den höchsten Indikatorwert aller Szenarien geteilt.

\* Die Standard-Ergebnisse der beiden nicht-modellbasierten Indikatoren „Energieausgaben Geringverdiener“ und „Anteil Haushalte mit EE-Produktion“ können (einheitenlose) Werte zwischen -3 und +3 einnehmen, die *qualitativ* die Unterschiede zwischen den Szenarien beschreiben. Die Indikatorwerte wurden zunächst auf eine Skala von 0 bis 1 reskaliert, anschließend wie oben beschrieben normalisiert.



# Innovative Elemente / Mehrwert des integrativen Ansatzes

- Ganzheitliche(re) Darstellung und Analyse des Energiesystems und seiner Transformation
    - Abbildung gesellschaftlicher und sozio-ökonomischer Faktoren / Dynamiken (Werthaltungen, Politik-Grundlinien, Bildung, Geopolitik, ...) als Rahmung
    - konsistente Einbettung des „techno-ökonomischen Energiesystems“ in diese Rahmung
  - Ganzheitlichere(re) Wirkungsabschätzung und Nachhaltigkeitsbewertung möglicher zukünftiger sozio-technischer Energiesysteme
    - angemessene(re) Kriterien
    - differenzierteres Bild aus Stärken / Schwächen
    - Beleuchtung von Nachhaltigkeits-„Nebenwirkungen“ (z. B. von Klimaneutralität)
- ➔ verbesserte Orientierung für Transformationsprozesse des Energiesystems (Handlungsbedarfe, Prioritäten, ...)

- Aktualisierung des Deskriptoren-Sets und des NH Indikatorensets
- Ableitung weiterer Einflüsse aus den Deskriptoren auf techno-ökonomische Analysen
- Bislang nicht modellierbare Indikatoren modellierbar(er) machen
- Wirkungsabschätzung – Bewertung
  - Wirkungsabschätzungen für weitere Indikatoren auf Basis der Kontextszenarien
  - Definition von Zielwerten (→ Distance-to-target-Ansatz) für beide Indikatorentypen
  - Nutzung der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA):  
Vergleich verschiedener Szenarien oder möglicher Maßnahmen in Reaktion auf bestimmte Performanzschwachstellen in den Szenarien
  - Gewichtung von Deskriptoren / Bewertungsindikatoren nach Relevanzaspekten (Kriterien erforderlich!), gesellschaftlichen Präferenzen, ... (durch ExpertInnen, Stakeholder, ...)